



Universidad de Oviedo

Ingeniería Energética

Aprovechamiento de Calor Residual en Industrias de Proceso
Continuo y su Aplicación en Productos Intermedios de Acería

Tesis Doctoral

Autor: José Arturo Villar Menéndez

Director
Jorge Parrondo Gayo

Julio, 2014



RESUMEN (en Inglés)

The use of waste energy in the continuous process industries is a field of great interest in energy-saving potential it presents. Despite this, until recently the technologies that can treat waste energy have received rather limited attention in the field of continuous process industries.

This PhD Thesis has the overall objective to study the possibilities of waste energy recovery in continuous process industries at asturian region, particularly in the steel industry. Specifically, research has focused on technologies and applications of energy-efficiency and savings that are currently used in energy-intensive industries with continuous processes.

Firstly, a comprehensive analysis of the global use of waste heat in continuous process industries and possible synergies between them was done. Once the analysis, it was possible to create a new group of Waste-to-Energy (WtE) technologies that convert, transport, manage and recover or reuse energy of any type of waste (solid, liquid, gas and heat) in a continuous industrial process. It was considered as an emerging group of its own, for large energy-consuming industries, apart from the wide concept of “clean energy technologies”.

Secondly, two real cases arose to implement transversal and innovative technologies, synergies were obtained from other iron and steel processes to recover waste heat from solids in semi-finished products at steelworks. So, transversal application could be replicated for the energy-efficiency of other industries with similar energy-intensive continuous processes.

Finally, this PhD Thesis has offered an example, waste heat recovery from solids, to be aware of the great potential in the field of synergies between multinationals in the region. Synergies based on two fundamental needs: energy-efficiency in continuous processes and added value to the populations of industrial environments. On the other hand, a knowledge practical management is a catalyst that serves as a magnet for investment and human capital. Finally, it is expected that the results obtained are a practical basis for decision-making and actions involved by internal and external R&D departments to the industry related to efficiency and energy saving.

Puedo resumir en dos palabras cuanto he aprendido en la vida: ¡Sigue adelante!

(Robert Lee Frost)

Agradecimientos

Agradezco a Nicolás de Abajo por ser la persona que esbozó y me animó a dar el primer paso, a la que estimo y aprecio especialmente. Juan José Arribas por ser el apoyo técnico y un buen amigo en ArcelorMittal y, sin duda, Jorge Parrondo que ha sido el apoyo incansable en este duro proceso de escribir artículos científicos, destacando su compromiso y abnegación durante todo este camino de sacar tiempo de dónde no lo tenía.

El mismo día que se iniciaba el Máster de Ingeniería Energética, curso predoctoral, no pude asistir porque estaba en el hospital esperando que naciese mi primer hijo y, en estos 3 años y medio, a cabo esta Tesis con dos hijos maravillosos, Nicolás y Paola...(siendo cada uno de ellos un reto y una Tesis en sí mismos).

Le dedico esta Tesis a toda mi familia (en particular a mis padres por su sacrificio por darme la oportunidad de poder estudiar y ayudar en estas décadas de formación). Y un recuerdo entrañable, y que todavía me emociona, a mi abuelita materna, de la que heredé sólo un poquito de su energía incombustible para caerse, levantarse y seguir adelante!!!

Este último párrafo quiero que sea en especial para mi mujer Marta que ha sido el verdadero motor para poder compaginar trabajo, familia y Tesis cada día durante estos años. Esta Tesis ha sido un ejemplo más del gran equipo que formamos y, sin su gran altruismo, nunca hubiera podido alcanzar la meta.

Resumen

El aprovechamiento de energía residual en las industrias de proceso continuo es un campo de gran interés por el potencial de ahorro energético que presenta. Pese a ello, hasta fechas recientes las tecnologías que pueden tratar la energía residual han recibido una atención más bien limitada en el ámbito de las empresas industriales de proceso continuo.

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo genérico estudiar las posibilidades de recuperación de energía residual en industrias de proceso continuo de la región asturiana, en particular de la industria siderúrgica. Concretamente, la investigación se ha centrado en las tecnologías y aplicaciones de eficiencia y ahorro energético que se utilizan actualmente en las industrias de energías intensivas con procesos continuos.

En primer lugar, se realizó un exhaustivo análisis a nivel mundial del aprovechamiento de calor residual en industrias de proceso continuo y las posibles sinergias entre las mismas. Una vez realizado el análisis, fue posible crear un nuevo grupo de tecnologías *Waste-to-Energy* (WtE) que convierten, transportan, gestionan y recuperan o reutilizan energía procedente de cualquier tipo de residuo (sólidos, líquidos, gases o directamente calor residual) en un proceso industrial continuo y, considerarlo como un grupo emergente y con entidad propia para las grandes industrias consumidoras de energía, dentro del amplio concepto de Tecnologías de Energía Limpia o *Clean Energy Technologies*.

En segundo lugar, se plantearon dos casos reales para aplicar tecnologías transversales e innovadoras, obtenidas de sinergias de otros procesos siderúrgicos, para recuperar calor residual de sólidos de productos intermedios de acería y, cuya aplicación transversal se

podría replicar para la eficiencia energética de otras industrias de energía intensiva con procesos continuos similares.

Por último, esta Tesis Doctoral ha ofrecido un ejemplo, en la recuperación de calor residual en sólidos, para ser conscientes del gran potencial existente en el campo de las sinergias entre las multinacionales de la región. Sinergias que van de la mano sobre dos necesidades fundamentales: la eficiencia energética en los procesos continuos y el valor añadido a las poblaciones de los entornos industriales. Y por otro lado, una gestión práctica del conocimiento, es un catalizador que sirve de polo de atracción para las inversiones y el capital humano. Finalmente, se espera que los resultados obtenidos sean un punto de partida práctico para la toma de decisiones y acciones de los departamentos de I+D+i internos y externos a las industrias en la eficiencia y el ahorro energético.

Summary

The use of waste energy in the continuous process industries is a field of great interest in energy-saving potential it presents. Despite this, until recently the technologies that can treat waste energy have received rather limited attention in the field of continuous process industries.

This PhD Thesis has the overall objective to study the possibilities of waste energy recovery in continuous process industries at Asturian region, particularly in the steel industry. Specifically, research has focused on technologies and applications of energy-efficiency and savings that are currently used in energy-intensive industries with continuous processes.

Firstly, a comprehensive analysis of the global use of waste heat in continuous process industries and possible synergies between them was done. Once the analysis, it was possible to create a new group of Waste-to-Energy (WtE) technologies that convert, transport, manage and recovery or reuse energy from any type of waste (solid, liquid, gas or directly waste heat) in a continuous industrial process. It was considered as an emerging group of its own, for large energy-consuming industries, within the broad concept of *Clean Energy Technologies*.

Secondly, two real cases arose to implement transversal and innovative technologies, synergies were obtained from other iron and steel processes to recover waste heat from solids in semi-finished products at steelworks. So, transversal application could be replicated for the energy-efficiency of other industries with similar energy-intensive continuous processes.

Finally, this PhD Thesis has offered an example of waste heat recovery from solids to be aware of the great potential in the field of synergies between multinationals at the Asturian region. Synergies based on two fundamental needs: energy-efficiency in continuous processes and added value to the populations of industrial environments. On the other hand, a practical knowledge management is a catalyst that serves as a magnet for investment and human capital. Finally, it is expected that the results obtained are a practical basis for decision-making and actions involved by internal and external R&D departments to the industry related to efficiency and energy saving.

Índice de Contenidos

<i>Lista de Tablas</i>	<i>III</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>IV</i>
1. Introducción	5
1.1 Energía residual en industrias de proceso continuo.....	5
1.1.1 Industria del Cemento.....	7
1.1.2 Industria Siderúrgica	9
1.2 Antecedentes.....	13
1.3 Objetivos	19
1.4 Publicaciones derivadas y justificación de la unidad temática	21
2. Resultados	23
2.1 Comparación entre Tecnologías para Recuperación de Energías Residuales en Industrias de Proceso Continuo	23
2.1.1 Industria siderúrgica	23
2.1.2 Industria del cemento.....	28
2.1.3 Industria de producción primaria de aluminio.....	29
2.1.4 Industria de fundición de metales.....	30
2.1.5 Industria del vidrio	31
2.1.6 Aplicaciones	33
2.2 Recuperación de Calor Residual de Slabs en el Proceso de Colada Continua	38
2.2.1 Caso de estudio: proceso de colada continua	38
2.2.2 Simulación del modelo en 2D	41
2.2.3 Diseño y optimización	45
2.3 Calefacción Urbana para Calor Residual en Nave de Enfriamiento de Slabs	51
2.3.1 Sitio.....	51
2.3.2 Tecnología propuesta.....	53
2.3.3 Viabilidad	66
3. Conclusiones.....	69
3.1 Tecnologías de aprovechamiento de energía residual en industrias de proceso continuo	70
3.2 Aprovechamiento del calor residual de los slabs de colada continua.	71
3.3 Trabajos futuros	75
4. Referencias.....	76
5. Compendio de Publicaciones	87
5.1 Waste-to-energy technologies in continuous process industries	87

5.2	Waste heat recovery technology in continuous casting process	100
5.3	District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain)	110
6.	<i>Informe sobre la Calidad de las Publicaciones.....</i>	121

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Matriz de tecnologías WtE, usos y beneficios en la industria siderúrgica	24
Tabla 2.2. Resumen de las tecnologías WtE en la industria del cemento.....	28
Tabla 2.3. Tecnologías WtE en la industria de producción primaria de aluminio.....	29
Tabla 2.4. Tecnologías WtE en el proceso de fundición de metales.....	31
Tabla 2.5. Tecnologías WtE relacionadas con la industria del vidrio.....	32
Tabla 2.6. WHR en industrias intensivas de energía de los EE.UU. (ITP 2008)	34
Tabla 2.7. Interacción sinergética entre industrias de proceso continuo.....	36
Tabla 2.8. Resumen de las distancias geométricas y valores clave de la solución final	49
Tabla 2.9. Consumo de los potenciales usuarios	59
Tabla 2.10. Distribución porcentual de los costes de ingeniería.....	66

Lista de Figuras

Figura 1.1. Emisiones directas de CO ₂ por sectores industriales y regiones en 2006 (IEA 2009a)	6
Figura 1.2. Procesos mediante horno seco (Lehigh Hanson 2011)	8
Figura 1.3. Rutas de producción primaria y secundaria de acero (World Steel 2009a) ...	11
Figura 1.4. Perspectivas de consumo mundial de acero por regiones (Gielen y Podkanski 2006)	12
Figura 1.5. Vías actuales de producción siderúrgica en Europa (Pardo et al. 2012)	16
Figura 1.6. Fuentes para el District Heating (Euroheat & Power 2014)	18
Figura 2.1. Actuales tecnologías WtE en los procesos de producción siderúrgicos.....	23
Figura 2.2. Caso de estudio en el sector siderúrgico usando la tecnología WHR (ArcelorMittal 2010)	35
Figura 2.3. Layout del proceso de colada continua	38
Figura 2.4. Slabs en las líneas de colada continua	39
Figura 2.5. Termografía de slabs en las máquinas de oxicorte	40
Figura 2.6. Termografía de un slab en la mitad de la cinta transportadora.....	40
Figura 2.7. Pilas de slabs al final de la línea en el proceso de colada continua	41
Figura 2.8. Geometría y mallado utilizado para similar la solución propuesta: a) dominio simétrico; b) detalle del mallado en la zona de la tubería.....	43
Figura 2.9. Comparación ΔTw y ϵ en todos los casos 2D relacionados con la variación de los parámetros de cálculo	44
Figura 2.10. Comparación de ΔTw y ϵ para diferentes: parámetros geométricos, caudal másico y coeficiente de emisividad.....	46
Figura 2.11. Predicción de los vectores velocidad del aire en la solución propuesta.....	47
Figura 2.12. Predicción de la distribución de temperatura en la solución propuesta.....	48
Figura 2.13. Vista exterior de la nave para enfriamiento de slabs en la acería avilesina.	53
Figura 2.14. Parque regulador de slabs, con un tren transportando slabs de la acería ...	53
Figura 2.15. Diseño esquemático de la nave y el plano de cálculo ABCD	55
Figura 2.16. Geometría y mallado en la simulación CFD en las condiciones actuales: a) región de la nave de enfriamiento; b) detalle del mallado en una pila de slabs.....	55
Figura 2.17. Predicción de vectores de velocidad de aire en las condiciones actuales (plano ABCD como en la figura 2.15).....	56
Figura 2.18. Predicción de la distribución de temperatura en las condiciones actuales (plano ABCD como en la figura 2.15).....	57
Figura 2.19. Esquema del sistema de recuperación de calor residual.....	61
Figura 2.20. Geometría y mallado utilizado para la simulación CFD en la nave de enfriamiento modificada: a) construcción de la región; b) detalle del mallado de la campana en la zona de aspiración de aire caliente	63
Figura 2.21. Predicción de vectores de velocidad de aire en virtud de la solución técnica (plano ABCD como en la figura 2.15).....	65
Figura 2.22. Predicción de la distribución de temperatura en la solución técnica (plano ABCD como en la figura 2.15)	65

1. Introducción

1.1 Energía residual en industrias de proceso continuo

A nivel mundial, las industrias que consumen más energía son las que a su vez emiten la mayor parte de los gases de efecto invernadero (GEI) (IEA 2008a). Por un lado, la crisis global ha puesto de manifiesto la importancia del desarrollo sostenible. Las industrias del mañana deben abordar simultáneamente aspectos económicos, sociales y ecológicos, con procesos eficientes y limpios. En el medio y largo plazo "cero residuos" y "cero emisiones" serán los objetivos para las "fábricas del futuro". Por otro lado, bajo la presión de la creciente población mundial y el aumento de las aspiraciones de estilo de vida, se espera que el consumo mundial de energía se duplique a partir del nivel actual de 15 TW para el año 2050, y que se triplique para el año 2100. Por lo tanto, esto supondrá una enorme presión sobre los recursos de la Tierra (EU 2010a).

La productividad energética se incrementa de forma endógena, se origina en virtud de causas internas, por medio de la reducción de los costes de operación en las instalaciones (IEA 2008b). Entre el 20 y el 50 % del consumo de energía industrial se estima que se pierde como calor residual en forma de gases de escape calientes, agua de refrigeración y el calor perdido de las superficies calientes de equipos y productos de calefacción (ITP 2008). De hecho, el proceso de calentamiento se considera la segunda operación con más consumo de energía por detrás de los accionamientos y sistemas propulsores que consumen más de dos tercios de la energía eléctrica industrial (EERE 2007).

Por sectores, el mayor consumo de energía corresponde a la industria química, que representó el 19 % del total mundial en 2010 (ACC 2012), y también destacan

notablemente otros dos sectores: el de los minerales no metálicos y el de la siderurgia. Ambos sectores generan el 56 % de las emisiones industriales de CO₂ a nivel mundial (IEA 2009a).

En la Figura 1.1 se muestran los porcentajes de emisiones de CO₂ por sectores y en los que se han incluido los hornos de coque, altos hornos y emisiones de proceso de CO₂. Se excluyen emisiones en el suministro de energía y se asume un 75 % de almacenamiento de carbono para todas las materias primas petroquímicas. En 2006, las emisiones directas de CO₂ de energía industrial y de proceso, ascendieron a 7,2 Gt, alrededor del 25 % del total de emisiones mundiales, de las cuales el 30 % proviene de la industria siderúrgica (IEA 2009a).

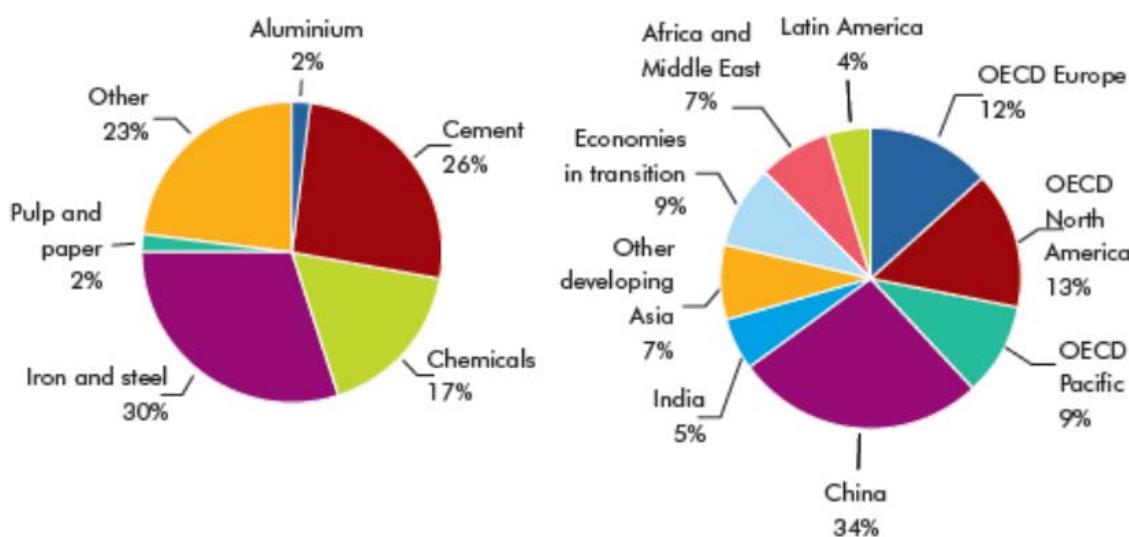


Figura 1.1. Emisiones directas de CO₂ por sectores industriales y regiones en 2006

(IEA 2009a)

La producción industrial se prevé que aumente en un factor de cuatro de aquí a 2050. Así pues, si no se consigue una fuerte mejora de eficiencia energética, las energías renovables junto a la captura y almacenamiento de CO₂ (CAC) tendrán que tener un impacto muy significativo para que la industria pueda en efecto reducir sustancialmente sus GEI (UNIDO 2010).

A continuación se ofrece una perspectiva más detallada para los casos de las industrias del cemento y siderúrgica, a las que les corresponden las mayores emisiones de CO₂ y además poseen procesos relativamente estandarizados, mientras que los procesos de la industria química resultan enormemente variados.

1.1.1 Industria del Cemento

La tercera industria con mayor consumo de energía a nivel global es el sector de los minerales no metálicos, en el que se incluyen cemento, vidrio, ladrillo y cerámica. La producción de estos materiales, en los que se requiere una cantidad sustancial de calor, representó el 7 % del sector industrial, a nivel mundial, en el consumo de energía en 2010. La industria más importante dentro del sector de los minerales no metálicos es la producción de cemento, representando el 85 % del consumo de energía en el sector. Aunque la industria cementera ha mejorado su eficiencia energética en los últimos años, debido especialmente al cambio de su proceso de producción con horno húmedo a procesos mediante horno seco, que requieren menos calor, los costes de energía todavía constituyen entre el 20 y el 40 % del coste total de la producción de cemento (EC 2008).

El cemento es un material esencial para la infraestructura social y ha desempeñado un papel vital en el desarrollo económico en todo el mundo. Los combustibles fósiles (por ejemplo, carbón, petróleo) son los combustibles predominantes utilizados en la industria del cemento. En consecuencia, las emisiones mundiales de CO₂ emitidas por la industria del cemento han alcanzado alrededor de los 2,2 millones de toneladas (Mt), lo que representa aproximadamente el 5 % de las emisiones globales de CO₂ antropogénico. Sin embargo, los combustibles fósiles alternativos, como el gas natural y combustibles de biomasa, se han utilizado cada vez más como un factor clave para reducir las emisiones de CO₂ en los últimos años (IEA 2009b). Los factores que afectan a su crecimiento son: la disponibilidad de materias primas, las propiedades del cemento obtenido, el precio de los sustitutos de clínker, la aplicación prevista de los nuevos cementos, las normativas, la aceptación del mercado, la legislación específica en materia de recogida de residuos, los costes de los combustibles alternativos y la aceptación social (CEMBUREAU 2009; Hoenig y Twigg 2009).

La producción de cemento implica cuatro pasos principales: preparación de una mezcla de material, formación térmica de clínker (componente principal del cemento) en el horno de cemento, refrigeración de clínker y, finalmente, molienda y mezcla con aditivos a la calidad del cemento requerido (Bolwerk 2005). El tipo más utilizado es el cemento Portland, que contiene más de un 95 % de clínker (IEA 2007).

La producción de clínker de cemento compuesto por piedra caliza y tiza, es el proceso que más energía consume en este subsector. La producción de clínker puede ser "húmeda" o "seca", dependiendo del contenido de agua del material de alimentación de la materia prima. El proceso en seco (figura 1.2) evita la necesidad de evaporación de agua y es mucho menos intensivo en energía. Los hornos de proceso seco producen casi el 80 % del cemento fabricado en Europa (EHS 2007). El porcentaje de proceso en seco utilizado en la producción de la industria del cemento de la UE ha pasado del 78 % en 1997 al 90 % en 2008 (CEMBUREAU 1999, EC 2010).

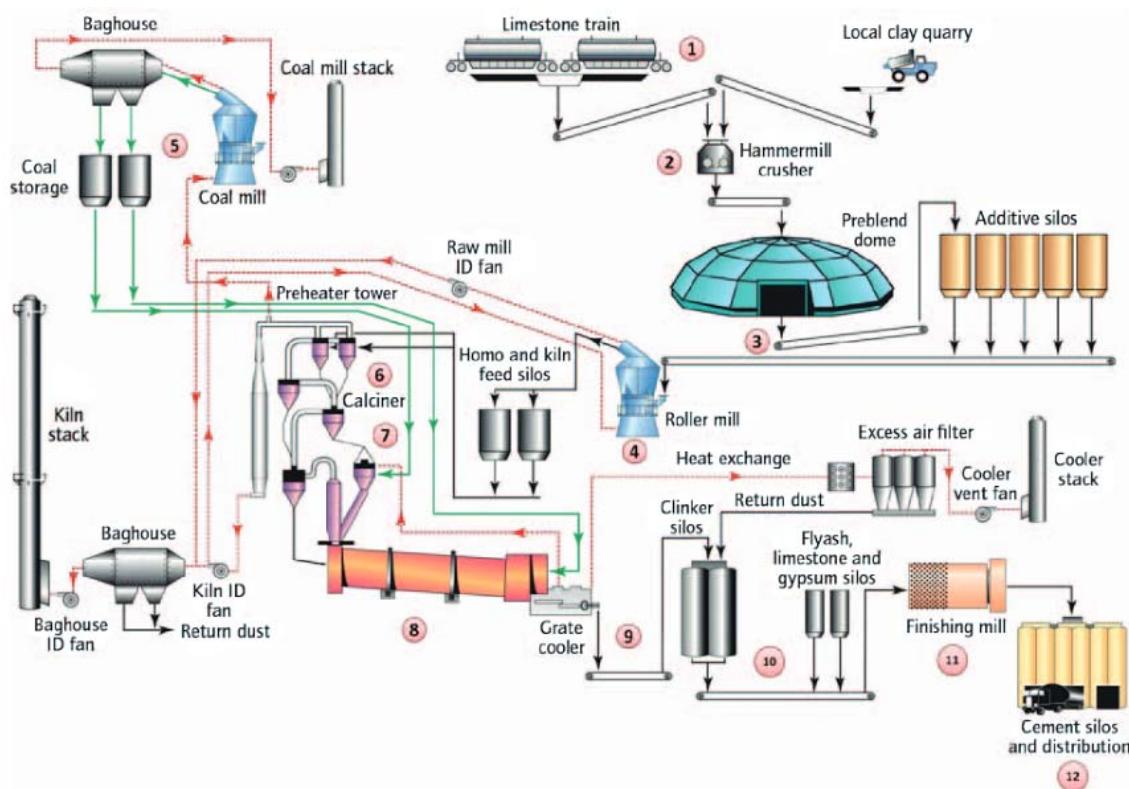


Figura 1.2. Procesos mediante horno seco (Lehigh Hanson 2011)

El uso predominante de la energía en la fabricación de cemento es, en gran medida, para calentar el horno. Sin embargo, el uso de la electricidad es otro factor importante, ya que cubre alrededor del 20 % de las necesidades energéticas para la producción de cemento (UE 2008). Los principales usuarios de la electricidad son los molinos (molienda de las materias primas, combustibles sólidos y la molienda final del cemento), que representan más del 60 % del consumo de electricidad (CSI 2009), y los ventiladores de escape (horno, materias primas y molienda de cemento) que, junto con los molinos, representan más del 80 % del consumo eléctrico (CEMBUREAU 2006). Sin embargo, la eficiencia energética de la molienda está entre el 5 y el 10 % (AIE 2006). El consumo medio europeo actual de electricidad en la fabricación de cemento es de 111 kWh/t de cemento. Los mejores resultados en términos de gestionar el consumo de electricidad se encuentra alrededor de 80 kWh/t de cemento (WBCSD 2010).

China es el mayor productor de cemento, con el 58 % de la producción mundial en 2011 (USGS 2013). La producción de la industria del cemento en la UE-27 en 2006 (267,5 millones de toneladas) representó el 10,5 % de la producción mundial total, pero en 2008 ese porcentaje se redujo al 9 % (254,7 millones de toneladas) (CEMBUREAU 2009; EC 2010). Por su parte el consumo de cemento en la UE-27 alcanzó su máximo en 2006, con 265,9 Mt, reduciéndose en 2008 a niveles de 2005 (246,6 millones de toneladas) (CEMBUREAU 2009). A pesar de las cifras anteriores, que son reflejo de las fluctuaciones durante la crisis mundial, la industria europea del cemento sigue teniendo una presencia global, manteniendo cuotas de mercado del 95 % en Europa y del 70 % en América del Norte (IEA 2008c). De hecho, tres de los cinco productores de cemento más grandes del mundo tienen su sede en la UE-27: Lafarge (Francia), Heidelberg Cement (Alemania) e Italcementi (Italia). Los otros dos productores son Holcim (Suiza) y Cemex (México) (BREF 2010).

1.1.2 Industria Siderúrgica

El segundo mayor consumidor de energía a nivel industrial en el mundo es la industria siderúrgica, que representó el 15 % del consumo de energía en 2010 (IHS 2011). Este consumo energético representa aproximadamente el 20 % de los costes de producción

en la industria siderúrgica (World Steel 2013). En algunos casos, la energía constituye una porción especialmente elevada del coste de producción del hierro y el acero, hasta llegar incluso a un 40 % en algunos países (APP 2008).

Por sus características y su amplia versatilidad, el acero desempeña un papel esencial para las tecnologías y soluciones que satisfacen las necesidades cotidianas de la sociedad, presente y futura. Tiene aplicaciones en la construcción de edificios, puentes, carreteras y vías férreas, fabricación de vehículos, tecnologías de producción de energía, medios de transferencia de energía, fabricación de envases de alimentos y bebidas, etc. El mineral de hierro es la materia prima básica utilizada en la industria siderúrgica. Es uno de los materiales más comunes que se encuentran en la Tierra y se extrae en minas a cielo abierto y, es transferido por mar y ferrocarril a las plantas siderúrgicas que están repartidas por todo el mundo.

La ruta primaria, principal del acero de producción, también conocida como ruta de producción de acero integrado, y la ruta de producción secundaria de acero consisten esencialmente en tres pasos básicos (Figura 1.3): preparación de materias primas, fabricación de hierro y acero. Una planta típica de producción de acero integrado consta de un horno de coque, una planta de sinterización, un alto horno y, o bien un horno básico de oxígeno (BOF), que también se llama planta de acero básico al oxígeno (BOS), o un horno de solera abierta (OHF). El alto horno se alimenta con mineral de hierro, coque y aire precalentado para producir arrabio (metal caliente). El arrabio se refina en un alto horno o un horno de solera abierta para obtener el acero crudo. La intensidad energética de la ruta de producción de acero primario, utilizando el horno básico de oxígeno, varía entre 17 y 23 GJ por tonelada de acero bruto, con un valor promedio de 21 GJ por tonelada de acero en la Unión Europea (EU 2010b). Esta variación depende del mineral de hierro y la calidad del carbón, el grado de acero y la eficiencia de los materiales. La ruta de horno de solera abierta es más intensiva en capital y menos productiva. Actualmente, en la Unión Europea solo queda una pequeña capacidad en uso con esa tecnología, debido a su sustitución por la tecnología de BOF al final del siglo pasado (Yellishetty et al. 2010). La ruta de producción secundaria de

acero no requiere coque o una planta de sinterización porque la chatarra de acero reciclado se funde directamente en un horno de arco eléctrico (EAF). La intensidad energética de esta ruta se extiende desde 9,1 hasta 12,5 GJ por tonelada de acero en la Unión Europea (EU 2010b).

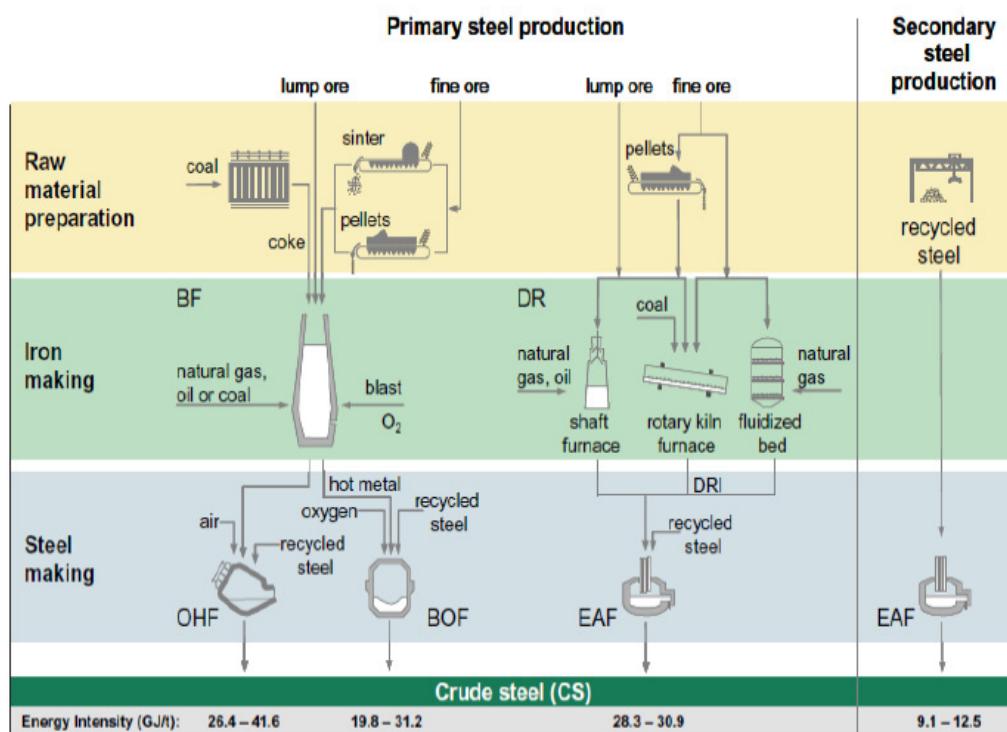


Figura 1.3. Rutas de producción primaria y secundaria de acero (World Steel 2009a)

La industria siderúrgica es el mayor emisor industrial de CO₂ (IEA 2009a). Se estima que entre el 4 y el 7 % de las emisiones antropogénicas de CO₂ proceden de esta industria en la UE-27 (Arens 2010), se generó 252,5 millones de toneladas de emisiones de CO₂ en promedio durante el período 2005-2008 (Ecofys 2009). Además, el uso del carbón como el principal combustible para la producción de hierro y acero es una de las principales razones por las que la producción siderúrgica tenga el CO₂ más elevado respecto a cualquier industria. La mayoría de las emisiones directas generadas se deben al consumo de carbón, como principal combustible, para la producción de hierro y acero junto con otros recursos energéticos que son entrada clave en el proceso productivo, lo que significa que el aumento de la eficiencia energética es la manera más efectiva en

términos de costes para mejorar el impacto ambiental (APP 2008). El CO₂ de la industria global siderúrgica ha llegado a cerca de dos billones de toneladas al año, lo que representa aproximadamente el 5 % de las emisiones globales de CO₂ antropogénicas (APP 2007) y cada tonelada de acero producido emite 1,9 toneladas de CO₂ (Zhang y Zhou 2009). La recuperación de calor residual en la industria siderúrgica tiende a ser más frecuente en los países con altos precios de la energía, utilizándose ese calor residual para la generación de energía (IEA 2007). Las propiedades del calor residual (es decir, temperatura, composición, contenido de energía y accesibilidad) varían significativamente y dependen del proceso industrial en el que se originan (ITP 2006).

Se espera que la demanda mundial de acero anual pase de aproximadamente 1.410 Mt de acero bruto en 2010 (USGS 2012) a aproximadamente 2.200 Mt en 2050 (Bellevrat y Menanteau 2008). La mayor parte de este crecimiento tendrá lugar en China, India y otros países en desarrollo de Asia (Figura 1.4). Este aumento significativo en el consumo de acero y de producción, impulsará un aumento significativo en el uso de la energía y de las emisiones absolutas de CO₂ de la industria siderúrgica.

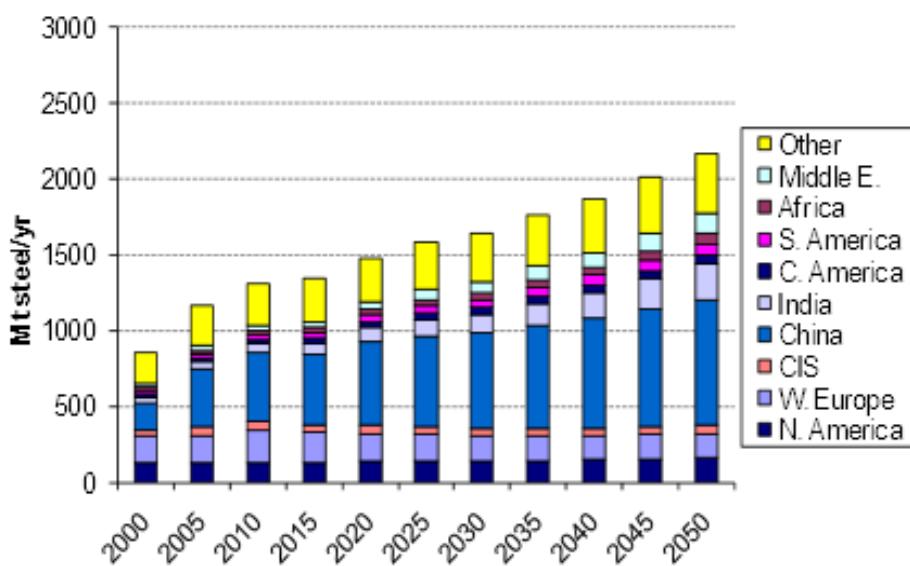


Figura 1.4. Perspectivas de consumo mundial de acero por regiones (Gielen y Podkanski 2006)

1.2 Antecedentes

La eficiencia energética es una de las maneras más fáciles y eficaces para luchar contra el cambio climático, limpiar el aire que se respira, mejorar la competitividad de las empresas y reducir los costes de energía para los consumidores.

En la última década se han realizado estudios proponiendo soluciones para la recuperación de la energía residual y, por tanto la eficiencia y ahorro energético en industrias de energía intensiva con procesos continuos. Se destacan trabajos como los realizados por el Departamento de Energía de EE.UU. para desarrollar nuevas tecnologías de eficiencia energética, así como la eficiencia de las tecnologías actuales en el mercado, como se muestra en un extenso análisis del estado del arte de las tecnologías limpias para la industria siderúrgica (APP 2007) que ha sido un punto de partida para la realización de la presente Tesis Doctoral. En la actualidad se están emprendiendo numerosos estudios con medidas de eficiencia energética en las grandes industrias consumidoras de energía, tanto a nivel institucional, como por ejemplo el *Industrial Technologies Program* norteamericano (ITP 2005; ITP 2006; ITP 2008), como por parte de grupos de investigación y academia. Entre estos se encuentran estudios para procesos específicos de determinados tipos de industria, como la del cemento (Worrel y Galitsky 2008; Worrell et al. 2008c; Hoenig y Twigg 2009), la del aluminio (Balomenos 2009), la del vidrio (Worrell et al. 2008b) o, por supuesto, la siderúrgica (Eppich y Naranjo 2007; Fernández et al. 2009) pero también estudios genéricos para industrias de proceso continuo de gran consumo energético (Worrell et al. 2008d; Chan 2010; Glatt 2010).

Teniéndose en cuenta los datos mostrados en el punto 1.1, se ha optado por analizar más en detalle el importante sector industrial siderúrgico, en el que ya ha habido varios estudios para diferentes regiones del mundo que han abordado los problemas de necesidad de reducir las emisiones de CO₂ (Hayashi y Krey 2007; Wang et al. 2007; Xu y Cang 2010; Tanaka 2012) y, en general, de mejorar la eficiencia energética. Para ello se han considerado tanto pautas y medidas tecnológicas de carácter genérico

(Schumacher y Sands 2007; Zhang y Wang 2007; Guo y Fu 2009; Ammar et al. 2012; Matsuda et al. 2012) como acciones específicas para algunos procesos concretos (por ejemplo Álvarez et al. 2012 sobre el aprovechamiento de calor residual de escorias, Tarrés et al. 2014 sobre el aprovechamiento de calor residual de procesos de laminación en caliente, Okazaki y Yamaguchi 2011 sobre varios procesos siderúrgicos).

La naturaleza de la industria del acero ofrece al sector atractivas oportunidades para reducir las emisiones y aumentar la eficiencia energética. Por un lado, el acero es totalmente recicitable. Al final de su vida útil, los productos que contienen acero se pueden convertir de “nuevo” en acero, preparados para otras aplicaciones. Por otra parte, el proceso de producción de acero puede utilizar los desechos y subproductos como agentes reductores y materias primas alternativas, lo que a su vez, reduce la contaminación del aire y el uso de combustibles fósiles.

Como ejemplo, en 2005, casi el 43 % de la producción mundial de acero crudo llegó a partir de acero reciclado (APP 2008). Sin embargo, ese porcentaje varía considerablemente entre productos y países. Las economías desarrolladas han establecido procesos de reciclaje y disponibilidad de chatarra de acero que puede no existir en otros países. La producción de acero también genera grandes cantidades de residuos (sólidos y también gaseosos), lo que abre oportunidades significativas para aprovechar ese tipo de residuos por otras industrias, pudiendo establecerse vínculos intersectoriales. Por ejemplo, las escorias se pueden procesar para componentes de materiales de construcción, como el cemento y los áridos, proporcionando una importante contribución al medio ambiente al reducir las emisiones de CO₂ y la necesidad de materias primas vírgenes. De hecho, de acuerdo con el *Asia-Pacific Partnership* sobre clima y desarrollo limpio (APP 2008), las principales áreas de actuación para la reducción de emisiones y la conservación de energía son: materias primas, procesos de alto consumo energético, residuos, reciclaje y reutilización de materiales.

A partir de comparaciones entre países de industrias siderúrgicas con distintos grados de implantación de tecnologías eficientes, se puede estimar el potencial para mejorar la

eficiencia energética en la industria siderúrgica global. En concreto, bajo un nivel de producción mundial equivalente al del primer semestre de 2006 antes de la crisis bancaria, que es comparable al actual con 125 Mt de producción de acero crudo en febrero de este año (World Steel 2014), el potencial de ahorro energético se estima entre 2,3 y 2,9 EJ de energía primaria por año, con una reducción de emisiones de CO₂ de 220 a 270 Mt (IEA 2007). Además, fuera de la industria siderúrgica, esas tecnologías de eficiencia energética también pueden dar lugar a un muy importante ahorro de consumo energético y de emisiones. Por ejemplo, la recuperación y aprovechamiento de chatarra podría suponer hasta 0,5 EJ por año (IEA 2007). Aunque los datos disponibles son dispersos y sujetos a una alta incertidumbre, se estima que anualmente se podrían ahorrar hasta 5 EJ de energía primaria y 360 Mt en emisiones de CO₂ (IEA 2007). Naturalmente, algunas opciones tecnológicas, tales como el enfriamiento de coque en seco o las turbinas de gas para recuperación energética de gas de alto horno, pueden suponer una inversión elevada. Así pues, los beneficios en ahorro energético y en emisión de CO₂ han de contemplarse frente a los costes tecnológicos y a los beneficios globales del proceso productivo. En concreto la rentabilidad de estas opciones puede depender de los precios de las energías locales.

Otras cuestiones que se deben tomar en consideración son los diferentes tipos de productos de acero terminados que se han de fabricar (de Abajo et al. 2004), la variabilidad en la calidad de la materia prima y la disponibilidad de chatarra de acero. Además, se tiene una notable complicación adicional con los distintos flujos de energía y de materiales de los productos básicos que pueden tener lugar involucrando compras y ventas a terceros agentes tanto de energía como de materiales. Como consecuencia, desde un punto de vista meramente económico el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en la cadena completa de producción pueden resultar ser considerablemente mayores o menores que las sugeridas por la planta industrial (IEA 2007), es decir, se pueden derivar resultados engañosos. Estos flujos incluyen por un lado la posible compra de pellets, coque, oxígeno, cal, vapor y electricidad y, por otro lado, la venta de subproductos de coque, escoria de alto horno, escoria de acería, gas de alto horno, electricidad y calor residual.

Ante la necesidad de nuevas tecnologías en la fabricación de acero que permitan mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂, la asociación *World Steel* lanzó en 2003 el Programa Siderúrgico Mundial de Coordinación de Innovaciones en CO₂ (World Steel 2009b). La fabricación de acero en altos hornos a base de mineral tiene una mayor intensidad de CO₂ por tonelada de acero producido que la de la ruta del EAF (*electric arc furnace*), por lo que la atención del proyecto se centra primero en el proceso del alto horno. Esta es la mayor coordinación en un proyecto colaborativo de I+D+i emprendida por la industria siderúrgica mundial, pues involucra a los EE.UU (el Iron and Steel Institute americano), Canadá (la Asociación de Productores de Acero canadiense), América del Sur (ArcelorMittal Brasil), Japón (Federación Siderúrgica Japonesa), Corea (POSCO), China (Baosteel), Taiwán (China Steel), Australia (Bluescope Steel/One Steel bajo la coordinación de CSIRO) y también a la UE (World Steel 2009b). Concretamente en la UE se tiene en desarrollo (2004 a 2015) el proyecto ULCOS (fabricación de acero ultra-bajas emisiones de CO₂) por parte de un consorcio de 48 empresas y organizaciones europeas de 15 países, con un presupuesto de 1.000 millones de euros.

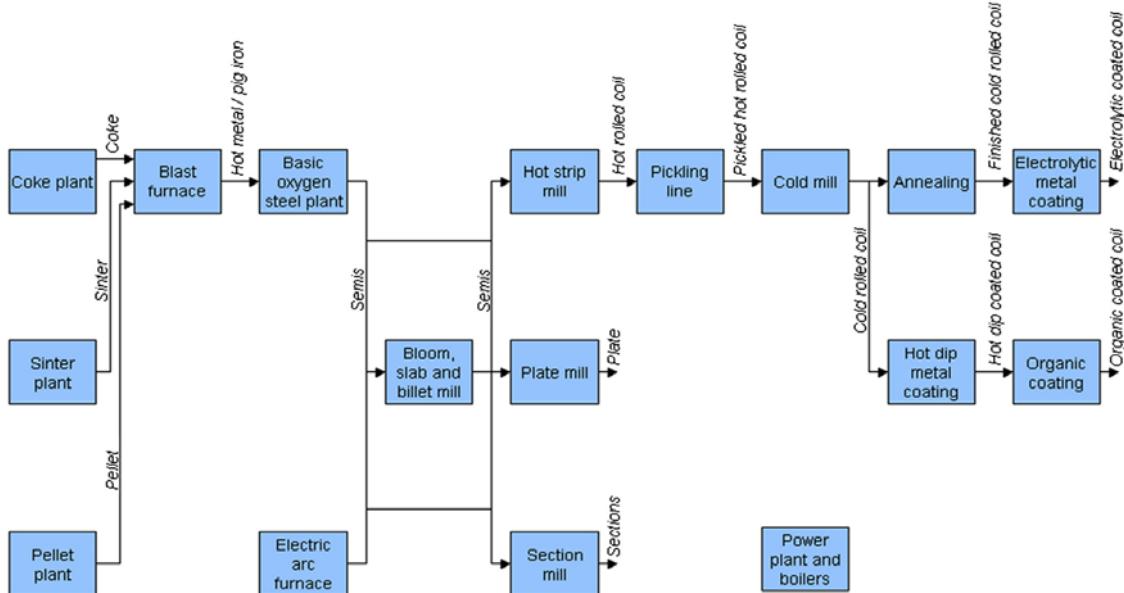


Figura 1.5. Vías actuales de producción siderúrgica en Europa (Pardo et al. 2012)

En la industria siderúrgica europea existe un número limitado de procesos que se utilizan en la fabricación del acero (World Steel 2009c), según se resumen en la Figura 1.5, muchos de los cuales pueden dar lugar a actuaciones de ahorro energético y de emisión de CO₂ significativas. Por ejemplo, en el sínter los gases de escape desde el lecho del sinterizado se pueden recircular de nuevo al lecho, para así reducir el consumo de energía por ahorro en el uso de coque. También es posible usar un sistema de refrigeración de mineral sinterizado para generar vapor a través del aire residual recuperado. Por otro lado, al final del proceso de producción de coque se puede utilizar la tecnología de enfriamiento seco de coque (*Coke Dry Quenching*), en el que la energía recuperada por el gas se usa para generar vapor de alta presión que a su vez se puede emplear para producir electricidad o para otros procesos internos.

En el alto horno, los gases presurizados de la zona superior se pueden captar y circular a través de una turbina de gas (*Top-Pressure Recovery Turbine*) para producir electricidad adicional. En los calentadores también se puede recuperar el calor de gases residuales mediante un intercambiador de calor externo, a fin de precalentar el gas del alto horno o el aire de combustión. En el BOF (*Basic Oxigen Furnace*) se puede usar una caldera de recuperación de calor residual de los gases resultantes, como paso previo a su posible limpiado, enfriado y almacenado en depósito para otros usos. También en el EAF se puede recuperar el calor residual de horno para el precalentamiento de la chatarra entrante, reduciéndose así el consumo de energía (VDEh 2009).

La recuperación de calor residual también puede tener usos en aplicaciones externas a la propia planta industrial. Un caso muy notable es el del *District Heating* (DH) o calefacción urbana, que es una forma cómoda y sostenible de obtener calefacción y agua caliente a partir del calor residual o excedente de diferentes tipos de procesos industriales (figura 1.6), si bien el DH también puede hacer uso de muchos tipos de energías renovables (biomasa, geotérmica, solar térmica). Básicamente, el calor reciclado se utiliza para calentar agua que se transporta a los clientes a través de una red de tuberías bien aislada. El DH puede servir a edificios residenciales, públicos y

comerciales, pero también satisfacer a las demandas industriales de calor de baja temperatura.

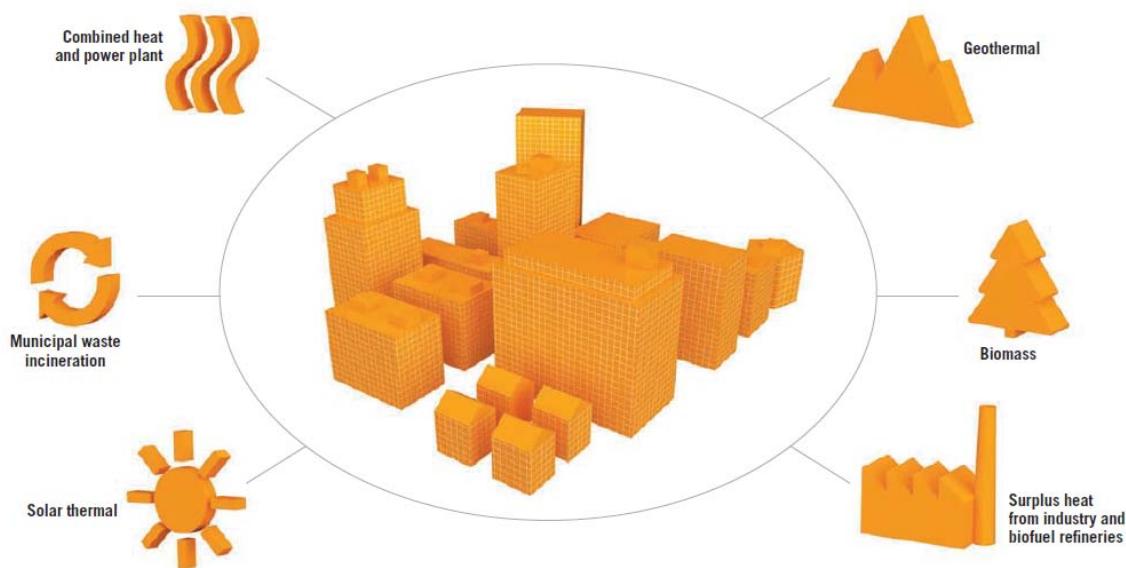


Figura 1.6. Fuentes para el *District Heating* (Euroheat & Power 2014)

Entre los trabajos recientes más relevantes en relación con los objetivos del proyecto merece mencionarse el llevado a cabo por Okazaki y Yamaguchi (2011), quienes exploraron la efectividad en la difusión tecnológica y transferencia basada en la experiencia del sector siderúrgico. Se destaca en el estudio la cooperación clave entre sectores. Sus principales conclusiones se refieren a las barreras económicas, tecnológicas y de normativas que rodean al sector del acero, mostrándose que los enfoques voluntarios del sector pueden tener resultados efectivos en la eficiencia energética y en la reducción de las emisiones de CO₂.

Bajo el punto de vista de una instalación concreta, Álvarez et al. (2012) revisaron el potencial energético de la escoria en el proceso siderúrgico (producida en el alto horno, BOF y EAF) y propusieron un proceso de recuperación de calor basado en un ciclo de vapor de Rankine para producir electricidad en una turbina en las instalaciones de ArcelorMittal en Asturias. La instalación puede producir entre 5,7 a 8,7 MW de potencia eléctrica. Y basándose en un estudio de viabilidad, se concluyó que inversiones

bajas de 2.300 €/MW son económicamente viables y pueden resultar más interesantes que otras tecnologías de recuperación de mayor potencial pero también más costosas.

Otro trabajo notorio ha sido el de Tarrés et al. (2014), quienes se marcaron como objetivo obtener el potencial de recuperación de calor por radiación en un lecho de enfriamiento. A través de simulaciones numéricas del flujo de calor y validadas posteriormente por medidas experimentales, se pudo plantear una prueba piloto para recuperar calor con unos paneles solares modificados y pintados con pintura de absorción. Como resultado más destacado, se tiene la posibilidad de recuperar 1 kW/m^2 con una temperatura de 70 °C y con una eficiencia energética del 40 %.

1.3 Objetivos

Como se ha indicado, el aprovechamiento de la energía residual en las industrias de proceso continuo presenta un elevado potencial de ahorro energético, pese a lo cual hasta fechas recientes las tecnologías que pueden tratar esa energía residual han tenido una implantación más bien limitada. Esto se ha debido por un lado a la baja relación beneficio/costes de inversión y, sobre todo, a la dificultad para prever las características reales de operación de los nuevos sistemas, es decir, a la posibilidad de que las medidas adoptadas puedan afectar negativamente el modo de operación o las necesidades de mantenimiento de un determinado proceso. Se hace pues conveniente la propuesta de nuevos sistemas de aprovechamiento de energía residual con un planteamiento más fiable, de modo que afecten en la menor medida posible a los procesos básicos de producción. Ello se puede conseguir mediante el traslado de tecnologías que ya hayan sido contrastadas aunque no necesariamente en el mismo tipo de industria o proceso, y por otro lado, mediante el uso de herramientas apropiadas de cálculo o simulación.

Por ello, el objetivo genérico de esta Tesis ha sido estudiar las posibilidades de recuperación de energía residual en industrias de proceso continuo de la región

asturiana, en particular de la industria siderúrgica. De forma más concreta, se propusieron los siguientes objetivos específicos:

- I. Análisis cualitativo y estudio comparado de distintos tipos de tecnologías y estrategias encaminadas al aprovechamiento de energía residual que ya tengan implantación en algún tipo concreto de industrias de proceso continuo, a fin de establecer posibilidades de sinergias e identificar y proponer oportunidades de aprovechamiento en el ámbito de los procesos siderúrgicos.
- II. Propuesta, análisis y optimización de procedimientos para aprovechamiento energético en procesos de acería, en particular del calor residual de productos sólidos semiacabados (slabs).
- III. Propuesta, análisis y viabilidad de una instalación de baja interferencia con los procesos de acería para el aprovechamiento de calor residual sobre una aplicación de *district heating*.

Para llevar a cabo estos objetivos se plantearon las siguientes líneas metodológicas:

1. Búsqueda bibliográfica sobre tecnologías y aplicaciones actuales sobre procesos *Waste-to-Energy* (WtE) en la industria y análisis sistemático a la luz de sus características potenciales para i) la conversión y ahorro energético (métodos de refrigeración por absorción, adsorción, termoeléctrico, termoiónico); ii) la recuperación de calor (ahorro de energía en el consumo del combustible del horno); iii) la generación de electricidad (combinación de producción de calor y electricidad); iv) el transporte de combustibles; v) el almacenamiento de energía y combustible; vi) las emisiones medioambientales; y vii) la gestión de reciclaje.
2. Propuesta de sistemas para aprovechamiento de calor residual en los entornos seleccionados del proceso del enfriamiento de slabs de acería, incluyendo análisis de los fenómenos relevantes de transferencia de masa y calor y la optimización de parámetros de diseño mediante simulaciones CFD de los dominios de interés. En concreto se planteó la utilización del software Fluent.

1.4 Publicaciones derivadas y justificación de la unidad temática

La presente Tesis Doctoral ha dado lugar a los siguientes tres artículos publicados en revistas científicas indexadas en el Journal of Citation Reports del Science Citation Index (ver apartado 6):

- I. Villar A, Arribas JJ, Parrondo J (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technologies and Environmental Policy* 14:29-39. DOI: 10.1007/s10098-011-0385-x.
- II. Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2014). Waste heat recovery technology in continuous casting process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI: 10.1007/s10098-014-0801-0.
- III. Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2014). District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain). *Environmental Progress and Sustainable Energy*. DOI: 10.1002/ep.11883.

Estos tres artículos constituyen una unidad temática que engloba los trabajos desarrollados a lo largo de la Tesis así como los tres objetivos propuestos, según se indica a continuación:

Artículo I: presenta un análisis novedoso en el que se comparan un buen número de tecnologías en uso o propuestas en la literatura sobre distintos tipos de industrias de proceso continuo, atendiendo a distintos criterios, a fin de establecer sinergias entre procesos. Como resultado se han propuesto posibles transferencias de tecnologías entre algunos tipos de industria. Este artículo se corresponde al primer objetivo planteado para la Tesis.

Artículo II: tras contemplar posibles técnicas de aprovechamiento de energía residual en la industria siderúrgica, concretamente en los procesos de acería, para este segundo artículo se planteó el aprovechamiento del calor emitido desde los slabs procedentes de la colada continua. Para ello se propuso la disposición de un escudo térmico a lo largo del recorrido de los slabs, con transferencia de calor a conductos de agua. El sistema fue

objeto de simulación CFD mediante el software Fluent, a fin de determinar los parámetros de diseño más convenientes. Este artículo se corresponde al segundo objetivo planteado para la Tesis.

Artículo III: de modo similar al caso del segundo artículo, se plantearon posibles sinergias para el aprovechamiento de energía residual de slabs procedentes de colada continua, pero ahora se buscó por un lado la mínima interacción posible con los procesos de producción de la acería, y, por otro, se analizó como aplicación su uso en un *district heating*, en la ciudad de Avilés. En concreto se estudió el aprovechamiento del calor residual de los slabs apilados en naves de enfriamiento mediante extracción de aire caliente por campana, combinado con sistemas de intercambio y distribución a consumidores de calefacción y ACS. También se empleó el software Fluent para definir los parámetros de diseño más convenientes. Este artículo se corresponde a los objetivos segundo y tercero planteados para la Tesis.

2. Resultados

2.1 Comparación entre Tecnologías para Recuperación de Energías Residuales en Industrias de Proceso Continuo

2.1.1 Industria siderúrgica

La industria siderúrgica se enfrenta a una serie de problemas ambientales que están fundamentalmente relacionados con los altos requerimientos de energía, uso de materiales y subproductos asociados a la generación de enormes cantidades de acero (Manning & Fruehan 2001).

La figura 2.1 presenta un esquema del estado del arte actual de las tecnologías WtE en la industria siderúrgica recogido de la Asociación de Asia y el Pacífico (2007) y ArcelorMittal (2011).

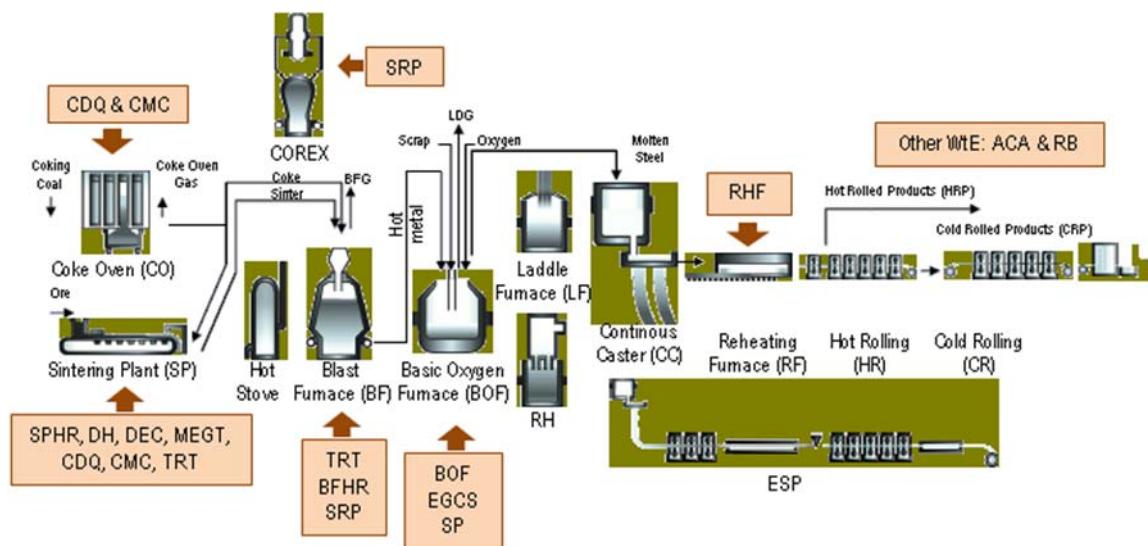


Figura 2.1. Actuales tecnologías WtE en los procesos de producción siderúrgicos

La tabla 2.1 describe las tecnologías WtE (mostradas en la figura 2.1), en el proceso involucrado, usos típicos y los factores clave (ahorro de energía, emisiones medioambientales, estado comercial y otros beneficios). Fundamentalmente, los datos han sido recogidos en el informe *Asia Pacific Partnership* (2008).

Tabla 2.1. Matriz de tecnologías WtE, usos y beneficios en la industria siderúrgica

Tecnología WtE	Proceso Siderúrgico	Usos Típicos	Factores Claves
Recuperación de calor residual en la planta del Sinter (SPHR)	Sinterización	Precalentar el aire de combustión para los quemadores y generar vapor de alta presión.	Ahorro de combustible en vapor y coque, con un mayor uso de la electricidad. Reducción de las emisiones (NOx, SOx, polvo), coque y recuperación del calor de escape. Estatus comercial: maduro.
Calefacción urbana (DH)	Sinterización	Calor residual de la industria siderúrgica para usar en los edificios residenciales y comerciales cercanos.	Método para el ahorro de energía. Calor a baja temperatura y calor residual. Beneficios económicos y una gran reducción de las necesidades totales de combustible. Estatus comercial: maduro.
Control de las emisiones de polvo (DEC)	Sinterización	Mediante el envío de los residuos de gases de escape a los precipitadores electrostáticos (ESP) que producen gases residuales limpios e incrementan la cantidad de recuperación de vapor.	Más de 98 % de eficiencia, la reducción de la carga de polvo en el gas de escape de una planta típica de 3.000 mg/m ³ a alrededor de 50 mg/m ³ . Eliminación del polvo fino puede en el ESP reduce los niveles de emisión de partículas en las plantas de sinterización de aproximadamente 50 a 150 mg/m ³ . ESP causa un aumento del consumo de energía de alrededor de 0,002 a 0,003 GJ/t de sinterizado. Estatus comercial: maduro.

Tecnología WtE	Proceso Siderúrgico	Usos Típicos	Factores Claves
Tratamiento principal de los gases de escape (MEGT)	Sinterización	SOx, NOx, partículas y dioxinas contaminantes son procesados, absorbidos, descompuestos y/o recogidos como subproductos no tóxicos para aumentar la cantidad de recuperación de vapor, y mejorar el ahorro total de combustible.	SOx se absorbe y se recupera como subproducto útil. NOx se descompone en nitrógeno, agua y oxígeno para el amoníaco. El polvo se recoge en coque activado. Las dioxinas se recogen o absorben en el coque activado y se descompone a 400 °C sin oxígeno. Estatus comercial: maduro.
Enfriamiento seco de coque (CDQ)	Sinterización Producción de coque	El calor se utiliza para producir vapor que puede ser utilizado en el propio proceso o para generar electricidad. Recupera el calor sensible del coque. Como tecnología para el control del medio ambiente.	Energía recuperada es de aproximadamente 400 a 500 kg de vapor/t, equivalente a 800-1200 MJ/t coque. Otra estimación de ahorro de energía a través de la generación de vapor (0.48T/T coque). Disminución de polvo, CO ₂ y emisiones de SOx. El aumento de la eficiencia del agua. Producción de coque de mejor calidad, mejora de la resistencia de coque en 4 %. Estatus comercial: maduro.
Control de la humedad del carbón (CMC)	Sinterización Producción de coque	Residuos de calor del gas de horno de coque para secar el carbón utilizado para la producción de coque. El carbón puede ser secado utilizando el contenido de calor del gas de horno de coque o de otras fuentes de calor residual.	Ahorro de combustible de aproximadamente 0,3 GJ/t. Mejora de la calidad del coque (aproximadamente 1,7 %). Aumento de la producción de coque (aproximadamente 10 %). Tiempos de cocción más cortos. Disminución de la contaminación del agua (reducción de amoníaco). Estatus comercial: emergente.
Turbina de recuperación de gas superior (TRT)	Sinterización Producción de hierro	TRT es un sistema de generación de energía, que convierte la energía física de la parte superior del gas de alto horno de alta presión en electricidad mediante el uso de una turbina de expansión.	Genera energía eléctrica de aproximadamente un 40-60 kWh/t de arrabio. Excelente fiabilidad operativa, resistente a la abrasión. Conveniente para los hornos de mayor tamaño y gases de temperaturas más altas en comparación con los sistemas de filtrado de bolsa. Estatus comercial: maduro.

Tecnología WtE	Proceso Siderúrgico	Usos Típicos	Factores Claves
Recuperación de calor de horno alto (BFHR)	Producción de hierro	Sistemas de recuperación, por ejemplo, HBS (recuperadores de calor de alto horno), Sistema de precalentamiento BFG (gas de alto horno), etc, se utilizan para calentar el aire de combustión del horno alto. La temperatura de salida de los gases de combustión, aproximadamente 250 °C, se puede recuperar para precalentar el aire de combustión de los calentadores.	Ahorro de combustible en los recuperadores de calor de alto horno varían entre 80-85 MJ/t. Sistema de precalentamiento BFG tiene una recuperación económica en el grado de baja a media temperatura. Ahorro de energía de 3-5 % para la caldera. Estatus comercial: emergente.
Proceso de reducción de fundición (SRP)	Producción de hierro	El exceso de gas producido se utiliza para la generación de energía, la producción de hierro de reducción directa (una alternativa para la entrada de hierro para la chatarra), o como gas combustible. Procesos de reducción de fusión, incluida Aumelt Ausiron ®, HiSmelt ®, CCF, DIOS y COREX, implican la pre-reducción del mineral de hierro por los gases procedentes de un baño caliente.	Poca inversión y costes operativos. Horno Individual con recuperación directa de energía residual. Bajo impacto ambiental (reducción de CO ₂ , SO ₂ y NO _x). El reciclaje de polvos y escorias de acería, haciendo un uso eficaz de la energía del carbón. Estatus comercial: emergente.
Horno de oxígeno básico (BOF)	Producción de acero	El calor sensible del gas de escape se recupera primero en una caldera de calor residual, generando vapor de alta presión. El gas se limpia y se recupera.	Los ahorros de energía varían entre los 535 y 916 de acero MJ/t, depende de la manera en la que se recupera el vapor; con un aumento de potencia de 2 kWh/t el ahorro total de energía primaria es del 136 %. Estatus comercial: maduro.
Sistema de refrigeración de los gases de escape (EGCS)	Producción de acero	Recupera el calor latente y sensible de gas en forma de vapor a través del intercambio de calor. Tratamiento de gases de escape se compone de un sistema de refrigeración de los gases de escape y un sistema de limpieza.	Hay dos tipos de calderas de recuperación de vapor, una caldera completa equipada con un sobrecalentador y economizador de carbón, y la mitad de una caldera sin estos equipos. Existen varios tipos de máquinas de eliminación de polvo, como precipitadores eléctricos (que son el tipo más popular, además del tipo húmedo y seco), lavadores Venturi y filtros de mangas. Estatus comercial: maduro.

Tecnología WtE	Proceso Siderúrgico	Usos Típicos	Factores Claves
Precalentamiento de chatarra (SP)	Producción de acero	<p>Reducir el consumo de energía de hornos eléctricos de arco (EAF) a través del uso del calor residual del horno para precalentar la carga de chatarra.</p> <p>Varios sistemas se han desarrollado y están en uso en varios lugares en los EE.UU. y Europa, como, túnel Consteel de tipo precalentador, Eje Fuchs Finger, y doble eje Fuchs.</p>	<p>Proceso Consteel. Aumento de la productividad del 33 %. Reducción del consumo de electrodos de 40 % y las emisiones de polvo.</p> <p>Estatus comercial: maduro.</p> <p>Hornos eje Fusch. Ahorros de electricidad de 120 kWh/t y aumento de combustible 0,7 GJ/t. Hasta un 20 % de aumento de la productividad. Se reduce un 25 % las emisiones de polvo en los gases de combustión (reducción de los costes de manejo de residuos peligrosos).</p> <p>Estatus comercial: maduro.</p>
Horno de solera rotatorio (RHF)	Sistema común	Reciclaje de polvo en el horno de solera giratoria (RHF).	Pellets DRI (hierro de reducción directa) a partir del polvo y los lodos con un 70 % de metalización y son lo suficientemente fuertes como para ser reciclados en los altos hornos.
Sistema de reciclado de polvo		El zinc y otras impurezas en el polvo y lodo son extraídos y agotados en gas.	<p>La reducción de residuos y la disminución de los costes de eliminación.</p> <p>Recuperación de recursos no utilizados (reciclaje de hierro, níquel, zinc, carbono, etc).</p> <p>Estatus comercial: emergente.</p>
Absorción de carbon activado (ACA)	Sistema común	Retira las altas concentraciones de contaminantes.	<p>Elimina el color amarillo-marrón de las aguas residuales de coque.</p> <p>Significativa reducción de COD (Demanda Química de Oxígeno) de la planta de tratamiento secundario de aguas residuales por debajo de 5 mg/l.</p> <p>Eliminación de metales pesados.</p> <p>Estatus comercial: maduro.</p>
Quemador regenerativo (RB)	Sistema común	Recupera el calor residual de los gases de escape del horno para calentar el aire de combustión del horno.	20-50 % de posible reducción de energía, dependiendo de los tipos de horno y combustible, se pueden reducir hasta un 50 % de NO _x , con combustión a alta temperatura.
			Estatus comercial: maduro.

2.1.2 Industria del cemento

La producción de cemento implica cuatro pasos principales: preparación de una mezcla de material, formación térmica de clínker en el horno de cemento, refrigeración de clínker y, finalmente, molienda y mezcla con aditivos a la calidad del cemento requerido (Bolwerk 2005). Los hornos de proceso en seco producen casi el 80 % del cemento fabricado en Europa (EHS 2007). La tabla 2.2 presenta las tecnologías WtE particulares en la industria del cemento y, que se han obtenido principalmente de la Agencia Internacional de la Energía (2009b).

Tabla 2.2. Resumen de las tecnologías WtE en la industria del cemento

Tecnología WtE	Proceso Cemento	Usos Típicos	Factores Claves
Ciclón multietapas como Precalentador (PH) & Precalcinador (PC)	Producción en seco	El calor producido por el horno para precalentar las materias primas a medida que avanzan a través de las diversas etapas de las torres de precalentamiento.	Combustible más eficientes, hasta un 50 % menos de energía, que los hornos largos utilizados. El consumo más bajo de calor (debido a la alta recuperación de calor de los gases del horno en los ciclones, y las bajas pérdidas de calor en el horno). Mayor capacidad de producción (EHS 2007). Comparando con un horno húmedo no hay evaporación de agua (EHS 2007).
Recuperación de calor residual (WHR)	Producción en seco	Recuperación de calor residual que fue descargado sin utilizar en gases residuales, y se utiliza en una turbina de vapor para convertir la energía en electricidad. El precalentamiento del aire de combustión en el refrigerador, mientras que al mismo tiempo enfriamiento del clínker, y mediante el uso de la energía de los gases de escape, después del horno rotatorio, para la calcinación y el precalentamiento de la harina cruda en el calcinador y el precalentador (Bolwerk 2005).	No se requiere ningún combustible añadido, por lo que la generación es más limpia y funciona con un menor coste. El calor residual recuperable (1.000 t/día de capacidad de clínker) de diversas corrientes puede ser (AIT 1997): <ul style="list-style-type: none">• El gas de derivación: 120-241 MJ/t de clínker• El gas de escape en el precalentador de ciclón: 388-457 MJ/t de clínker• Gases de escape en el enfriador del clínker: 345-457 MJ/t de clínker

Tecnología WtE	Proceso Cemento	Usos Típicos	Factores Claves
Enfriador de parrilla (GC)	Enfriamiento del clínker	Un exceso de aire de refrigeración calentado se recircula de vuelta al horno de PH o PC (ETSAP 2010).	Eficiencia de 70-75 %. El consumo de electricidad oscila de 4 a 8 kWh/t de clínker. Económicamente rentable, durante su vida útil, para más de 10 años (ETSAP 2010). Estatus comercial: maduro.

2.1.3 Industria de producción primaria de aluminio

Más de la mitad de la energía utilizada en los metales no ferrosos es para la producción de aluminio primario (IEA 2007). El aluminio es el tercer elemento más abundante (después del oxígeno y silicio) y representa el 8 % de la corteza terrestre (Balomenos et al. 2009). Debido a su reactividad química, el aluminio nunca se encuentra en la naturaleza como un elemento aislado, sino siempre en su forma oxidada como un componente de una variedad de minerales. Las etapas de producción primaria de aluminio son: la minería de bauxita, producción de alúmina a partir de bauxita, producción de ánodos de carbón, electrólisis y laminación. La electrólisis es el paso que más energía consume en la producción de aluminio (IEA 2007) y es responsable de la generación de grandes cantidades de CO₂ (Balomenos et al. 2009). Las tecnologías más prominentes de WtE se resumen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Tecnologías WtE en la industria de producción primaria de aluminio

Tecnología WtE	Proceso Aluminio Primario	Usos Típicos	Factores Claves
Hall-Héroult (HH)	Electrólisis	Los sistemas conversión de alta intensidad de energía. Tecnología de precocido en el punto de suministro (IEA 2007).	El consumo de electricidad en el precocido está en el rango de 13 - 16,5 kWh/kg. Diferencia en la eficiencia de un 20 % atribuida a diferentes tipos de células (IEA 2007). Estatus comercial: maduro. La nueva tecnología del ánodo inerte (precocido ánodo o PBANOD) mejoraría (Luo y Soria 2007): Eficiencia energética 10 - 25 % y disponibilidad para el año 2020.

Tecnología WtE	Proceso Aluminio Primario	Usos Típicos	Factores Claves
Horno de reverbero (RF)	Aleación y fundición	Captura el calor residual en el gas de la chimenea para precalentar los materiales entrantes. El calor se transfiere al metal fundido por convección y radiación (EERE 2007).	Aumenta la eficiencia energética y reduce el tiempo requerido para fundir el metal. Calor residual recuperado se puede utilizar para precalentar el aire de combustión y la cogeneración. Reduce el consumo de combustible a menos de 0,57 kWh/kg de aluminio (EERE 2007).

2.1.4 Industria de fundición de metales

La industria de la fundición de metales produce componentes, simples y complejos, que satisfacen a una amplia variedad de necesidades de fabricación. Las fundiciones de metales varían en tamaño desde pequeños talleres de trabajo hasta grandes plantas de fabricación que producen miles de toneladas de piezas fundidas cada día (ITP 2005). Los productos de metal fundido se encuentran en el 90 % de los bienes y equipos fabricados, desde componentes críticos para aviones, automóviles, equipos de defensa a equipos de generación de energía, maquinaria industrial y materiales de construcción (Eppich y Naranjo 2007).

El proceso más común que se utiliza para la fundición es el moldeo de arena húmeda, que representa aproximadamente el 60 % de las piezas moldeadas producidas. Los principales procesos que consumen energía en la fundición de metales incluyen metales de fusión (alrededor del 55 % del consumo de energía), fabricación de machos, tratamiento térmico y operaciones posteriores a la colada (Eppich y Naranjo 2007). La generación de residuos está directamente relacionada con el tipo de material fundido (hierro fundido, acero, latón/bronce, o de aluminio) (ITP 2005). En la tabla 2.4 se muestra la información recogida del Programa de Tecnologías Industriales (2005).

Tabla 2.4. Tecnologías WtE en el proceso de fundición de metales

Tecnología WtE	Proceso Fundición de Metal	Usos Típicos	Factores Claves
Horno de cúpula (CP)	Fundición	Fusión de hierro fundido, debido a las gotitas fundidas de metales en contacto directo con el coque y el flujo durante su descenso, la saturación del hierro líquido con carbón y refinado del producto metálico.	La eficiencia energética desde 40 % a más del 70 %. Chorro de aire de precalentamiento ahorra energía con sistemas de combustión eficientes de gas. Recuperadores de calor residual precalientan el aire caliente hasta 650 °C. Quemadores de oxígeno-combustible aumentan la eficiencia energética con sistemas de inyección de polvo y proporcionan un método de reciclaje residuos generados en planta (polvo cúpula, polvo de acabado, y polvo de recuperación de arena).
Horno chimenea (SF)	Fundición	Los gases de combustión para precalentar los materiales de carga.	Los gases de escape calientes precalientan la carga entrante, mejorando la eficiencia energética del horno de 40 a 50 %. SF tiene un control de gas residual y una zona de precalentamiento.
Sistema de Fundición recuperación de calor (HRS)	Fundición	La transferencia de energía térmica, a partir de la corriente de efluente, de alta temperatura a un flujo de entrada de menor temperatura (aire de complemento o carga de metal).	Métodos de conversión de calor residual, como refrigeración por absorción, termoeléctrica y termoiónica, utilizan las temperaturas elevadas de los gases de combustión para conducir los dispositivos de conversión de energía. Esta WtE se reutiliza, se ahorra hasta un 20 % de los costes de energía y reduce las emisiones.
Sistema precalentamiento (PS)	Fundición	Chatarra de precalentamiento para la segunda carga de calor o la primera parte del siguiente calentamiento. Tecnología de hornos de eje y sistema de doble carcasa.	Precalentamiento de chatarra para reducir la energía de fundición (hasta 50-75 kWh/t) y la energía eléctrica de 30 a 60 kWh/t.

2.1.5 Industria del vidrio

La industria del vidrio se compone de cinco segmentos: vidrio plano, envases de vidrio, prensado y vidrio soplado, fibra de vidrio de lana y productos de vidrio comprado.

Aproximadamente, el 57 % de todo el vidrio fundido se produce por el segmento de envases de vidrio. La fundición de vidrio restante se divide, más o menos, entre los segmentos de vidrio plano (24 %) y prensado y vidrio soplado (19 %) (SOTA 1997).

Más de la mitad del consumo de energía en el proceso de producción del vidrio se corresponde con el proceso de fundición. Los principales pasos de producción comunes a casi todas las plantas de vidrio son: la selección de materias primas, preparación de lotes (pesado y mezclado de las materias primas), fusión y refinado, acondicionamiento y conformación, y posteriores procesamientos - recocido, templado, pulido o revestimiento (IEA 2007). Las tecnologías WtE relacionadas con el proceso del vidrio se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Tecnologías WtE relacionadas con la industria del vidrio

Tecnología WtE	Proceso Vidrio	Usos Típicos	Factores Claves
Horno oxicombustión (OFF)	Fundición	El oxígeno como una manera de aumentar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones.	Reduce las emisiones de NO _x y CO ₂ sustancialmente. Mejora las características de transferencia de calor y la reducción de la volatilización de los vapores alcalinos de fundición de vidrio. (Kobayashi y Van Hassel 2005).
Caldera de recuperación de calor residual (WHRB)	Flotado y envasado	El calor residual de los gases de escape para precalentar las materias primas y los desperdicios de vidrio.	El calor residual recuperado es de aproximadamente 0,28 GJ/t en el que el consumo total de energía del horno es de aproximadamente 3,78 GJ/t. Esto corresponde a un ahorro energético del 7,4 % del consumo de combustible del horno (Wesselink y Deng 2009). Se estima que el 40 % de la capacidad en la producción de envases de vidrio se puede adaptar a sistemas de lotes WHRB para las próximas dos décadas (Wesselink y Deng 2009).

Tecnología WtE	Proceso Vidrio	Usos Típicos	Factores Claves
Horno recuperativo (RF)	Sistema común	Precalentamiento continuo del aire de combustión gracias a los gases residuales.	Intercambiadores de calor metálicos para la recuperación de calor. El exceso de calor en la corriente de gas se puede utilizar para generar vapor en una WHRB. Aumentar la eficiencia global de 50-65 % (Worrell et al. 2008).

2.1.6 Aplicaciones

2.1.6.1 Tecnologías de recuperación de calor residual en industrias de energía intensiva

Entre el 20 y el 50 % del consumo de energía industrial se estima que se pierde en calor residual en forma de gases de escape, agua de refrigeración y pérdidas de calor en las superficies calientes de equipos y productos de calefacción (ITP 2008). De hecho, el calentamiento se considera que es la segunda operación industrial que consume más energía (EERE 2007).

La tabla 2.6 presenta un estado actual de las prácticas WHR en una variedad de aplicaciones en las industrias con alto consumo energético, como se recoge en el Programa Internacional de Tecnologías en la industria de los EE.UU. (2008). Los resultados de esta investigación sirven de base para la comprensión de la situación actual de WHR, en términos de comercialización, viabilidad tecno-económica en la industria de los EE.UU.

Tabla 2.6. WHR en industrias intensivas de energía de los EE.UU. (ITP 2008)

	Iron & Steel										Glass Industry			Cement	Primary Aluminum		Metal Casting	
	Coke Oven		Blast Furnace		BOF	EAF	Glass Melting		Cement Kiln	Hall-Héroult Cells	Melting Furnace	Iron Cupola						
	Coke Oven Gas	Waste Gas	Blast Furnace Gas	Hot Blast Stove Exhaust	Basic Oxygen Furnace Offgas	Electric Arc Furnace Offgas	Gas-fired Melting Furnace	Oxyfuel Melting Furnace										
	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical				Commercial	Technical	Economic	Commercial			
	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical				Commercial	Technical	Economic	Commercial			
	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical				Commercial	Technical	Economic	Commercial			
Regenerator	-	-	-	+	+	+	x	x	x	x	x	x	-	-	-	n n n n		
Recuperator	-	-	-	n	-	-	n	x	x	x	x	x	-	-	-	+ + o + +		
Heat Wheel	-	-	n m	- n	n n	+	+	+	x	x	x	x	o o	- n o	- n n n	- - o + o n n n		
Passive Air Preheater	-	-	-	o o	n n	n n	+	+	x	x	x	x	x n n n	- o	- n n n	- - n n n n n n		
Thermal Medium System	o o	-	n m	- n	n n	+	+	+	n	n	n n	n n	n n n n n n n n	-	-	- n n n n n n n n		
Waste Heat Boiler	-	-	-	-	n	- n	-	o	+	o n	- n o	+	- o	+	- + +	- - n n n n n n		
Low T Power Cycle	-	-	n m	-	n n	-	m	n x	x x	x x	x x	x x	x x o	o	- - x x x n n n	- - x x x n n n		
Solid State Generation	-	-	-	m	-	-	-	m	-	-	-	-	m	- m	- m	- m - m - m - m -		
Load Preheat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	n n n	+ + o		
Process Specific/Other (1)	o o	-	o o	-	o	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+ + +		

(1) "Process Specific" includes coal moisture control for coke-making, dry-type top-pressure recovery turbines for blast furnace, and recovery from cement clinker cooler.

Key:	Commercial Status	Technical Feasibility	Economic Feasibility
	+ Frequently used in US o Limited commercialization - Not deployed	+ No technical barriers o Proven in limited applications m May be feasible, but not demonstrated - Not technically feasible	+ Cost-effective o Application-specific - Cost-prohibitive
	n Not addressed in available literature x Not applicable x Not applicable		

Por último, hay que tener en cuenta nuevas tecnologías que están emergiendo, como las opciones para la recuperación de calor, tales como el ciclo de Kalina para la generación de energía a baja temperatura y los dispositivos termoeléctricos (tecnologías de conversión directa) (ITP 2008).

2.1.6.2 Caso de estudio en el sector siderúrgico

Un caso de estudio para la recuperación de sólidos utilizando técnicas de WHR en un proceso de sinterización, que se muestra (figura 2.2) como un ejemplo práctico de soluciones de eficiencia energética en la industria.

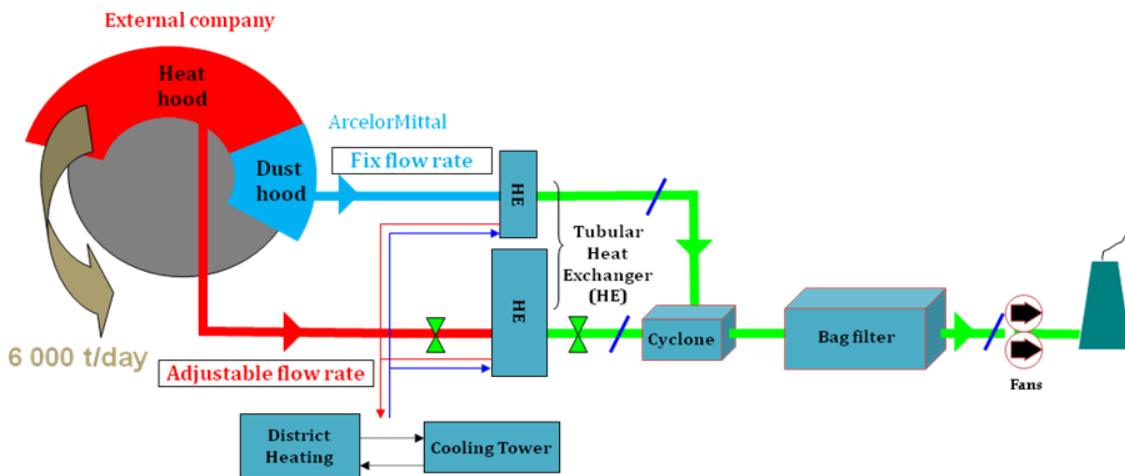


Figura 2.2. Caso de estudio en el sector siderúrgico usando la tecnología WHR
(ArcelorMittal 2010)

Los puntos clave para la recuperación de sólidos son: dos campanas (*hoods*) con dos intercambiadores de calor tubulares de aire/agua (50 % del *sinter cooler* está abierto), un filtro de mangas para la eliminación de polvo del gas y 2 ventiladores. Hay una reducción de 250 t/h de sinterización de 500 °C a 50 °C y una reducción de emisiones de CO₂ del 92 % de polvo difuso (ArcelorMittal 2010).

Una primera conclusión, es que la recuperación de calor se puede utilizar sólo o con eliminación de partículas de polvo, existiendo una buena sinergia entre el enfriador (*sinter cooler*) en la eliminación de polvo y la recuperación de calor. Por otra parte, el calor puede ser utilizado para la calefacción urbana o *district heating*, pero otras aplicaciones son posibles, como el precalentamiento del aire de combustión o mezcla en bruto de sinterizado. Por último, la recuperación de calor conduce a la reducción de emisiones de CO₂.

2.1.6.3 Interacción sinergética entre industrias de proceso continuo

En la tabla 2.7 se describe la interacción entre las industrias de proceso continuo en términos de sinergias (colaboración entre industrias), usos típicos y factores clave.

Tabla 2.7. Interacción sinergética entre industrias de proceso continuo

Sinergia	Industria	Usos típicos	Factores clave
Iron & steel – Escoria del horno alto	Cemento	Alrededor de la mitad de toda la escoria de alto horno ya se utiliza para la fabricación de cemento. El principal objetivo es la sustitución del ingrediente de clíker con menos uso de energía intensiva.	La escoria es refrigerada por agua. Distancias y costes de transporte son aceptables. Si se dispusiera de toda la escoria de alto horno, se produciría una reducción de CO ₂ de aproximadamente 100 millones de toneladas de CO ₂ (IEA 2008a).
Iron & steel – Escoria de acería	Cemento	El CemStar utiliza 15 % de carga de escorias enfriadas por aire en la mezcla de materia prima en el horno rotatorio. El objetivo principal es la sustitución del ingrediente clíker por otros minerales industriales, que consuman menos energía.	Reducción de CO ₂ es aproximadamente 0,47 t/t de escoria de acero añadido. Aplicado con éxito en los Estados Unidos (IEA 2008a).
Iron & steel – Escoria de acería	Fundición metal	La escoria se puede reciclar como suministro para los hornos de cúpula (línea de producción de hierro fundido gris).	La escoria del horno cúpula neutraliza los metales traza de la escoria del horno de inducción. La escoria resultante del horno cúpula se convierte en un desperdicio no peligroso.
Cement – Horno rotatorio	Aluminio primario	El horno puede ser rotatorio (como una fábrica de cemento), o, en las plantas más modernas un horno de lecho fluido.	Reducción de los costes de inversión, debido a un equipamiento más pequeño. El uso de temperaturas más bajas tiene como resultado emisiones de NO _x más bajas y una mayor variedad de combustibles se pueden utilizar, así como un menor consumo de energía.
Vidrio - Tecnología del horno oxicombustión (OFF)	Aluminio primario	El know-how de OFF de la industria del vidrio como una forma de aumentar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones.	Reducir el volumen de los gases residuales y se evita el uso de sistemas de recuperación de calor.
Metal casting – Hornos chimenea	Aluminio primario	Un horno de reverbero modificado donde su eficiencia es mejorada por un mejor sellado del horno y el uso de los gases de combustión para precalentar los materiales de carga.	Mayor eficiencia energética que los hornos de reverbero.

2.1.6.4 Áreas de investigación, desarrollo e innovación de nuevas tecnologías WtE

Se realizaron extensas búsquedas en la literatura para obtener información disponible sobre áreas de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías WtE. EE.UU. aparece como el primer país en cuanto a recursos anuales empleados relativamente en I+D+i y número de científicos e ingenieros por cada millón de personas (WBCSD 2010). De este modo, basándose en el informe del Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (2010), que enumera una amplia gama de tecnologías WtE en procesos industriales continuos, hay dos temas de interés para la I+D+i:

- El primer tema se centra en las reacciones y separaciones industriales relacionadas con: la eliminación avanzada de agua (500 TBtu), procesos industriales con poco uso de agua, separaciones avanzadas de gas (60 TBtu), destilación híbrida (240 TBtu), procesos de conversión de energía intensiva (200 TBtu), y se proyecta en el largo plazo (2030) un ahorro de 1.000 TBtu y 75 MMTCO₂ (Glatt 2010).
- El segundo tema es la minimización y recuperación de calor relacionado con: super caldera (350 TBtu), horno de eficiencia ultra-alta (90 TBtu), sistemas de recuperación de calor residual (260 TBtu) y, se prevé un ahorro en 2030 de 700 TBtu y 50 MMTCO₂ (Glatt 2010).

Finalmente, se proponen tres áreas principales de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de WtE: i) recuperación de calor residual a baja temperatura (generación de vapor, utilización de calor), ii) termoeléctrica de alta eficiencia para la recuperación de calor a baja temperatura y iii) producción combinada de calor y electricidad (CHP): Sistemas de recuperación de calor residual para generar electricidad y calor con una eficiencia mayor de un 80 %.

2.2 Recuperación de Calor Residual de Slabs en el Proceso de Colada Continua

2.2.1 Caso de estudio: proceso de colada continua

La colada continua es un proceso común en la fabricación de acero (figura 2.3). El acero líquido, 1.500 °C – 1.600 °C, se transforma en slabs solidificados y, por lo general, hay dos líneas de colada continua. En primer lugar, una cuchara de colada de acero, que contiene 300 toneladas de acero líquido, coloca la colada en la torreta, que está girada 180 °C para llevar la cuchara en posición de colada. Con la apertura de la tobera en el fondo de la cuchara de acero, el acero fluye en una artesa de 80 toneladas, teniéndose en cuenta que la capacidad de producción anual reportada por la acería LDA de ArcelorMittal en Avilés es de 4,2 millones de toneladas (ArcelorMittal 2009). La artesa de colada tiene dos agujeros roscados, cada uno de ellos conduce a un molde, que determina el tamaño de los desbastes (blooms, slabs). Los slabs es un tipo de lingote que tiene un ancho máximo de 1,80 m y un espesor de 25 cm. Tan pronto como el acero líquido alcanza el molde, se inicia la solidificación. Después de dejar el molde, el desbaste se apoya en una serie de rodillos - agrupados en segmentos y con una distancia de 2 m entre cada rodillo - a través del cual se guía el desbaste. Grandes cantidades de agua pulverizada, entre los rodillos, se utilizan para la refrigeración con el fin de solidificar el desbaste. Los slabs que salen de la máquina de colada continua, se cortan con una longitud máxima de 11,7 m por máquinas de corte de gas natural y de oxígeno a alta presión.

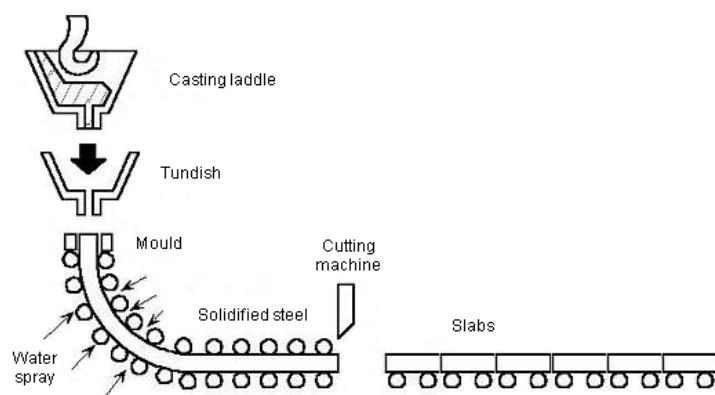


Figura 2.3. Layout del proceso de colada continua

El caso de estudio se inicia desde las máquinas de oxicorte, dónde la temperatura promedio es de entre 800 °C - 900 °C, y el reto es recuperar el calor residual de sólidos, que se genera principalmente por las emisiones radiadas de los slabs. Aunque la distancia, de las máquinas de corte de oxígeno hasta el final de la línea, es de 50 metros, hay 20 metros de zona de seguridad, debido a las operaciones de los puentes grúas durante el desplazamiento de los slabs. Como consecuencia, la hipotética solución de WHR es posible en los primeros 30 metros de la línea, después de las máquinas de oxicorte. Se ha estimado que hay un descenso de 1 °C por cada metro recorrido a una velocidad de 0,1 m/s (figura 2.4). La razón es que el acero es un material con enfriamiento lento y, se calculó un descenso de la temperatura de 0,1 °C por segundo a partir de las máquinas de oxicorte hasta el final del proceso.



Figura 2.4. Slabs en las líneas de colada continua

Algunas termografías se realizaron en el actual proceso de colada continua de la acería LDA de la planta de ArcelorMittal en Avilés (España). Las termografías mostradas (figura 2.5 a 2.7) han sido calculadas con coeficiente de emisividad 0,7 y una distancia de 5 metros a los slabs.

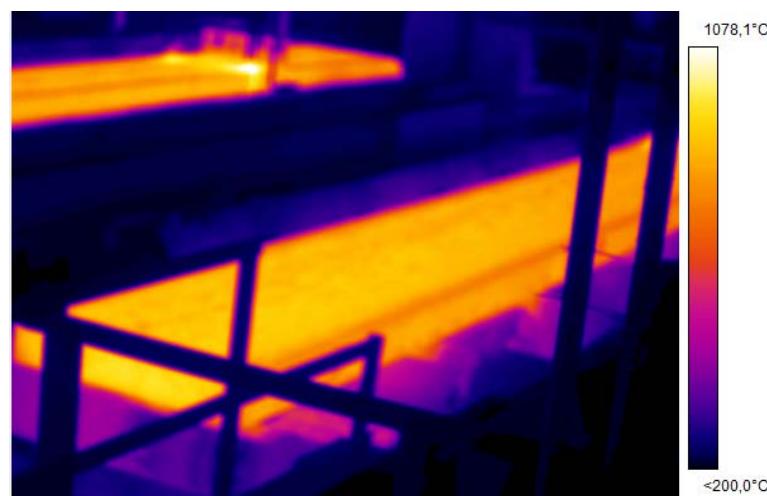


Figura 2.5. Termografía de slabs en las máquinas de oxicorte

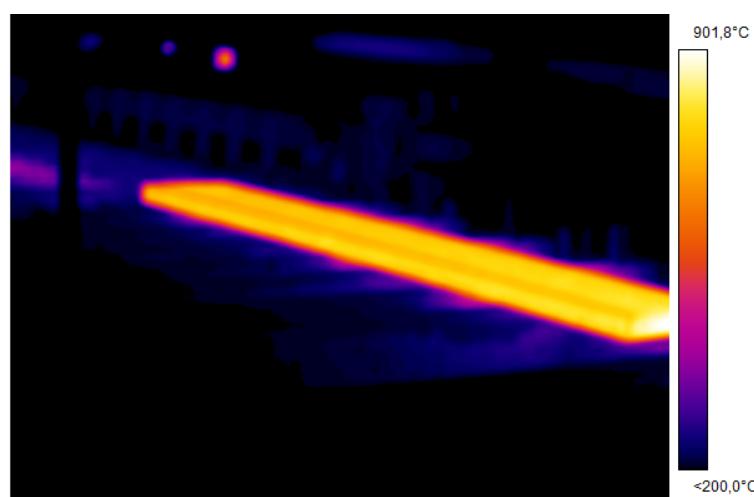


Figura 2.6. Termografía de un slab en la mitad de la cinta transportadora

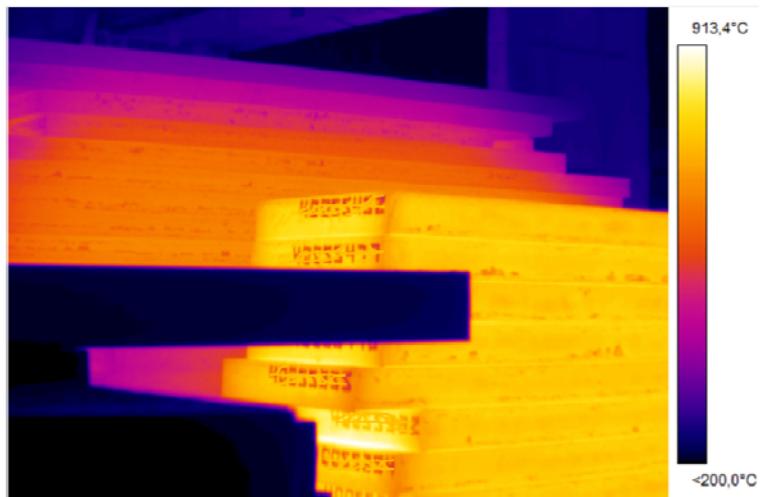


Figura 2.7. Pilas de slabs al final de la línea en el proceso de colada continua

Sobre la base de las medidas de temperatura presentadas anteriormente, el caso de estudio propone una técnica innovadora para recuperar el calor residual emitido por los slabs en el proceso de colada continua. La solución WHR consiste en un escudo térmico con una tubería, que se coloca en la parte superior del escudo - en un lado interior especial. El objetivo es calentar agua que entra en la tubería con temperatura ambiente y sale con mucha más temperatura, que depende fundamentalmente del valor del caudal másico.

2.2.2 Simulación del modelo en 2D

Teniendo en cuenta el alto coste de los experimentos in situ, es conveniente aplicar modelos computacionales para explorar los límites teóricos de velocidad y productividad de la colada continua (Li & Thomas 2002). Con el fin de obtener una mejor descripción de los fenómenos de transferencia de calor por las emisiones radiadas y el flujo de aire por convección natural presente en este proceso de colada continua, se realizaron simulaciones numéricas mediante el software comercial Fluent, que es un código de dinámica de fluidos computacional basado en el método de volúmenes finitos (Fluent 2006).

Este software ya ha sido utilizado en numerosas investigaciones recientes relativas a la transferencia de calor en la industria siderúrgica, como en el caso de transferencia de calor transitoria de dos dimensiones utilizando un modelo matemático para determinar los parámetros de enfriamiento eficaces en el proceso de laminación en caliente (Nobari y Serajzadeh 2011), o durante el proceso de enfriamiento controlado después de la laminación en caliente (Suebsomran y Butdee 2013). También se utilizaron en paneles solares modificados para la recuperación de calor en procesos de enfriamiento (Tarrés et al. 2014). Por otro lado, algunos estudios se han realizado, previos a la máquina de oxicorte, en el proceso de colada continua (Fernández et al. 2009; Shamsi y Ajmani 2010; Warzecha 2011). Este software de simulación se utiliza para resolver las ecuaciones promedio de Reynolds (continuidad, cantidad de movimiento y energía) que gobiernan el movimiento de aire, junto con los modelos adecuados para la turbulencia ($k-\omega$), conducción de calor en los slabs y radiación de calor (método de superficie a superficie). Para simplificar los cálculos, un dominio 2D fue considerado y unas condiciones de contorno simétricas se tomaron en cuenta para simular la mitad del slab y el escudo térmico con la tubería (figura 2.8a), debido a que los resultados fueron los mismos que con una simulación completa. Cada mitad de slab tiene una tasa de generación de calor por unidad de longitud compatible con 80 kW/m. El dominio fue discretizado en 54.183 celdas rectangulares, con grados de refinamiento especiales en la zona de flujo de agua a través de la disposición de tuberías (figura 2.8b). Después de la imposición de condiciones de contorno (15 °C y presión atmosférica en un plano horizontal por encima del techo) y selección de otros parámetros de cálculo, de este modo, los cálculos se realizaron de forma iterativa hasta lograr la convergencia. La simulación se ha realizado bajo condiciones estacionarias, sin la consideración real de la reducción progresiva a lo largo del tiempo de la temperatura del slab. Esto significa que los datos de velocidad y de temperatura calculados, pueden suponerse, representan valores medios a lo largo del proceso de colada continua.

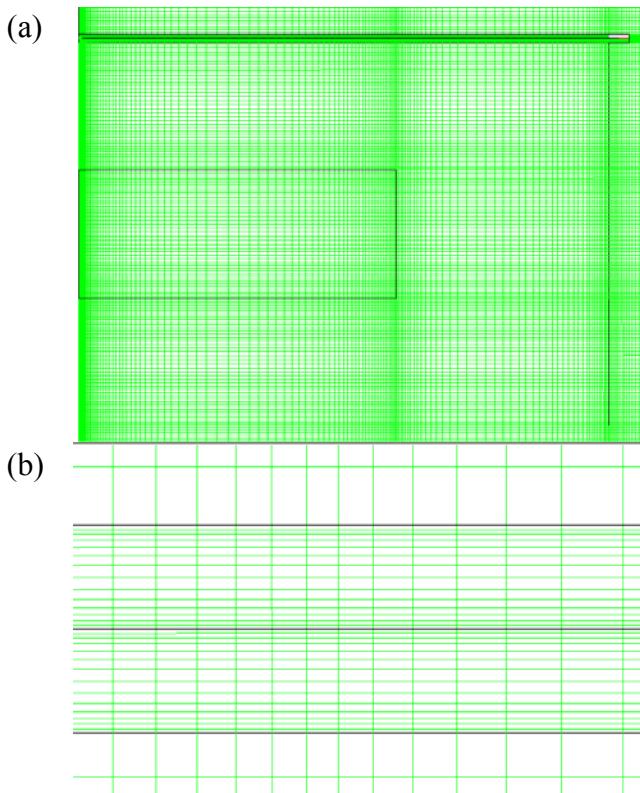


Figura 2.8. Geometría y mallado utilizado para simular la solución propuesta: a) dominio simétrico; b) detalle del mallado en la zona de la tubería

La figura 2.9 representa la variación de parámetros de cálculo debido al número de celdas, caras por superficie y modelos de turbulencia con un caudal másico de 0,5 kg/s/m. En primer lugar, hay una comparación entre el caso con más celdas y otros casos con el fin de ilustrar el error (%) relacionados con la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de agua (ΔT_w) y el rendimiento del sistema (ε) en la figura 2.9a. Por un lado, el uso de caras por superficie, no afectan a ΔT_w y ε debido a que la temperatura es de menos de 1 °C entre todos los casos simulados (figura 2.9b). Finalmente, la figura 2.9c muestra que existe un 7 % de diferencia de valor, al comparar ΔT_w y ε entre K-w SST y K-e RNG.

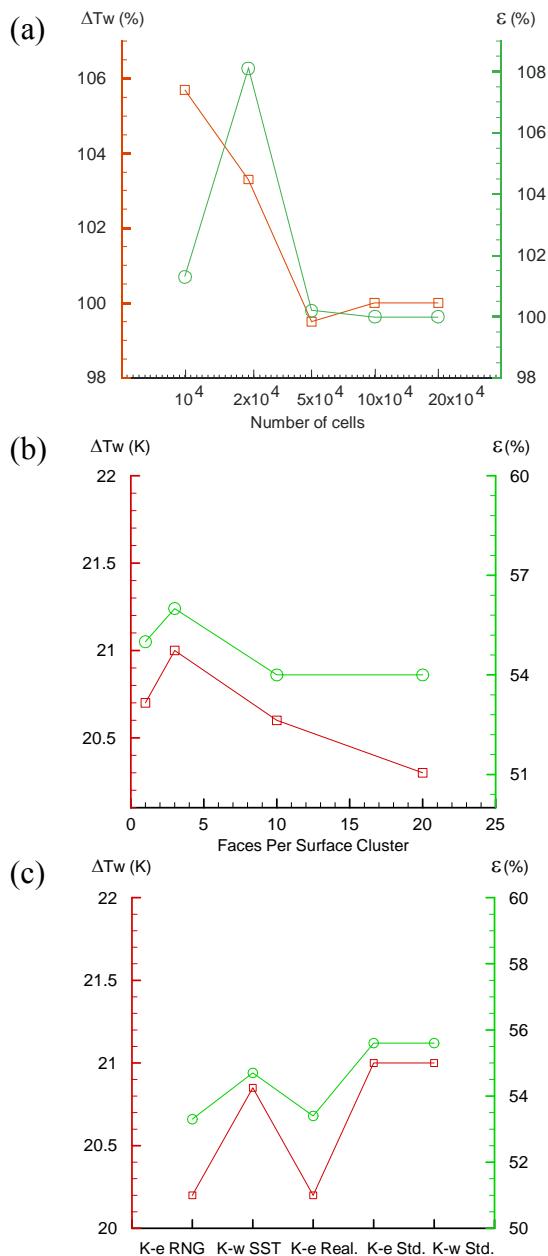
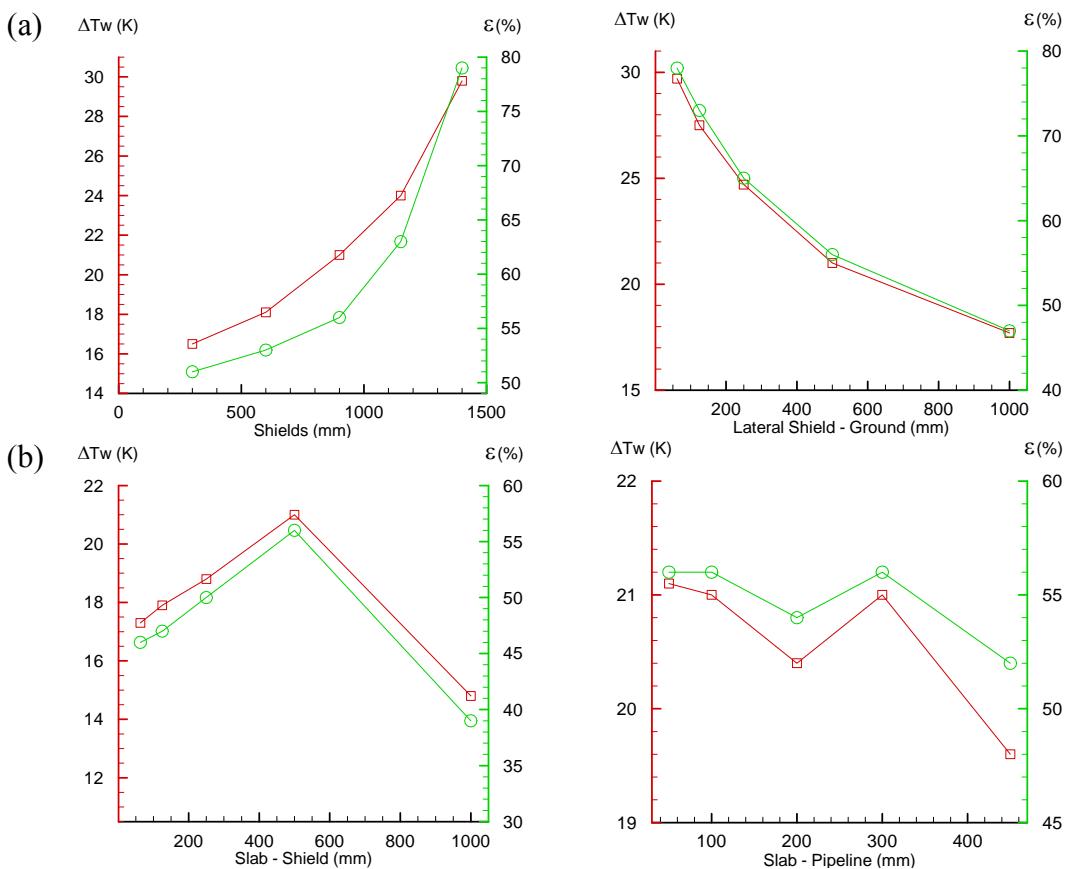


Figura 2.9. Comparación ΔT_w y ϵ en todos los casos 2D relacionados con la variación de los parámetros de cálculo

Como conclusión, los siguientes parámetros de cálculo son valores de referencia para la solución propuesta (tabla 2.8) en el siguiente punto de diseño y optimización: la figura 2.9a confirmó que los resultados, son casi los mismos, con dominios superiores a 50.000 celdas y, para lograr la convergencia, 3 caras por superficie (figura 2.9b) y K-e estándar o K-w estándar (figura 2.9c) en el software de simulación numérica.

2.2.3 Diseño y optimización

El diseño se relaciona con la variación de los parámetros geométricos, como por ejemplo, la variación de escudo, slab - tubería, slab - escudo y escudo térmico lateral - suelo. Por otro lado, la optimización está relacionada con el caudal másico y las variaciones de coeficiente de emisividad. Para ello, se llevaron a cabo nuevas simulaciones CFD, del proceso de colada continua, teniendo en cuenta diferentes casos de simulación del diseño y optimización (figura 2.10). El caudal másico es de 0,5 kg/s/m para todas las simulaciones; el mismo que para los parámetros de cálculo de la sección anterior.



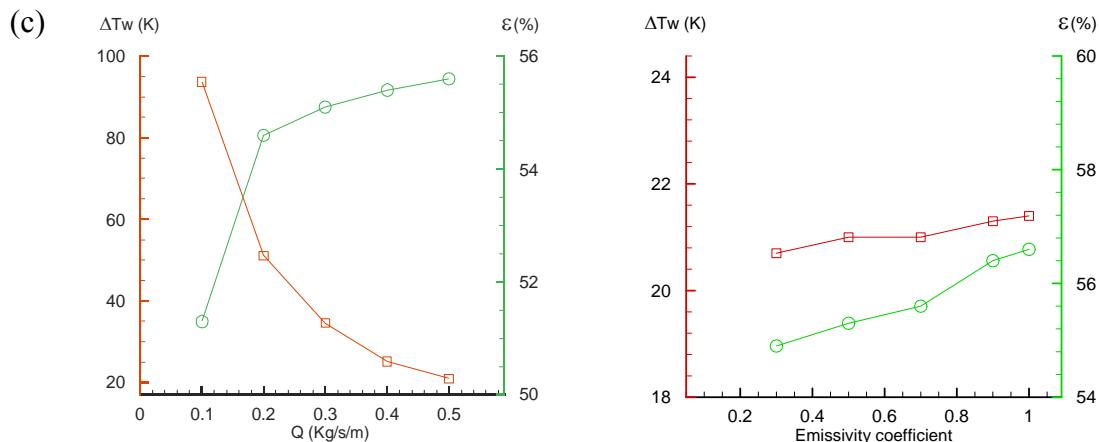


Figura 2.10. Comparación de ΔT_w y ϵ para diferentes: parámetros geométricos, caudal másico y coeficiente de emisividad

La figura 2.10 se divide en tres partes. La primera parte se presenta la simulación de escudos térmicos (figura 2.10a) con diferentes grados de longitud lateral, como un panel abatible, de manera que la disipación de calor a través de las aberturas se pueda controlar. La segunda parte se simulan los elementos que rodean al slab (figura 2.10b). Así, en la primera y segunda parte se resumen todos los casos relacionados con variaciones de parámetros de geometría. Por último, se simulan los diferentes valores del caudal másico y coeficiente de emisividad para optimizar la solución propuesta (figura 2.10c).

Además de los valores de referencia de los parámetros de cálculo mencionados en el apartado anterior a este punto (2.2.2); se ha realizado otra comparación con las termografías ya expuestas en la sección del caso de estudio (2.2.1) con una simulación de la situación actual. El hecho de que los valores máximos y mínimos de las temperaturas de trabajo que se exhiben en las termografías sean ligeramente diferentes se debe a que la simulación se realizó con 0,6 de coeficiente de emisividad y las termografías se calcularon con 0,7. Así, el diseño eficiente es el resultado de todos los casos de simulación que se muestran en la figura 2.10 donde el slab, se ha utilizado como referencia para las siguientes distancias del sistema propuesto: 300 mm desde la superficie superior del slab a la tubería, 500 mm de la superficie lateral al escudo térmico lateral y 800 mm de la superficie superior del slab al suelo (tabla 2.8).

La figura 2.11 muestra las predicciones obtenidas para los vectores velocidad del aire. Se ilustra, en la figura 2.11, dos regiones principales de velocidad del aire. La primera región se corresponde con la radiación directa por el calor residual de los slabs. Estas emisiones radiadas hacen que la velocidad del aire cerca del slab sea relativamente alta, de hasta 1,6 m/s, lo que favorece el proceso de convección de calor residual debido a la circulación de la velocidad del aire. Por otro lado, existe una segunda región que representa la absorción de calor residual por el flujo de agua en la zona de la tubería. La velocidad del aire va en la dirección inversa a la primera región, debido a patrones de rotación en las regiones con el escudo térmico lateral, así como el flujo de retorno en la superficie del suelo, que es interna al escudo porque los resultados presentados son la solución final donde el escudo abatible está totalmente cerrado. Por lo tanto, esta disposición hace que la velocidad del aire que entra a la zona de la tubería esté comprendida entre 0,8 y 1,1 m/s.

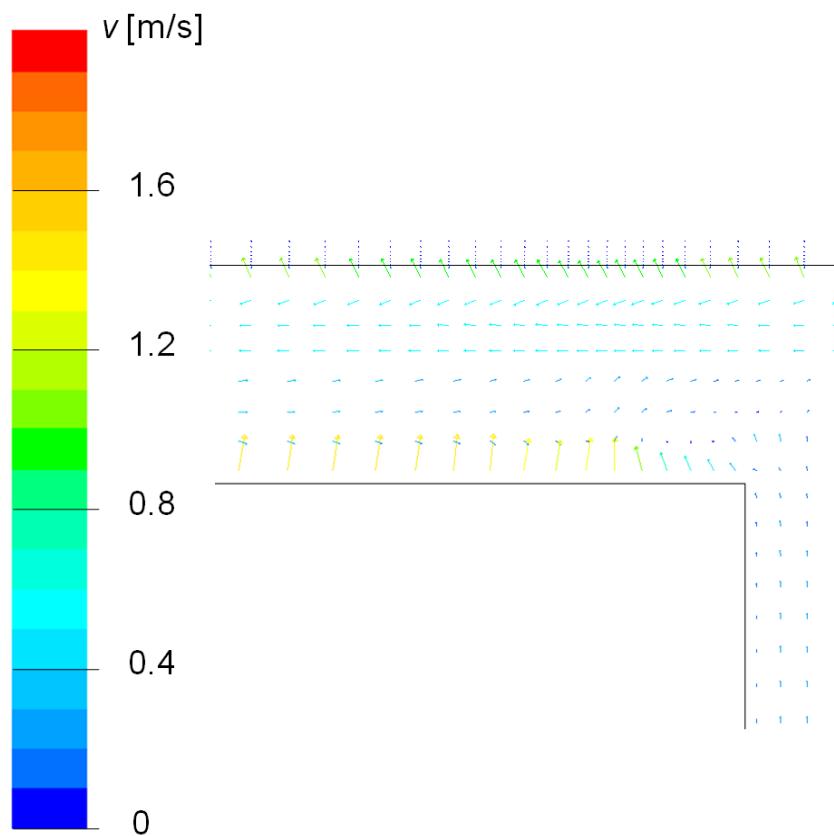


Figura 2.11. Predicción de los vectores velocidad del aire en la solución propuesta

La figura 2.12 presenta los aumentos de temperatura del aire a lo largo del canal, entre el slab y la tubería, debido a que el escudo térmico lateral está totalmente cerrado y no se produce una absorción progresiva de calor residual por el flujo de agua y, el calor residual se genera principalmente a partir del slab. En particular, la temperatura del aire a lo largo del canal es de alrededor 200 °C. La temperatura máxima calculada en el dominio, que se encuentra en el interior del slab, fue de 850 °C, mientras que la temperatura media en la superficie del slab varió de 500 °C a 600 °C. Finalmente, la temperatura del agua podría haber llegado a un valor mucho mayor, que el máximo establecido de ΔT_w 90 °C, debido a las limitaciones de operación relacionadas con problemas de cavitación, punto de ebullición, y requisitos de los usuarios finales para otros procesos internos de la siderurgia, tales como el precalentamiento de aceite para sistemas hidráulicos.

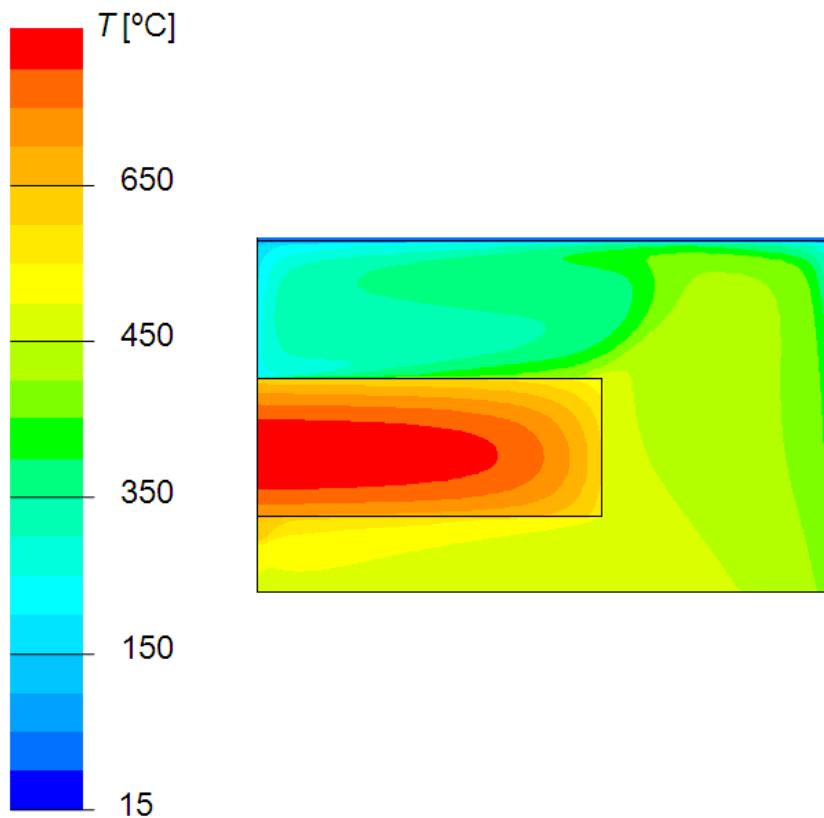


Figura 2.12. Predicción de la distribución de temperatura en la solución propuesta

En resumen, la solución técnica propuesta tiene las distancias de geometría antes mencionadas, más otros valores clave (tabla 2.8) incluidos en el software de simulación numérica, tales como: 1) todos los casos se han considerado con condiciones de contorno simétricas para simular la mitad de un slab y el escudo térmico con la tubería, 2) todas las simulaciones se han realizado en condiciones estacionarias, 3) el dominio se discretizó en 54.183 celdas rectangulares, 3 caras por superficie y K-w estándar como parámetros de cálculo, 4) 0,2 kg/s/m de caudal másico para obtener ΔT_w 90 °C, con el escudo abatible totalmente cerrado, con una temperatura máxima debido a las limitaciones de operación y un rendimiento del sistema ϵ 77 %, que depende, entre otras cosas, del coeficiente de emisividad, que para el sistema propuesto, es de 0,2 para el escudo térmico, 0,5 para la tubería , y 0,6 para el slab.

Tabla 2.8. Resumen de las distancias geométricas y valores clave de la solución final

Distancias geométricas	Valores clave de la solución final
300 mm desde la superficie superior del slab a la tubería.	Condiciones de contorno simétricas para simular la mitad del dominio.
500 mm desde la superficie lateral al escudo térmico lateral.	Condiciones estacionarias.
800 mm desde la superficie superior del slab al suelo.	Parámetros de cálculo: discretización de 54.183 celdas rectangulares, 3 caras por superficie y K-w estándar.
	Caudal másico: 0,2 kg/s/m.
	Coeficiente de emisividad: 0,2 para escudo térmico, 0,5 para tubería, 0,6 para el slab.

La solución propuesta tiene algunos aspectos claves en su diseño y optimización (tabla 2.8), que son importantes analizar. Desde el punto de vista científico, cuando el escudo térmico lateral está totalmente cerrado y hay una absorción progresiva de calor residual por el flujo de agua, las distancias geométricas óptimas entre el slab y la tubería tienen un papel crucial, con el fin de poder aumentar la temperatura del aire a lo largo del canal entre el slab y la tubería. Por otra parte, en cuanto a la simulación numérica de la circulación de la velocidad del aire, de hasta 1,6 m/s, es clave la posición óptima de la

zona de la tubería, lo que favorece la máxima absorción de calor residual por medio de la radiación directa de los slabs y los patrones de rotación entre la superficie del slab y la tubería.

Una de las consecuencias prácticas de la solución es haber encontrado las distancias geométricas óptimas entre un escudo térmico y un slab, que ayudan a tener una referencia para la cobertura de un sólido en cualquier proceso continuo con propiedades de fuente de calor similares. Por otra parte, el uso de un panel oscilante con diferentes grados de escudo térmico lateral, se pensó para evitar problemas de diseño en relación con el movimiento del slab y su mantenimiento a lo largo de la línea.

2.3 Calefacción Urbana para Calor Residual en Nave de Enfriamiento de Slabs

2.3.1 Sitio

Avilés es una ciudad costera situada en el Principado de Asturias (España), en la costa cantábrica. La ciudad industrial tiene una población de 85.000 habitantes (NEE 2013). Un número importante de fábricas y plantas que representan a varios sectores industriales que han estado y continúan operando en el área de Avilés durante décadas, por lo que es considerado uno de los principales sitios de la industria pesada en España. Los ejemplos de empresas industriales establecidas en los alrededores de Avilés son Alcoa (principal productor mundial de aluminio) (Alcoa 2013), ArcelorMittal (principal productor siderúrgico mundial) (ArcelorMittal 2013) y de Saint-Gobain Glass (principal fabricante de vidrio plano en Europa Occidental) (Saint-Gobain 2013).

Como la mayoría de las ciudades, el municipio de Avilés ha sufrido varias transformaciones urbanas, haciéndola más habitable y sostenible. Uno de los más notorios proyectos urbanísticos en los últimos años, conocido como "Isla de la Innovación", que abarca unos 572.000 m² (NEE 2013), persigue la restauración de una zona degradada por la ría de Avilés que había sido ocupada anteriormente por talleres mecánicos y tolvas de mineral. La primera acción importante del proyecto "Isla de la Innovación", ya realizada, ha sido la construcción del denominado Centro Cultural Internacional Oscar Niemeyer, un complejo destinado a audiciones, espectáculos, exposiciones de arte y congresos. La evolución posterior de ese plan urbano incluye la construcción de bloques de apartamentos para un total de 1.000 inquilinos (en dos fases), así como un hotel de cuatro estrellas y un centro de deporte y spa. De hecho, estos nuevos edificios van a dar lugar a una considerable demanda de energía en diversas categorías, tales como calefacción y agua caliente sanitaria (ACS).

Por otro lado, algunas de las industrias ubicadas en los alrededores de la ciudad tienen procesos continuos que requieren un alto consumo de energía, a menudo con poca eficiencia energética, por lo que hay una generación casi continua de excedente de

calor, actualmente perdido. Ciertamente, un posible uso para esta energía desaprovechada es DH, y el proyecto "Isla de la Innovación" aparece como un candidato adecuado para una primera aplicación de DH en el área de Avilés, que es el propósito del presente estudio. Y, debido a su proximidad a la "Isla de la Innovación" (a unos 3 km de distancia), la acería de ArcelorMittal (2009) es la primera elección para el análisis de las oportunidades de recuperación de energía desperdiciada en un proceso continuo.

En particular, este artículo considera el calor residual originado durante el enfriamiento de las slabs producidos en la acería avilesina, que resultan de la colada continua a alta temperatura. Por medio de los puentes grúa, los slabs calientes (inicialmente por encima de 800 °C) son secuencialmente ubicados en diferentes naves (figura 2.13) para que el proceso de enfriamiento se lleva a cabo en varias etapas. Al final, los slabs se apilan en un parque regulador (figura 2.14). Especialmente en el rango de alta temperatura, la refrigeración debería progresar a un ritmo lo suficientemente bajo como para no afectar a la calidad del acero, es decir, los slabs deben permanecer en cada nave de enfriamiento durante un tiempo suficiente. Esto implica una limitación para la capacidad de utilizar el calor de los slabs. Esta limitación es menos importante en la etapa de baja temperatura (por debajo de 500 °C), ya que en este rango de temperatura las propiedades del material casi no se pueden modificar. Sin embargo, la cantidad de calor residual en esta última etapa es todavía lo suficientemente grande para obtener una recuperación ventajosa, tal y como se describe a continuación.



Figura 2.13. Vista exterior de la nave para enfriamiento de slabs en la acería avilesina



Figura 2.14. Parque regulador de slabs, con un tren transportando slabs de la acería

2.3.2 Tecnología propuesta

2.3.2.1 Energía disponible en la nave de enfriamiento

La última nave para la refrigeración de los slabs (figura 2.13) es de aproximadamente $120 \times 45 \text{ m}^2$ vista en planta y 21 m de altura. Cuenta con puentes grúas para el desplazamiento de los slabs. Estos, son productos intermedios de acería de hasta 11,7 m de largo con una sección transversal media de 1,5 m de ancho y 0,25 m de espesor, se apilan en el suelo formando columnas de 2 a 3 m de altura. Mientras que los slabs calientes entran en la nave con una temperatura aproximada de 500 °C, y, a su vez, otros slabs se retiran progresivamente cuando su temperatura ha disminuido por lo menos 250

°C, de manera que en cualquier momento hay pilas de slabs con diferentes grados de enfriamiento, es decir, a diferentes temperaturas. La capacidad de producción anual reportada por la acería LDA de ArcelorMittal en Avilés es de 4,2 millones de toneladas (ArcelorMittal 2009). Suponiendo una estimación conservadora de 60 % en la producción de acero eficaz con respecto a la capacidad, la potencia térmica correspondiente anual promedio para ser disipada en la última nave de enfriamiento, de la acería, es de al menos 9 MW.

El enfriamiento de las pilas de slabs se produce por la radiación térmica hacia las paredes de la nave y por convección natural del aire circundante. Para facilitar esta convección, los lados laterales de la nave están abiertos hacia el exterior, desde el suelo hasta 6 m de altura, es decir, la fachada física va de 6 a 21 m de altura (figura 2.13). Esto permite un espacio para que el aire fresco entre en la instalación a nivel del suelo, y para que el aire caliente pueda salir cerca del borde inferior de la fachada. Si fuese necesario, el flujo de refrigeración adicional se puede conseguir mediante la activación de aberturas locales en el techo.

Con el fin de obtener una mejor descripción de los fenómenos de transferencia de calor y convección natural de los flujos de aire presentes en este proceso de enfriamiento, una simulación numérica se llevó a cabo por medio del software comercial Fluent, que es un código de la dinámica de fluidos computacional basado en el método de volumen finito (Fluent 2006). Este software ya se ha utilizado en numerosas investigaciones recientes relativas a la transferencia de calor en la industria siderúrgica, tales como distribución de la temperatura en un horno de recalentamiento (Wu et al. 2008), colada continua de desbastes (Férnandez et al. 2009; Shamsi y Ajmani 2010; Warzecha 2011) y de recuperación de calor a partir de escorias de acería (Gutiérrez et al. 2013). Este software se utiliza para resolver ecuaciones promedio de Reynolds (continuidad, cantidad de movimiento y energía) que gobiernan el movimiento de aire, junto con los modelos adecuados para la turbulencia ($k-\omega$), la conducción de calor en los slabs y la radiación de calor (método superficie-superficie). Para simplificar los cálculos, se consideró un dominio 2D (figura 2.15) en el que las pilas de slabs fueron alineadas en 8 filas dentro

de la nave, cada una con un coeficiente de generación de calor por unidad de longitud compatible con 9 MW para toda la nave. El dominio fue discretizado en 26.000 celdas rectangulares, con grados de refinamiento especiales, mediante celdas no estructuradas triangulares, en la zona de las pilas de slabs (figura 2.16). Después de la imposición de las condiciones de contorno (12°C y presión atmosférica en un plano horizontal por encima del techo) y selección de otros parámetros de cálculo, los cálculos se realizaron de forma iterativa hasta lograr la convergencia.

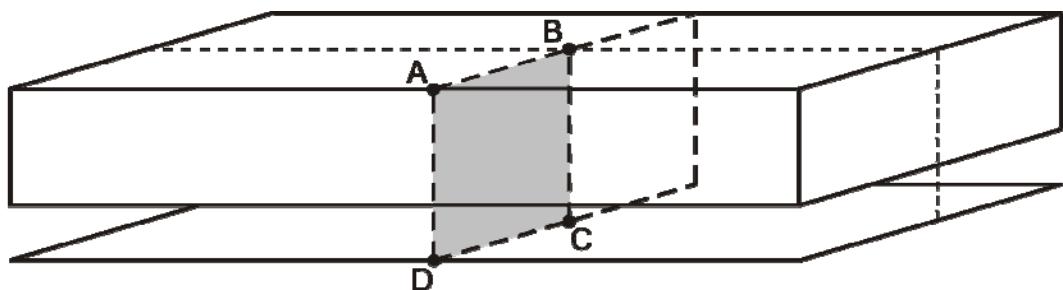


Figura 2.15. Diseño esquemático de la nave y el plano de cálculo ABCD

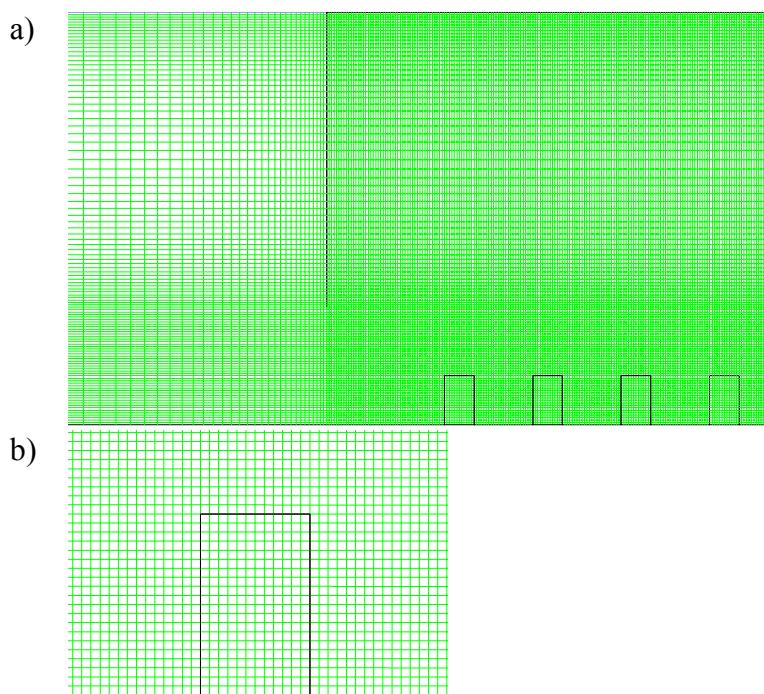


Figura 2.16. Geometría y mallado en la simulación CFD en las condiciones actuales: a) región de la nave de enfriamiento; b) detalle del mallado en una pila de slabs

Las figuras 2.17 y 2.18 presentan las predicciones obtenidas para los vectores de velocidad del aire y la distribución de temperatura en el caso del techo totalmente cerrado. Los resultados mostrados se corresponden a la mitad del dominio de cálculo (plano ABCD en la figura 2.15). Como era de esperar, en la figura 2.17, el aire exterior se aproxima a las pilas de slabs cerca del suelo, se eleva, da la vuelta y sale de la nave, pasando por debajo de su pared lateral. El valor calculado para este flujo de aire de convección 2D es $1,98 \text{ kg/(s} \cdot \text{m)}$. Dentro de la instalación, los valores máximos de velocidad están en el rango de 1 m/s y se corresponden a la región cercana a los slabs. La figura 2.18 muestra la estratificación de temperaturas en la nave industrial, con valores máximos del orden de 185°C en el techo. Esta acumulación de aire caliente en el techo se debe al efecto combinado de radiación de calor de los slabs y la convección natural de aire caliente. Aunque no se muestra en la figura 2.18, la temperatura promedio calculada en la superficie de las pilas varía de 272°C (pila exterior) a 306°C (pila interna), mientras que la temperatura máxima en el interior de los slabs fue de 438°C (pila interna).

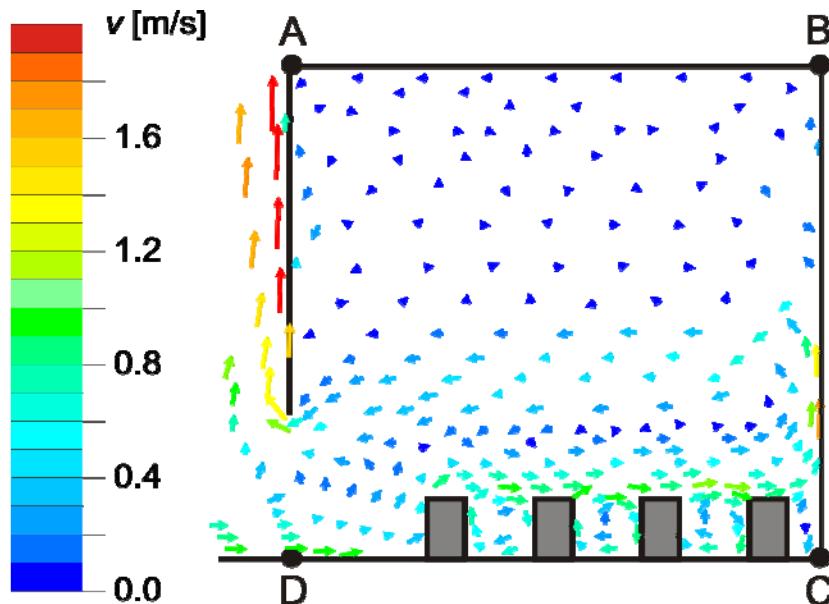


Figura 2.17. Predicción de vectores de velocidad de aire en las condiciones actuales (plano ABCD como en la figura 2.15)

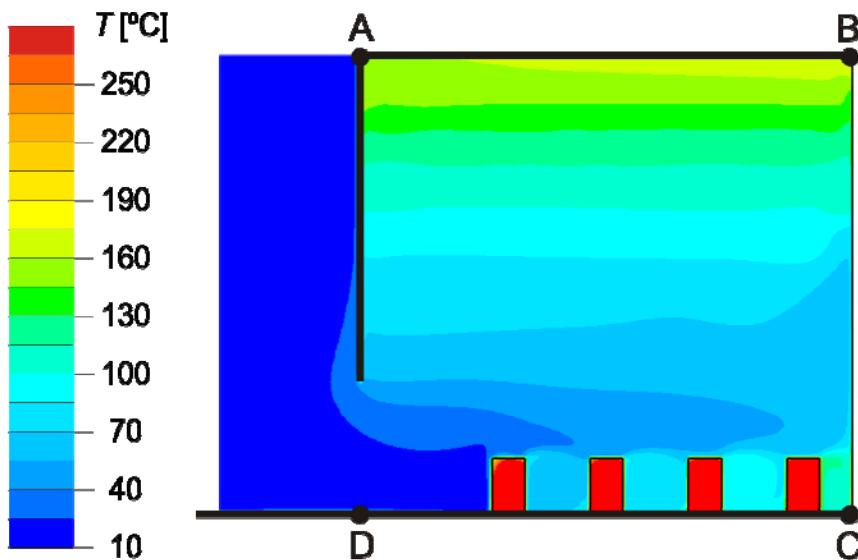


Figura 2.18. Predicción de la distribución de temperatura en las condiciones actuales (plano ABCD como en la figura 2.15).

Esta simulación se ha realizado en condiciones estacionarias y sin la consideración real de la reducción progresiva en el tiempo de la temperatura de los slabs. Esto significa que los datos de velocidad y de temperatura calculados se pueden considerar como valores medios a lo largo del proceso de enfriamiento. En la práctica, sin embargo, los horarios habituales de entrada/salida de slabs determinan que simultáneamente existan slabs en la nave con grados muy diferentes de enfriamiento. Por lo tanto, es razonable suponer que estos cálculos representen la media de disipación de energía térmica, con relativamente poca fluctuación a lo largo del tiempo. En cualquier caso, está claro que hay una acumulación significativa de aire caliente en el área del techo que merece la pena recuperar.

2.3.2.2 Usuarios potenciales

Como se indica en la sección del sitio (2.3.1), la recuperación del calor residual en las naves de refrigeración puede encontrar su mejor uso en el DH de la "Isla de la Innovación" en Avilés, que todavía está en su mayoría en proyecto. En el plan actual de la "Isla de la Innovación ", los candidatos más probables para DH son:

- Construcción de edificios para 500 apartamentos, en varias etapas.

- b) Hotel de cien habitaciones con servicios de restaurante, salas de conferencias y gimnasio.
- c) Centro deportivo y spa con piscina, piscina de iniciación e instalaciones de spa que incluyen piscinas de terapia, hidromasaje, sauna, baño turco, etc.

Las exigencias térmicas correspondientes a estos usuarios son dependientes de la época del año y, se pueden dividir en consumo de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción. En cuanto a ACS, el Instituto Español para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) ha publicado recientemente un informe sobre el consumo energético de los hogares españoles (IDEA 2011), en el que el agua caliente de los hogares de la región cantábrica representa una potencia media anual de 260 W. Suponiendo 500 apartamentos, la demanda diaria promedio resultante es de 3.120 kWh. En el caso del hotel de cuatro estrellas, el promedio de consumo de ACS se puede estimar en 70 litros a 60 °C por persona y día (CTE 2009). Por lo tanto, para un nivel de ocupación de 100 personas, la demanda promedio diaria correspondiente asciende a unos 375 kWh.

Sin embargo, el mayor consumidor de agua caliente es el centro deportivo y spa. Teniendo en cuenta una piscina de ocho carriles de 420 m³ de volumen, una piscina de natación de aprendizaje y juego de 70 m³ y una piscina de hidromasaje dinámica de 65 m³, las necesidades de agua de recalentamiento pueden estimarse en 18 m³/h y 17 °C. Este caudal es compatible con los requisitos mínimos establecidos por la normativa española para el coeficiente de flujo de recirculación en instalaciones de piscinas públicas (BOE 2003). Además del consumo en el calentamiento de la piscina, el centro deportivo y spa también tendría otros importantes consumos de agua sanitaria, tales como baños de jacuzzi y duchas. Todo ello conduce a una demanda diaria promedio de 5.900 kWh.

En el caso de la calefacción doméstica, los datos aportados por el IDAE (2011) indican una demanda media anual de potencia de 215 W para el bloque de apartamentos en la región del Atlántico Norte español (incluyendo el área de Avilés). Dado que el clima en esta región es oceánico, con veranos templados e inviernos fríos, es razonable teniendo en cuenta que todo el consumo de calefacción se lleva a cabo en el período de invierno,

aproximadamente durante los cinco meses de noviembre a marzo. En consecuencia, la demanda equivalente para los 500 bloques de apartamentos durante ese período de cinco meses sería de 6.200 kWh por día. En el caso del hotel y el centro deportivo y spa, las necesidades de calefacción dependerán de la superficie externa y el acabado de fachadas, que no se han definido aún. Desde la consideración de los valores medios para otros edificios con el uso y el tamaño equivalente, el consumo diario de energía debido a la calefacción se ha estimado en 480 kWh para el hotel y 1.080 kWh para el centro deportivo y spa, durante el período de cinco meses de invierno.

Tabla 2.9 recoge los datos de la demanda de energía térmica para los períodos de invierno y verano obtenidos de las estimaciones anteriores. El patrón general de la demanda de energía anual se caracteriza por una demanda máxima de potencia de 1.075 MW para el período diurno de invierno, que se reduce a 278 kW en la noche. En verano, la demanda prevista durante el día está cerca de 0,5 MW, mientras que la demanda nocturna puede considerarse insignificante. Sin embargo, ya que estos datos de potencia son valores medios durante el día o la noche, estarán sujetos a las fluctuaciones significativas en diferentes franjas horarias, dependiendo de las condiciones diarias (meteorológicas, días laborables o de vacaciones).

Tabla 2.9. Consumo de los potenciales usuarios

Consumidores	Demanda diaria media (kWh)		Potencia media (kW)		
	ACS	Calefacción	Diurno (16h)	Nocturno (8h)	Verano Diurno (16h)
Bloque de apartamentos	3.120	2.580	534	258	138
Hotel	375	200	53	20	17
Centro deportivo y spa	5.900	450	488	-	332
Total	9.395	3.230	1.075	278	487

2.3.2.3 Recuperación e instalaciones de transporte

El operador energético para atender la demanda de energía de los consumidores en la "Isla de la Innovación" tiene que ser capaz de satisfacer incluso los picos de demanda, por lo que el sistema de suministro global tiene que ser diseñado para valores de potencia muy superior a los de la tabla 2.9. Además, ese sistema tiene que ser fiable, es decir, la capacidad de suministro tiene que ser muy poco dependiente de los eventos esperados o inesperados. Esto significa que, en el caso de un sistema de DH basado en agua caliente recuperada de una planta industrial, la estructura de distribución de la energía tiene que incluir los sistemas de suministro de energía auxiliares, por ejemplo, basado en la conexión directa a las principales redes de gas natural o electricidad. Por un lado, tal sistema alternativo tiene que permitir la compensación de disminuciones eventuales de producción en la planta industrial; de hecho, tiene que ser capaz de cubrir completamente el suministro de energía cada vez que la planta tiene que parar, por ejemplo, para operaciones de mantenimiento. Y, por otra parte, que el sistema pueda complementar la energía suministrada desde la fuente industrial cuando la demanda de energía está en máximos, de manera que las instalaciones de recuperación de calor y transporte pueden estar diseñadas para valores de potencia no demasiado grandes.

De acuerdo con estas consideraciones, es razonable dimensionar la instalación de suministro con una potencia nominal de 1,1 MW, que está ligeramente por encima del valor medio diurno esperado durante los meses de invierno (tabla 2.9). La solución propuesta, que se representa en la figura 2.19, está formada por:

- Campanas en la instalación de refrigeración por encima de las pilas de slabs para acumular y capturar aire caliente (por encima de 180 °C).
- Aislamiento térmico de conductos de aire (2 m de diámetro) con válvulas de mariposa y ventilador para conducir el aire caliente de las campanas a través del intercambiador de calor primario (normalmente cerrado con válvula by-pass) y, luego a otros procesos internos dentro de la planta industrial (como fuente de calor adicional). El flujo másico nominal es de 25 kg/s.

- Intercambiador de calor carcasa y tubo para calentar el agua del circuito secundario en aproximadamente 37 °C para una reducción de temperatura del aire sobre 65 °C.
- Tubería de doble vía de agua (diámetro de 0,1 m, 2x3 km de longitud) entre el intercambiador de calor primario de la planta industrial y los intercambiadores de calor del cliente en los sitios de consumo, con bomba de recirculación y válvulas. Las tuberías deben ser recubiertas con aislamiento térmico de alta calidad y soterrado, para que el agua se pueda suministrar a 100 °C y se devuelva a 70 °C. Caudal de agua nominal es de 9 l/s.

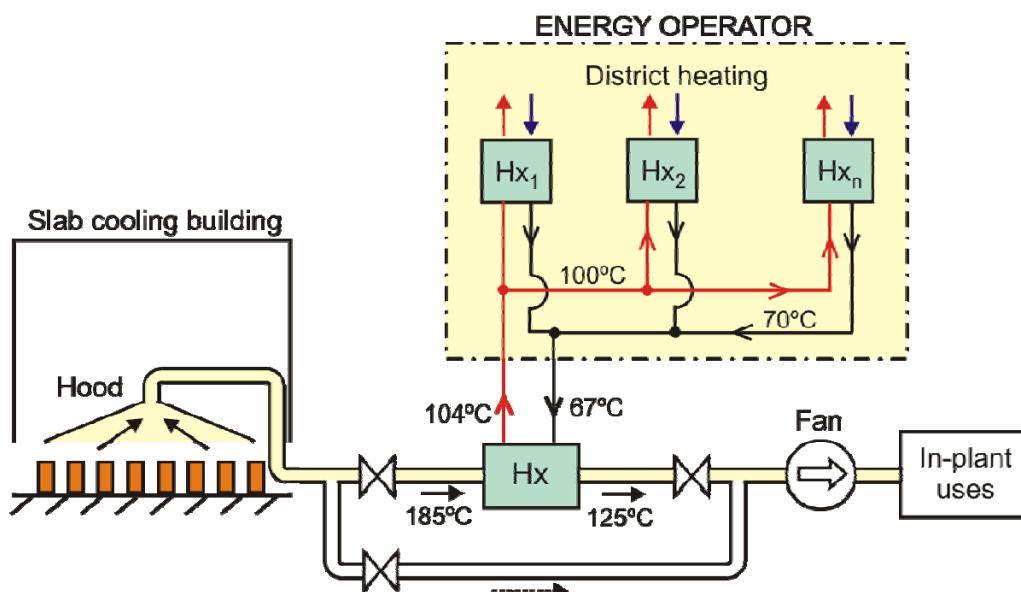


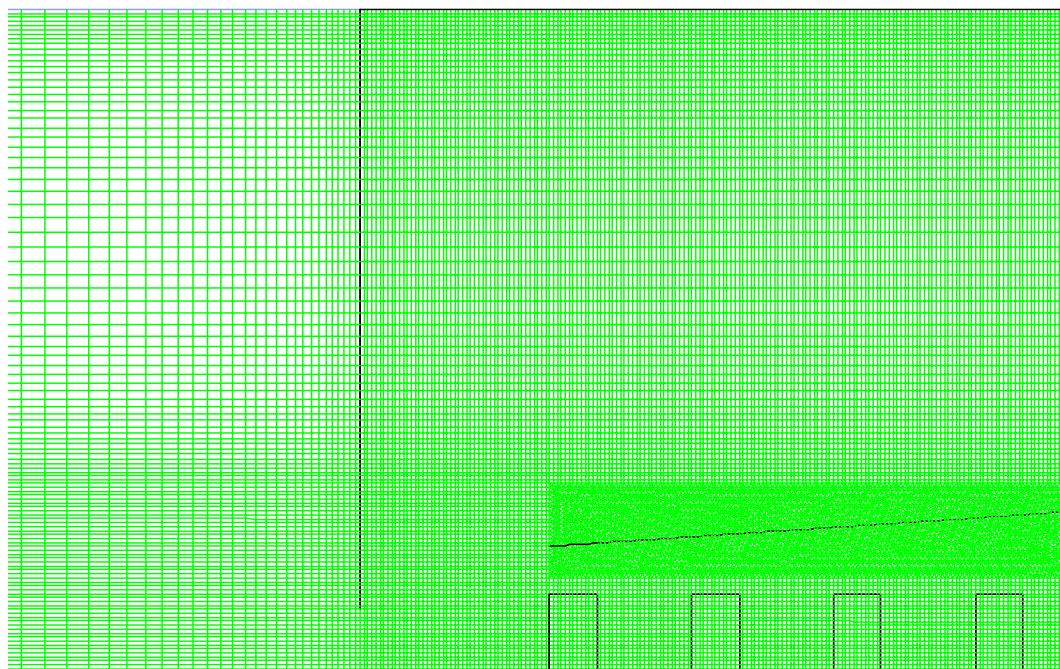
Figura 2.19. Esquema del sistema de recuperación de calor residual

El flujo de aire se espera de 25 kg/s a 185 °C, en la nave de refrigeración de slabs, representa una eliminación continua de aproximadamente 4,3 MW. Esto es casi la mitad de la potencia media producida en esta instalación y, en principio, es compatible con el proceso de enfriamiento de slabs. No obstante, es necesario comprobar que las campanas (*hoods*) y la corriente de aire forzado realmente no inducen alteraciones no deseadas en el proceso de enfriamiento de slabs.

Para ello, se llevaron a cabo nuevas simulaciones de CFD en la instalación, considerando diferentes esquemas para la ubicación y el tamaño de las campanas, así

como diferentes grados de abertura lateral de la nave de enfriamiento. La configuración final propuesta como más adecuada, consiste en campanas que se extienden transversalmente en el edificio por encima de las pilas de slabs y se pueden mover longitudinalmente sobre raíles. Además, las aberturas laterales en las fachadas se reducirán a partir de 6 m de altura desde el suelo hasta 2 m por medio de paneles abatibles, de modo que la disipación de calor a través de las aberturas se puede controlar. La figura 2.20a muestra la geometría y el mallado utilizado para simular la configuración, que representa la mitad izquierda del dominio de cálculo (plano ABCD en la figura 2.15). La figura 2.20b muestra la parte central de la campana, donde el aire caliente se captura y se extrae, con un detalle de las celdas no estructuradas triangulares utilizadas en esa zona. Al igual que en el caso de las simulaciones en las condiciones actuales, el techo se consideró totalmente cerrado.

a)



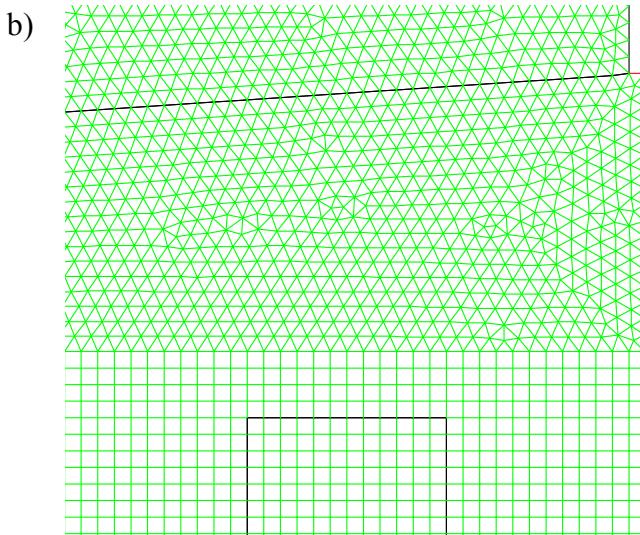


Figura 2.20. Geometría y mallado utilizado para la simulación CFD en la nave de enfriamiento modificada: a) construcción de la región; b) detalle del mallado de la campana en la zona de aspiración de aire caliente

Las figuras 2.21 y 2.22 presentan las predicciones obtenidas para los vectores de velocidad del aire y la distribución de temperatura para una extracción de aire, teniendo en cuenta la mitad de la nave, de la campana de $0,3 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$, que es equivalente a 25 kg/s para el conjunto de la nave. El resto de parámetros, incluyendo el coeficiente de generación de calor en las pilas, son los mismos que se utilizan para la nave de refrigeración en las condiciones actuales. La figura 2.21 muestra que el aire exterior entre en la instalación de refrigeración a través de la abertura lateral y se mueve a lo largo de la zona entre las pilas de slabs y la campana hasta llegar a la salida en la parte superior de la misma, mientras se observa la creación de patrones de rotación en las regiones entre las pilas adyacentes, así como reflujo en la superficie inferior de la campana. Esta disposición hace que la velocidad del aire cerca de la superficie de las pilas es relativamente alta, de hasta $1,4 \text{ m/s}$, lo que favorece el proceso de convección de calor, mientras que la mayor parte del aire sobre la campana está casi en reposo. A diferencia del caso de la figura 2.17, no hay flujo de aire caliente significativo que salga a través de la abertura lateral de la nave.

La figura 2.22 muestra que el aumento de la temperatura del aire a lo largo del canal entre las pilas de slabs y la campana, debido a la progresiva absorción de calor de los

slabs, hasta alcanzar valores por encima de 200 °C en la región central de la nave. En particular, la temperatura del aire que se extrae en la parte superior de la campana es 185 °C, que es el valor utilizado en la entrada del intercambiador de calor principal en la figura 2.19. La temperatura máxima calculada en el dominio, que se encuentra en el interior de los slabs apilados, fue 498 °C, mientras que la temperatura media en la superficie de las pilas varía de 300 °C (pila externa) a 368 °C (pila interna). Además, la temperatura resulta ser alta en la campana, debido a la radiación directa del calor de los slabs. Finalmente, el aire caliente se va a acumulando en la región del techo de la nave, pero si fuese necesario su temperatura podría reducirse fácilmente con la apertura de las claraboyas dispuestas en el techo.

Una vez más, esta simulación ha asumido condiciones promedio estacionarias, independientemente de la evolución previsible de los valores de temperatura a lo largo del tiempo, pero a pesar de eso, es razonable considerar que representa la situación característica durante los períodos de máxima demanda de energía térmica, es decir, durante los meses diurnos de invierno. Los mecanismos de control son necesarios para adaptar el suministro de potencia térmica a la demanda horaria fluctuante de los consumidores, así como, para prevenir las variaciones en el programa de producción de la planta industrial. Estos mecanismos de control son:

- Unidades de velocidad variable para el ventilador en el circuito de aire primario y de la bomba en el circuito secundario de agua.
- Válvulas de mariposa en la línea de aire principal para aislar el intercambiador de calor primario en caso de suspensión de suministro, con la posible apertura de la línea de derivación a otros procesos dentro de la planta.
- Colocación o extracción de campanas en la nave de enfriamiento de slabs por el desplazamiento sobre raíles.
- Apertura y cierre de paneles abatibles en la parte lateral de la nave de enfriamiento de slabs para modificar el coeficiente de transferencia de calor a través de ellos.

Cuando sea necesario, los dos últimos mecanismos permiten regresar a las condiciones geométricas y físicas actuales del proceso de enfriamiento. Como en el caso de demanda cero por parte de los consumidores, que ocurre durante las noches de verano. Por esa razón, las torres de refrigeración auxiliares no son necesarias.

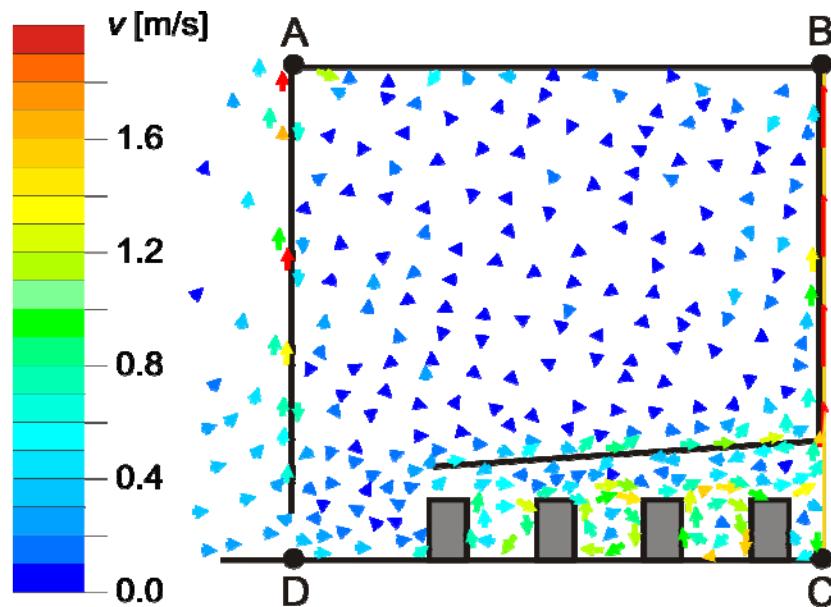


Figura 2.21. Predicción de vectores de velocidad de aire en virtud de la solución técnica (plano ABCD como en la figura 2.15)

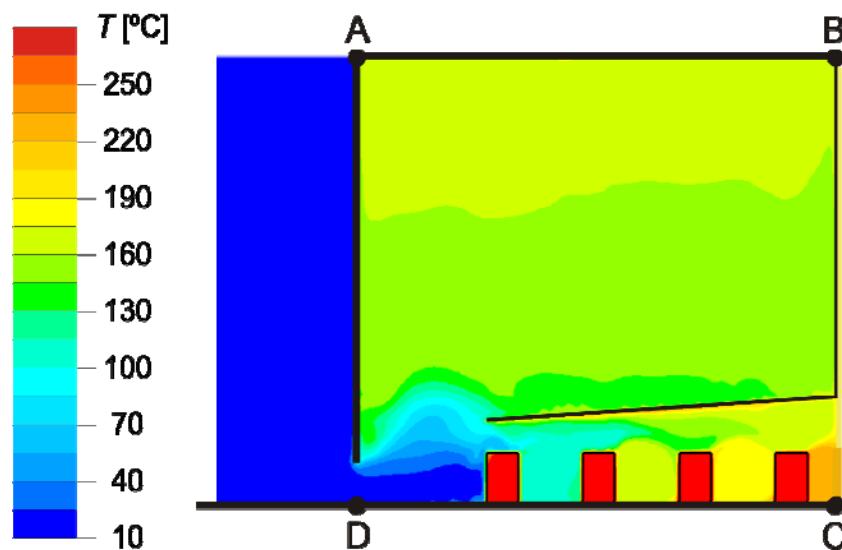


Figura 2.22. Predicción de la distribución de temperatura en la solución técnica (plano ABCD como en la figura 2.15)

2.3.3 Viabilidad

El proceso industrial continuo analizado, que es la última etapa en la refrigeración en una planta de desbastes, produce una considerable cantidad de energía térmica que no se utiliza en la actualidad. De acuerdo con las estadísticas de producción anual de la acería estudiada, una estimación conservadora de la potencia media de calor residual disponible para su absorción es de 9 MW. Cerca de la planta industrial, hay un número de posibles usuarios externos para emplear el calor residual, que en su conjunto requieren una potencia térmica del orden de 1,1 MW en invierno y 0,5 MW en verano (durante el día). El aire caliente restante también se puede utilizar como fuente de calor adicional para otros procesos internos de la siderurgia, pero el análisis específico y las modificaciones posteriores en las instalaciones actuales están más allá del alcance del presente estudio. Una instalación especial se ha propuesto para la recuperación de energía térmica y su distribución a los usuarios externos. Esta instalación implica modificaciones en la nave de refrigeración en sí, montaje de tuberías, intercambiadores de calor y otros equipos de circulación de fluidos, y obra civil. La tabla 2.10 muestra la estimación de la distribución porcentual de los costes para cuatro grupos principales de ingeniería. El coste total de ingeniería (excluyendo los costes financieros, de seguros y de licencia) se ha estimado en 660.000 €.

Tabla 2.10. Distribución porcentual de los costes de ingeniería

Elemento	Coste (%)
Equipo en las instalaciones de enfriamiento de slabs: campanas, conductos, paneles abatibles...	18
Línea de aire caliente: conductos, válvulas, intercambiador de calor principal, ventilador, extractor	26
Línea de agua: tuberías, bombas, obra civil	40
Distribución a los usuarios: intercambiadores de calor secundarios, tuberías, bombas	16

Desde una perspectiva operativa, el proyecto tiene que ser coordinado entre la empresa siderúrgica que es propietaria de la instalación de refrigeración y el operador energético que se encarga del suministro a los clientes (figura 2.19), de manera que se garantiza el suministro incluso si eventualmente la planta industrial no puede proporcionar

suficiente energía térmica para satisfacer la demanda de los clientes. Desde el punto de vista del desarrollo del proyecto, sin embargo, es muy conveniente que las empresas e instituciones locales y/o regionales establezcan una asociación especial en el que posean la titularidad del sistema DH (Ajah et al. 2007).

Los beneficios previstos dependerán de las fluctuaciones de precios en el mercado energético y de las tarifas especiales que deben aplicarse a cada tipo de cliente. Teniendo en cuenta la demanda de energía que figura en la tabla 2.9 y una política de descuentos para el usuario final (Sjödin y Henning 2004) con respecto a los precios que actualmente se establecen por parte del mayor operador energético en la región, los rendimientos anuales mínimos pueden estimarse en 200.000 €. Después de deducir los costes de operación y mantenimiento, el periodo de recuperación previsible para la inversión total del proyecto, incluyendo la parte de ingeniería (tabla 2.10) y los costes financieros, se puede estimar en 6 años en base a una estrategia de financiación conservadora. Aunque este periodo de amortización puede ser considerado alto desde una perspectiva puramente contable, hay otros beneficios a tener en cuenta, tales como:

- Las necesidades de protección del medio ambiente y reducción de la dependencia energética respecto a fuentes convencionales, están impulsando políticas en cada país, para ser gradualmente más exigentes en términos de eficiencia energética, por ejemplo a través de impuestos sobre la energía, reglamentos de residuos que afectan al sistema energético o los derechos de emisión, como se describe para el caso de Götteborg (Holmgren 2006). Esta tendencia es particularmente reseñable en el campo de las industrias de energía intensiva (Hasanbeigi et al. 2013; Sivill et al. 2013; Thollander 2013). Por lo tanto, es de esperar que no tomar medidas de ahorro energético como las que se proponen en este documento, puede dar como resultado el cierre de fábricas en el corto plazo.
- Por otra parte, las administraciones públicas deben favorecer este tipo de acciones para fomentar el ahorro de energía y protección del medio ambiente (Chubbs y Steiner

1998), mediante adecuadas políticas de incentivos (es decir, exenciones fiscales y préstamos blandos) que contribuyen a disminuir el periodo de amortización.

- Además, las empresas que participan en el proyecto obtendrían un beneficio significativo en términos de proyección de imagen, ya que son empresas respetuosas con el medio ambiente y que promueven medidas de eficiencia energética. Esta imagen se ve reforzada por el efecto amplificador del desarrollo de la "Isla de la Innovación", a la que está asociado este estudio DH. A su vez, el proyecto también contribuirá a reforzar el concepto y la proyección posterior del entorno de la "Isla de la Innovación".

Con base a lo anterior, se puede concluir que el proyecto es técnica y económicamente viable, y, por otra parte, puede proporcionar otros beneficios intangibles de interés para las empresas promotoras y, también, desde la perspectiva de entorno social.

3. Conclusiones

Se ha realizado un estudio sobre las posibilidades de recuperación de energía residual en industrias de proceso continuo, en particular de la industria siderúrgica de la región asturiana. De acuerdo con los objetivos inicialmente planteados para la Tesis, el estudio ha tenido una primera parte de carácter general que se ha basado en la recopilación, comparación y análisis de las distintas tecnologías de aprovechamiento de energía residual en uso en distintos tipos de industria, a fin de proponer transferencias o sinergias tecnológicas. Y ha tenido una segunda parte en la que se han realizado dos propuestas concretas de sistemas de recuperación de calor residual para uno de los procesos con mayor potencial de mejora de eficiencia energética: el enfriamiento de productos intermedios de acería y en particular de los slabs de colada continua. En ambos casos se realizaron simulaciones numéricas (con software CFD) del comportamiento de los sistemas fluido-térmicos variando distintos parámetros, a fin de optimizar la instalación. Así mismo se exploró la aplicación de un sistema de recuperación de calor como fuente energética para alimentar una red de district heating en Avilés, discutiéndose las opciones de viabilidad.

A continuación se enumeran las principales aportaciones y conclusiones derivadas del estudio, y se proponen nuevas líneas futuras de actuación.

3.1 Tecnologías de aprovechamiento de energía residual en industrias de proceso continuo

1. Concepto de tecnologías *Waste-to-Energy* (WtE). Aunque habitualmente el término WtE se ha empleado en referencia a la incineración de residuos sólidos, casi siempre en el ámbito de basuras municipales, realmente se puede considerar como un grupo más amplio de tecnologías que también incluyen a las tecnologías de aprovechamiento de energía residual en las industrias de proceso continuo, y así se ha propuesto en este estudio. En concreto el nuevo grupo de tecnologías WtE pasa a englobar todas las tecnologías que convierten, transportan, gestionan y recuperan o reutilizan la energía procedente de cualquier tipo de residuo (sólidos, líquidos, gases o directamente calor residual) en un proceso industrial continuo. Es pues un grupo emergente que reúne diversas tecnologías afines entre distintos tipos de procesos industriales y que posee entidad propia para las grandes industrias consumidoras de energía, dentro del extenso concepto de Tecnologías de Energía Limpia o *Clean Energy Technologies*.

2. Clasificación de tecnologías por sector y tipo de proceso. Como resultado del análisis sistemático de tecnologías WtE en uso o propuestas en las industrias de proceso continuo, se elaboraron clasificaciones estructuradas (por proceso industrial idóneo, usos típicos y factores clave) que ofrecen una información sintetizada de interés práctico para la toma de decisiones y acciones de los departamentos de I+D+i internos y externos a las industrias, en sus líneas de investigación, actuales y futuras, relacionadas con la eficiencia y el ahorro energético.

3. Identificación de sinergias tecnológicas. Como consecuencia del análisis por un lado de las tecnologías de aprovechamiento energético propias de algunas industrias y por otro de los propios procesos productivos, se pueden establecer correspondencias teóricas que a veces sí han tenido su traslación a la práctica y otras veces no. Ello da pie a la identificación de posibles sinergias novedosas para extrapolar tecnologías de aprovechamiento energético procedentes de un ámbito determinado. En concreto en esta Tesis se ha propuesto el grupo de sinergias relacionadas de la tabla 2.7 (apartado 2.1.6).

3.2 Aprovechamiento del calor residual de los slabs de colada continua

1. Zonas de acería con mejor potencial de aprovechamiento energético. De acuerdo con los objetivos propuestos para la Tesis, se comenzó por considerar los procesos y localizaciones de acería (industria siderúrgica) más idóneos para implantar sistemas de recuperación energética, teniendo en cuenta la magnitud energética disponible y también las posibilidades de actuación con mínima interferencia en los procesos básicos de la planta industrial. En concreto se optó por el proceso de enfriamiento de los slabs de colada continua, escogiendo dos zonas o estados de ese proceso:

- (a) Zona de translación de slabs sobre rodillos, entre la operación de oxicorte y la recogida con puente grúa. Propiedades: slabs con alta temperatura (800 °C - 900 °C), poco tiempo de emisión por slab (orden del minuto), riesgo de interferencia medio.
- (b) Zona de apilamiento de slabs en la nave de enfriamiento. Propiedades: slabs con temperatura baja-media (de ambiente a 500 °C), emisión durante horas-días, riesgo de interferencia muy bajo.

2. Metodología de estudio. Los procesos de aprovechamiento de interés en el estudio están dominados por fenómenos de transferencia de calor por convección y, sobre todo, por radiación. La complejidad que caracteriza a estos fenómenos, junto a la imposibilidad de realizar pruebas experimentales en el laboratorio y aún menos en la planta industrial, hizo que se optara por la simulación numérica siguiendo los siguientes pasos:

- i) Propuesta de un sistema general de captación del calor emitido por los slabs, basado en el calentamiento de agua.
- ii) Construcción de un modelo discretizado y simple de los sistemas de interés, adecuado para efectuar simulaciones CFD con el software Fluent, incorporando cálculos de radiación de tipo *surface-to-surface* (S2S, sin participación de fluidos).

- iii) Simulación de casos para realizar análisis de sensibilidad respecto a los parámetros de cálculo (extensión del dominio, densidad de mallado, condiciones de contorno, modelo de turbulencia, condiciones de convergencia, etc.) y establecer la configuración óptima de parámetros de cálculo.
- iv) Simulaciones del caso de interés con variación de los principales parámetros físico-geométricos del sistema de recuperación, para proponer el diseño más adecuado.

Ante la complejidad de los cálculos y el número de casos a simular, el uso de modelos tridimensionales habría requerido unas necesidades de equipamiento informático (memoria y velocidad de proceso) de las que no se pudo disponer. Por ello, se optó por aprovechar las simetrías dominantes en cada dominio de estudio y recurrir a modelos simplificados 2D, con discretizaciones de distinto grado de refinamiento según zonas. Esta forma de proceder demostró ser muy eficaz para los propósitos del estudio, proporcionando en períodos de ejecución cortos (horas) predicciones de precisión razonable a la luz de su contraste con las medidas de temperatura de slab obtenidas con cámara termográfica en las condiciones actuales de la planta industrial.

3. Principales parámetros de cálculo seleccionados para las simulaciones CFD. Dado que es dominante el fenómeno de transferencia de calor por radiación, sobre todo en el caso de la zona de traslación de slabs sobre rodillos (a), las predicciones de las simulaciones efectuadas (con un modelo S2S) son especialmente sensibles al número de facetas emisoras-receptoras en que se divide cada superficie radiante y, sobre todo, en los coeficientes de emisividad asignados (para los que la incertidumbre es mayor). En segundo lugar, también son significativos los flujos de calor por convección, sobre todo en la zona de apilamiento de slabs en la nave de enfriamiento (b) por involucrar temperaturas más bajas, lo que hace que las predicciones también muestren cierta sensibilidad respecto al modelo de turbulencia. En concreto se adoptó el modelo $k-\omega$ con opción de auto-ajuste para zonas de bajo número de Reynolds, por observarse que con este modelo de turbulencia se obtenían resultados similares al de otros modelos pero con una convergencia hacia la solución final más estable y rápida.

Para ambas zonas (a) y (b) se adoptaron condiciones de simetría con las que se pudo reducir el dominio de estudio a la mitad. Por otro lado, los estudios de sensibilidad respecto al número de celdas del dominio mostraron que discretizaciones del orden de 30.000 celdas ya eran suficientes para asegurar independencia respecto a la densidad de la malla de cálculo. Para los casos de simulación de la zona (a), el dominio se discretizó solo con celdas rectangulares, mientras que para los casos de la zona (b) se empleó una combinación de celdas rectangulares y triangulares.

4. Sistema propuesto para la zona (a). Para la zona de desplazamiento de los slabs sobre rodillos se ha propuesto la disposición de una capota con faldones laterales, apoyados en las cajas de tracción de rodillos, a modo de escudo térmico a lo largo del recorrido de los slabs (desde el oxicorte hasta el área de recogida con puente grúa), con conductos de agua adosados a la capota. Para los slabs de referencia (0,3 m de espesor, 1,5 m de ancho y una emisión térmica de 160 kW por m de longitud, correspondientes con temperaturas superficiales de 800 °C - 850 °C), la capota propuesta tendría una separación de 0,3 m por encima del slab, 0,5 m a los faldones laterales y 0,8 m del slab al suelo, y daría lugar a un suministro continuo de agua caliente con incrementos de temperatura de hasta 80 °C (en función del caudal) y eficiencia térmica del orden del 60 %. Esa agua caliente se emplearía en otros procesos internos de la planta industrial. La escasa duración del trayecto hace que la disminución de temperatura del slab sea poco significativa (del orden de 20 °C).

5. Sistema propuesto para la zona (b). Para la zona de apilamiento de slabs en la nave de enfriamiento se ha propuesto la disposición de campanas sobre las pilas, de modo que acumulen el aire caliente (por convección en la superficie de los slabs y en la campana) y lo dirijan al conducto de extracción. Esta propuesta está inspirada en los sistemas que ya se tienen en uso en las plantas de sínter de la industria siderúrgica en Asturias. Para el caso de interés, se trata de campanas móviles, desplazables sobre raíles a lo largo de la nave, de modo que se puedan retirar fácilmente para reducir al mínimo la interferencia con las operaciones habituales en la instalación. La propuesta se completa con un sistema de paneles basculantes para la apertura o cierre parcial del contorno

lateral de la nave, a fin de poder favorecer o impedir el establecimiento de corrientes de ventilación natural y, si así se desea, poder tener un control adicional sobre la velocidad de enfriamiento de los slabs. En concreto, asumiendo una emisión promedio de 9 MW para el conjunto de las pilas de slabs presentes en la nave industrial, el sistema permitiría el calentamiento y extracción (mediante tiro forzado con ventilador) de hasta 25 kg/s de aire a 185 °C, con una recuperación de calor cercana al 50 %.

6. Aplicación para *district heating* (DH). Para el caso del calor recuperado en la zona (b) se ha efectuado un estudio específico analizando su aplicación para el suministro de energía térmica a un sistema de DH. Concretamente, se escogió el enclave junto a la ría de Avilés conocido como “Isla de la Innovación”, en el que se encuentra el Centro Cultural Internacional Oscar Niemeyer, por su relativa cercanía a la acería avilesina y por ser una zona de especial promoción como referencia de la ciudad, previéndose en ella varias dotaciones urbanísticas a medio plazo que serían potenciales usuarios de un sistema de calefacción y ACS mediante DH. La demanda de energía térmica prevista alcanzaría los mayores niveles en el periodo invernal, en torno a 1.1 MW, que es muy inferior a la capacidad de suministro desde la planta considerada (nave de enfriamiento de slabs). Para este suministro se ha propuesto un sistema formado por intercambiadores de calor aire-agua, tuberías con aislamiento térmico y bombas de circulación entre otros elementos.

7. Viabilidad y condicionantes de la aplicación para DH. Desde el punto de vista económico, el coste global de la instalación, estimado en unos 660 k€, tendría un periodo de amortización de 6 años, por lo que su interés económico es cuando menos cuestionable. Esto es una característica común de este tipo sistemas, a lo que se ha de añadir la necesidad de coordinación entre la empresa siderúrgica y una empresa que actúe como operador energético. Sin embargo, pueden existir otros beneficios intangibles, cada vez de mayor importancia, como son la proyección de imagen corporativa como empresa verde o eco-amiga, el acceso a incentivos de la administración vía deducción de impuestos o créditos blandos o, simplemente, la adaptación a las regulaciones nacionales o europeas en materia de ahorro energético y

emisiones de gases. La puesta en valor de estos intangibles ha de ser el motor para emprender acciones de aprovechamiento energético como la estudiada.

3.3 Trabajos futuros

Se proponen los siguientes:

1. Mejora de los modelos de simulación numérica que se han desarrollado en esta Tesis, contemplando modelos 3D para incluir los efectos de borde de comienzo y fin de slabs, así como modelos no estacionarios, para incluir en la simulación el efecto del progresivo enfriamiento de los slabs, por ejemplo si se realizara un confinamiento individual de pilas de slabs en cabinas de absorción térmica.
2. Diseño y construcción de un banco de pruebas a escala reducida en el que sea factible realizar ensayos de recuperación de calor con el tipo de sistemas propuestos en esta Tesis u otros nuevos, a fin de contrastar las predicciones teóricas derivadas de los modelos de simulación CFD y verificar los parámetros de cálculo (por ejemplo los coeficientes de emisividad).
3. Estudiar otros procesos en la industria siderúrgica con potencial para efectuar un aprovechamiento ventajoso de energía residual, proponiendo tecnologías adecuadas para la recuperación de esa energía (por ejemplo por sinergias con otros procesos o industrias), y analizar otros usos de la energía recuperada, bien para generación eléctrica o bien como energía térmica en la propia planta industrial.

4. Referencias

ACC (2012) Guide to the Business of Chemistry. American Chemistry Council, Washington.

Ajah A, Patil A, Herder P, Grievink J (2007) Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system. Applied Thermal Engineering 27:1158–1164. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.02.039.

Alcoa (2013). Avilés Smelter <http://www.alcoa.com/locations/spain--aviles/en/about/profile.asp>. Acceso en enero de 2013.

Álvarez E, Gutiérrez AJ, Suárez JM, & Xiberta J (2012). Steel mil slags energy potential: the case of the steel factory of Arcelor-Mittal in Asturias (Spain). Clean Techn Environ Policy 14:869-877. Doi:10.1007/s10098-012-0455-8.

Ammar Y, Joyce S, Norman R, Wang Y, Roskilly A (2012) Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. Applied Energy 89:3–20. Doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.003.

APP (2007) The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook. APP for Clean Development and Climate (December 2007).

APP (2008) Steel task force, action plan. Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate (November 2008). U.S. Department of Energy, Washington.

ArcelorMittal (2009) Investor presentations http://www.arcelormittal.com/---corp/~/media/Files/A/ArcelorMittal/investors/presentations/investor-days/2009/627-27-1-0-ArcelorMittalAsturias_200903.pdf. Acceso 21 de febrero de 2014.

ArcelorMittal (2010) ArcelorMittal's Sintering Process Projects. Global R&D ArcelorMittal.

ArcelorMittal (2011) Energy Saving Technologies in Steel Process. Global R&D ArcelorMittal.

ArcelorMittal (2013) At a glance. <http://www.arcelormittal.com/corp/who-we-are/at-a-glance>. Acceso en febrero de 2013.

Arens M (2010) Energy efficiency and CO₂ emissions reduction in the steel industry, EFONET Workshop 4.3: Increasing energy efficiency in industrial processes. Berlin, 2010.

Balomenos E, Gianopoulou I, Panias D et al (2009) ENEXAL: Novel technologies for enhanced energy and exergy efficiencies in primary aluminium production industry. MJoM 15:203-217.

Bellevrat E, Menanteau P (2008) Introducing carbon constraint in the steel sector: ULCOS scenarios and economic modeling. Proceedings of the 4th Ulcos seminar, 1-2 October.

BOE (2003) Anexo 5 R.D. 865/2003, Criterios higiénicos-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Ministerio de Sanidad y Consumo, Madrid.

Bolwerk R (2005) Co-processing of waste and energy efficiency by cement plants. Presentation in session: innovative energy efficiency examples of different industrial sectors—energy efficiency in the cement, metal and petrochemical industry, Council Government of Münster.

BREF (2010) Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. European Commission JRC-IPTS, IPPC.

CEMBUREAU (1999) Best available techniques for the cement industry. Contribution from the Cement Industry to the Exchange of Information and Preparation of the IPPC BAT Reference Document for the Cement Industry. European Cement Association, Brussels.

CEMBUREAU (2006) Cembureau contribution to the cement & lime BREF revision, ‘Specific energy consumption’. European Cement Association, Brussels.

CEMBUREAU (2009) Activity Report 2008. European Cement Association, Brussels.

Chan I (2010) Energy solutions for american industry. EERE, U.S. Department of Energy.

Chubbs ST, Steiner BA (1998) Life cycle assessment in the steel industry. Environmental Progress 17:92-95. Doi:10.1002/ep.670170215.

CSI (2009) Development of State-of-the-Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead. Cement Sustainability Initiative, Duesseldorf.

CTE (2009) DB HE4 Ahorro de Energía. CTE, Madrid.

de Abajo N, Diez AB, Lobato V, Cuesta SR (2004) ANN Quality Diagnostic Models for Packaging Manufacturing: An Industrial Data Mining Case Study, in Proceedings of The 2004 ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining, ACM Press.

EC (2008) European Energy and Transport Trends to 2030 — Update 2007. Directorate - General for Energy and Transport. European Commission, Luxembourg.

EC (2010) IPPC Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. European Commission, Luxembourg.

Ecofys (2009) Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Öko-Institut. Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the Iron and Steel industry. November 2009.

EERE (2007) U.S. energy requirements for aluminum production. Historical perspective, theoretical limits and current practices. U.S. Department of Energy, Washington.

EHS (2007) Environmental, health, and safety guidelines for cement and lime manufacturing. International Finance Corporation, Washington.

Eppich R, Naranjo RD (2007) Implementation of Metal Casting Best Practices. EERE, U.S. Department of Energy, Washington.

Euroheat & Power (2014) Heating without global warming? Frequently Asked Questions about District Heating and District Cooling. www.euroheat.org. Brussels.

EU (2010a) Industrial Technologies conference: integrating nano, materials and production. Theme of the EU Seventh RTD Framework Programme. The Industrial Technologies conference held in Brussels.

EU (2010b) Final Report of the Set-Plan workshop on Technology Innovations for Energy efficiency and Greenhouse Gas (GHG) emissions reduction in the Iron and Steel Industries in the EU-27 up to 2030.

Fernández JM, Santolaria C, Rodríguez-Somoano J, Álvarez M (2009) Multiphase modelling of the steel grade transition in a continuous casting tundish. Proceedings of ASME Fluids Engineering Summer Meeting 1:2183-2194. Doi:10.1115/FEDSM2009-78353.

- Fluent (2006) Fluent Inc. User's guide. 10 Cavendish Court, Lebanon, NH03766, 2006.
- Gielen D, Podkanski J (2006) Technological Potentials for CO₂ Emission Reduction in the Global Iron and Steel Industry. IEA presentation. 2 March 2006. Sydney.
- Glatt S (2010) Changing the Way Industry Uses Energy, NASEO annual meeting. ITP, U.S. Department of Energy, Washington.
- Guo ZC, Fu ZX (2009) Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. Energy 35:4356-4360. Doi:10.1016/j.energy.2009.04.008.
- Gutiérrez AJ, Álvarez E, Río JL, Suárez JM, Xiberta J (2013) Design and evaluation of a heat recuperator for steel slags. Applied Thermal Energy 56:11-17. Doi:10.1016/j.aplthermaleng.2013.03.019.
- Hasanbeigi A, Lobscheid A, Lu H, Price L, Dai Y (2013) Quantifying the co-benefits of energy-efficiency policies: A case study of the cement industry in Shandong Province. Science of the Total Environment 458:624-636. Doi:10.1016/j.scitotenv.2013.04.031.
- Hayashi D, Krey M (2007) Assessment of clean development mechanism potential of large-scale energy efficiency measures in heavy industries. Energy 32:1917-1931. Doi:10.1016/j.energy.2007.03.003.
- Hoenig V, Twigg C (2009) Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead.
- Holmgren K (2006) Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources - the case of Göteborg. Applied Energy 83:1351-1367. Doi:10.1016/j.apenergy.2006.02.001.
- IDAE (2011) Análisis del Consumo Energético del Sector Residencial en España. Informe Final. Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE, Madrid.

IEA (2006) Taylor M, Tam C, Gielen D. Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry. International Energy Agency, Paris.

IEA (2007) Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions. International Energy Agency, Paris.

IEA (2008a) World energy balances: 1971-2006. International Energy Agency, Paris.

IEA (2008b) Energy technology perspectives—scenarios and strategies to 2050. International Energy Agency, Paris.

IEA (2008c) Greenhouse Gas R&D programme, CO₂ Capture in the Cement Industry, Technical Study. International Energy Agency, Paris.

IEA (2009a) Key world energy statistics. International Energy Agency, Paris.

IEA (2009b) Cement technology roadmap, carbon emissions reductions up to 2050. International Energy Agency, Paris.

IHS (2011) IHS global insight report: steel (world industry).

ITP (2005) Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry. U.S. Department of Energy, Washington.

ITP (2006) Engineering scoping study of thermoelectric generator packages for industrial waste heat recovery. U.S. Department of Energy, Washington.

ITP (2008) Waste heat recovery. Technologies and opportunities in U.S. industry. U.S. Department of Energy, Washington.

Lehigh Hanson (2011) Cement Manufacturing Process [www.leighhansoncanada.com/products/cementprocess.aspx](http://www.lehighhansoncanada.com/products/cementprocess.aspx). Canada.

Li C, Thomas BG (2002) Maximum casting speed continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation. 85th Steelmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (held in Nashville, TN, March 10-13, 2002), pp. 109-130.

Manning CP, Fruehan RJ (2001) Emerging technologies for iron and steelmaking. JOM 53:36-43. Doi:10.1007/s11837-001-0054-3.

Mansouri N, Mirhosseini A, Saboonchi A (2012) Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process. Appl Therm Eng 38:91-104. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.12.049.

Matsuda K, Tanaka S, Endou M, Iiyoshi T (2012) Energy saving study on a large steel plant by total site based pinch technology. Appl Therm Eng 43:14-19. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.11.043.

Moya JA, Pardo N (2013) The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 iron and steel industry under different payback periods. J Clean Prod 52:71-83. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.028.

New European Economy (2013) Avilés in the Atlantic Arc. - <http://www.neweuropeanconomy.com/home-mainmenu-51/fdi-mainmenu-59/556-aviles-in-the-atlantic-arc>. Acceso en enero de 2013.

Nobari AH, Serajzadeh S (2011) Modeling of heat transfer during controlled cooling in hot rod rolling of carbon steels. Appl Therm Eng 31:487-492. Doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.10.003.

Okazaki T, Yamaguchi M (2011) Accelerating the transfer and diffusion of energy saving technologies steel sector experience — Lessons learned. Energy Policy 39:1296–1304.

Pardo N, Moya JA, Vatopoulos K (2012) Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO₂ Emissions in the EU Iron & Steel Industry. JRC scientific and policy reports. European Commission.

Saint-Gobain (2013) Glass. <http://www.saint-gobain-glass.com/>. Acceso en enero de 2013.

Schumacher K, Sands RD (2007) Where are the industrial technologies in energy-economy models? An innovative CGE approach for steel production in Germany. Energy Economics 29:799–825. Doi:10.1016/j.eneco.2006.12.007.

Shamsi MRRI, Ajmani SK (2010) Analysis of mould, spray and radiation zones of continuous billet caster by three-dimensional mathematical model based on a turbulent fluid flow. Steel Res Int 81:132-141. Doi:10.1002/srin.200900103.

Sivill L, Manninen J, Hippinen I, Ahtila P (2013) Success factors of energy management in energy-intensive industries: Development priority of energy performance measurement. International Journal of Energy Research 37:936-951. Doi:10.1002/er.2898.

Sjödin J, Henning D (2004) Calculating the marginal costs of a district-heating utility. Applied Energy 78:1-18. Doi:10.1016/S0306-2619(03)00120-X.

SOTA (1997) State-of-the-art (SOTA) Manual for the glass industry. Air Quality Permitting Program. Department of Environmental Protection, New Jersey.

Suebsomran A, Butdee S (2013) Cooling process on a run-out table by the simulation method. Case Studies in Thermal Engineering 1:51-56. Doi:10.1016/j.csite.2013.07.002

Sunikka MM (2006) Policies for improving energy efficiency in the European housing stock. Sustainable Urban Areas series, IOS Press (Delft University Press), Amsterdam.

- Tanaka K (2012) A comparison study of EU and Japan methods to assess CO₂ emission reduction and energy saving in the iron and steel industry. *Energy Policy* 51:578-585. Doi:10.1016/j.enpol.2012.08.075.
- Tarrés J, Maas S, Scholzen F, Zürbes A (2014) Simulated and experimental results on heat recovery from hot steel beams in a cooling bed applying modified solar absorbers. *J Clean Prod* 68:261–271. Doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.020.
- Thollander P, Rohdin P, Moshfegh B, Karlsson M, Söderström M (2013) Energy in Swedish industry 2020 - current status, policy instruments, and policy implications. *J Clean Prod* 51:109-117. Doi:10.1016/j.jclepro.2013.01.021.
- UNIDO (2010) Renewable energy in industrial applications. An assessment of the 2050 potential. United Nations Industrial Development Organization, Vienna.
- USGS (2012). Mineral Commodity Summaries - Iron and Steel. United States Geological Survey, Washington.
- USGS (2013) Mineral Commodity Summaries (Cement). United States Geological Survey, Washington.
- VDEh (2009) Statistics of the European iron & steel sector. Steel Institute VDEh, Düsseldorf.
- Wang K, Wang C, Lu X, Chen J (2007) Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's Iron and Steel industry. *Energy Policy* 35:2320–2335. Doi:10.1016/j.enpol.2006.08.007.
- Warzecha M (2011) Numerical and physical modelling of steel flow in a one-strand continuous casting tundish. *Metallurgija* 50:147-150.
- WBCSD (2010) Global Cement Database on CO₂ and Energy. World Business Council for Sustainable Development.

World Steel (2009a) Steel and energy-fact sheet energy. World Steel Association, Brussels.

World Steel (2009b) 21st century steel 2008-2009 update. World Steel Association, Brussels.

World Steel (2009c) Steel statistical yearbook 2008. Brussels: World Steel Committee on Economic Studies. World Steel Association, Brussels.

World Steel (2013) Steel turns energy reduction from pipe dream to reality. World Steel Association, Brussels. https://www.World_Steel.org/media-centre/Steel-news/Steel--reducing-energy-use.html. Acceso 26 de marzo de 2014.

World Steel (2014) February 2014 crude steel production. World Steel Association, Brussels. http://www.World_Steel.org/media-centre/press-releases/2014/February-2014-crude-steel-production-.html. Acceso 26 de marzo de 2014.

Worrel E, Galitsky C (2008a) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers. Report no 54036. Revision 2008. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.

Worrell E, Galitsky C, Masanet E, Wina G (2008b) Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry. Environmental Energy Technologies Division, University of California.

Worrell E, Galitsky C, Price L (2008c) Energy Efficiency Improvements for the Cement Industry. Report 72E. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.

Worrell E, Price L, Neelis M, Galitsky C, Nan Z (2008d) World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors. Report-62806. rev2. Lawrence Berkeley National Laboratory.

Wu B, Arnold AM, Xu Z, Arnold E, Downey G, Zhou CQ (2008) CFD analysis of batch-type reheating furnace. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions 6:753-759.

Xu C, Cang D-q (2010) A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. J Iron Steel Res Int 17:1-7. Doi:10.1016/S1006-706X(10)60064-7.

Yellishetty M, Ranjith PG, Tharumarajah A (2010) Iron Ore and Steel Production Trends and Material Flows in the World: Is this really sustainable? Resources, Conservation and Recycling 54:1084-1094. Doi:10.1016/j.resconrec.2010.03.003.

Zhang J, Wang G (2007) Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector. Energy 33:525-537. Doi:10.1016/j.energy.2007.11.002.

Zhang X, Zhou S (2009) The prospect of sensible heat recovery of blast furnace slag. The 7th China Iron and steel annual meeting proceedings.

5. Compendio de Publicaciones

A continuación se incluyen los tres artículos que dan cuerpo a la Tesis Doctoral y que están en revistas indexadas en el JCR.

5.1 Waste-to-energy technologies in continuous process industries

Se presenta la siguiente publicación:

- Villar A, Arribas JJ, Parrondo J (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technologies and Environmental Policy* 14:29-39. DOI: 10.1007/s10098-011-0385-x.

✓ Estado: **Publicado**

Waste-to-energy technologies in continuous process industries

Arturo Villar · Juan José Arribas · Jorge Parrondo

Received: 1 April 2011 / Accepted: 3 May 2011 / Published online: 25 May 2011
© Springer-Verlag 2011

Abstract A range of new waste-to-energy (WtE) technologies in continuous process industries have been analyzed in terms of conversion, energy saving, heat recovery, electricity generation, transportation fuel, storing energy and fuel, environmental emissions, and recycling management. This new group of WtE technologies is an emerging technology group for energy-intensive industries apart from the wide concept of “clean energy technologies”. The current state of WtE technologies has been examined for five representative sectors in continuous industrial processes: iron and steel, cement, primary aluminum production, metal casting, and glass industry. The purpose of the study was to seek synergistic interactions between continuous process industries, with special emphasis on the case of the iron and steel industry. For the purpose of a comparative analysis, waste heat recovery (WHR) technology has been included. A case study in the steel sector is illustrated as a real-world example for solid recovery using WHR in sintering process.

Keywords Waste-to-energy technologies · Continuous process industries · Iron and steel industry · Energy saving · Waste heat recovery

Introduction

The WtE technologies have become a keystone and are increasingly interesting as viewed from both an energy supply perspective and waste management. Globally, energy-intensive industries still emit the largest share of industrial greenhouse gas (GHG) emissions (IEA 2008b). WtE combines several ways of reducing GHG emissions. The term WtE is often used in reference to the incineration of municipal waste. However, in this article, WtE refers to all technologies that convert, transport, manage, and recover or reuse energy from any type of waste (solid, liquid, gas, and heat) in a continuous industrial process. In addition, these technologies have the potential for increasing heat recovery, emissions reduction, electric efficiency, transportation fuel substitution, and storing energy and fuel (Münster and Lund 2009). To our knowledge, no work has been reported in the open literature on WtE technologies in continuous process industries.

On the one hand, the global crisis has shown the importance of sustainable development. Tomorrow's industries must simultaneously address economic, social, and ecological dimensions, with processes that are as lean and clean as possible. In the medium and long term, “zero waste” and “zero emissions” will be the goals for the “factories of the future”. On the other hand, under the pressure of rising world population and increasing lifestyle aspirations, global energy consumption is expected to double from the present level of 15 TW by 2050, and to triple by 2100. Thus, this will put a massive strain on Earth's resources (EU 2010).

The overall objective of the work presented was to investigate synergies between large energy consumers to achieve environmental and energy-saving technologies. In other words, the focus of this article was the analysis of the optimal use of WtE technologies in continuous process

A. Villar (✉) · J. Parrondo
Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, Edificio Zona Este, Campus Universitario de Gijón, 33271 Gijón, Spain
e-mail: arturovillarmenendez@gmail.com

J. J. Arribas
Global R&D ArcelorMittal, 33400 Avilés, Spain

industries. The core of the first part of the article is the application of WtE technologies in the steel sector. The second section presents a summary of WtE technologies for a branch of general manufacturing industries with continuous processes. Finally, this study brings about a synergistic interaction in a matrix analysis among energy-intensive industries and identifies potentially energy-saving R&D areas of new WtE technologies.

Iron and steel industry

The iron and steel industry provides the backbone for construction, transportation, and manufacturing, and has become the material of choice for a variety of consumer products. Moreover, markets for iron and steel are expanding. As a result, this sector is critical to the worldwide economy.

The production process for manufacturing iron and steel is energy-intensive and requires a large amount of natural resources. The iron and steel industry accounted for 19% of final energy use and about a quarter of direct CO₂ emissions from the industry sector (IEA 2007). Energy constitutes a significant portion of the cost of iron and steel production, up to 40% in some countries. The majority of emissions generated by iron and steel production are due to coal use and other energy resources as a key process input, which means that increasing energy efficiency is the most cost-effective way to improve environmental performance (APP 2008). The aggregate carbon dioxide (CO₂) emissions from the global iron and steel industry have reached roughly two billion tons annually, accounting for approximately 5% of global anthropogenic CO₂ emissions (APP 2007).

The sector is divided into two basic types of production. First, standard processes with coke-making, iron-making, steel-making, and subsequent forming and finishing operations, which are referred to as “fully integrated production”. Alternatively, a second type of production without coke-making or iron-making operations is mainly associated to metal scrap by applying electric arc furnace (EAF) technology, and is commonly referred to as “mini-mills” (EPA 2011). The integrated mill accounts for two-thirds of steel production (IEA 2007).

The production of steel requires a number of steps which can include: agglomeration processes (sintering, pelletizing, and briquetting), coke-making, iron-making (blast furnace, direct reduction, and direct iron-making), steel-making (basic oxygen furnace or BOF, EAF), and forming and finishing processes (ladle refining, casting, rolling, forming and finishing) (APP 2007).

Coke, which is the fuel and carbon source at integrated mills, is produced by heating coal in the absence of oxygen at high temperatures in coke ovens. Pig iron is then

produced by heating the coke, iron ore, and limestone in a blast furnace. In a BOF, molten iron from the blast furnace is combined with flux and scrap steel where high-purity oxygen is injected. Moreover, in an EAF the input material is primarily scrap steel, which is melted and refined by passing an electric current from the electrodes through the scrap.

The sector has multi-media impacts, including air emissions (carbon oxide or CO_x, nitrogen oxide or NO_x, sulfur oxide or SO_x, and particulate matter or PM_x), wastewater contaminants, hazardous wastes, and solid wastes. The major environmental impacts from integrated steel mills are from coke-making and iron-making. Furthermore, the energy used by “mini-mills” generates GHG from power generation (EPA 2011).

WtE technologies in the iron and steel industry

The iron and steel industry is faced with a wide range of environmental concerns that are fundamentally related to the high energy requirements, material usage, and the by-products associated with generating enormous quantities of steel (Manning and Fruehan 2001).

Figure 1 presents a layout of the current state-of-the-art in WtE technology in the iron and steel industry as collected from Asia Pacific Partnership (2007) and Arcelor-Mittal (2011).

Table 1 describes one by one these WtE technologies (showed in Fig. 1) in terms of iron and steel processes, typical uses and key factors (energy saving, environmental emission, commercial status, and other benefits). Fundamentally, the data have been gathered from Asia Pacific Partnership (2007).

Continuous process industries

Cement industry

Cement is an essential material for social infrastructure and has played a vital role in economic development around the world. The nonmetallic mineral sub-sector accounts for about 9% of global industrial energy use, of which 70–80% is used in cement production. The cement industry uses energy-intensive production processes and energy typically represents 20–40% of the total production costs (IEA 2007). Fossil fuels (e.g. coal, oil, or natural gas) are the predominant fuels used in the cement industry. Consequently, the aggregate amount of CO₂ emitted from the global cement industry has reached about 2.2 billion tons, accounting for approximately 5% of global man-made CO₂ emissions. However, alternative fossil fuels such as natural

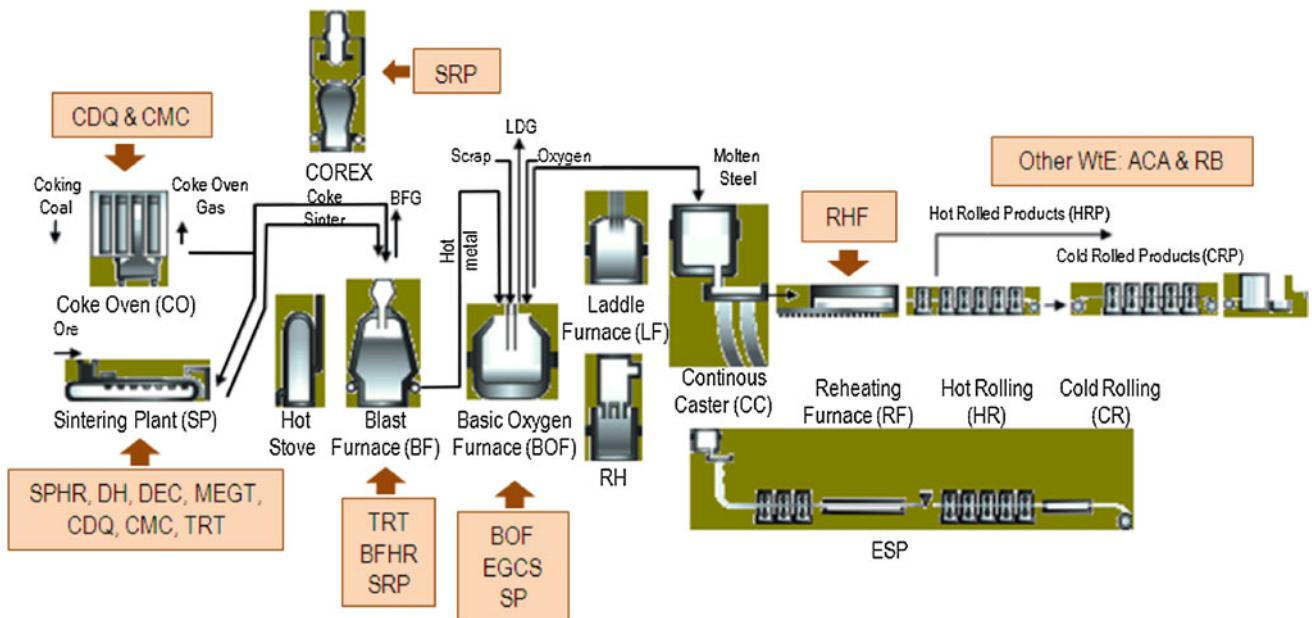


Fig. 1 Layout of WtE technologies in the iron and steel production processes

gas and biomass fuels have been increasingly used as a key factor to reduce CO₂ emissions in the recent years (IEA 2009).

The production of cement involves four steps: preparation of a material mixture, thermal formation of clinker in the cement kiln, clinker cooling, and finally grinding and mixing with additives to the cement quality required (Bolwerk 2005). Dry process kilns produce almost 80% of cement manufactured in Europe (EHS 2007). Table 2 exhibits the particular WtE technologies in the cement industry, which have mainly been obtained from International Energy Agency (2009).

Primary aluminum production industry

More than half of the energy used in nonferrous metals is for primary aluminum production (IEA 2007). Aluminum is the third most abundant element (following oxygen and silicon) and represents 8% of the Earth's crust (Balomenos et al. 2009). Because of its chemical reactivity, aluminum is never found in nature as an isolated element but always in its oxidized form as a component of a variety of minerals. The steps for primary aluminum production are: bauxite mining, production of alumina from bauxite, production of carbon anodes, electrolysis, and rolling. Electrolysis is the most energy-intensive step in the production of aluminum (IEA 2007) and is responsible for the generation of large amounts of CO₂ (Balomenos et al. 2009). The pre-eminent WtE technologies are outlined in Table 3.

Metal-casting industry

The metal-casting industry produces both simple and complex parts that meet a wide variety of manufacturing needs. Metal-casting foundries range in size from small job shops to large manufacturing plants that turn out thousands of tons of castings each day (ITP 2005). Cast metal products are found in 90% of manufactured goods and equipment, from critical components for aircraft, automobiles, defense equipment to power generation equipment, industrial machinery, and construction materials (Eppich and Naranjo 2007).

The most common process used for casting is green sand molding, accounting for approximately 60% of castings produced. The major energy-consuming processes in metal casting include melting metal (about 55% of energy consumption), core making, heat treating, and post-casting operations (Eppich and Naranjo 2007). Generation of waste is directly related to the type of material melted (cast iron, steel, brass/bronze, or aluminum) (ITP 2005). Major information (Table 4) has been collected from Industrial Technologies Program (2005).

Glass industry

The glass industry consists of five segments: flat glass, glass containers, pressed and blown glass, wool fiberglass, and products of purchased glass. Approximately, 57% of all glass melted is produced by the glass container segment.

Table 1 Matrix of WtE technologies, uses and benefits in the iron and steel industry

WtE technology	Iron and steel process	Typical uses	Key factors
Sinter plant heat recovery (SPHR)	Sintering	Preheat the combustion air for the burners and generate high-pressure steam	Fuel savings in steam and coke with increased electricity use. Reduction in emissions (NOx, SOx, dust), coke and recovered exhaust heat. Commercial status: mature
District heating (DH)	Sintering	Waste heat in the steel industry but also for sharing resources with nearby residential and commercial buildings	Method for saving energy. Low temperature heat and waste heat. Economical benefits and a great reduction in total fuel requirements. Commercial status: mature
Dust emissions control (DEC)	Sintering	By sending waste off-gas to Electrostatic Precipitators (ESPs) producing clean waste gas and increasing the quantity of steam recovery	Over 98% efficiency, reducing dust load in off-gas of a typical plant from 3,000 mg/m ³ to about 50 mg/m ³ . ESPs removal of fine dust may reduce particulate matter emission levels at sinter plants to about 50–150 mg/m ³ . ESPs cause increased energy consumption of about 0.002 to 0.003 GJ/t sinter. Commercial status: mature
Main exhaust gas treatment (MEGT)	Sintering	SOx, NOx, dust, and dioxins contaminants are processed, absorbed, decomposed, and/or collected as non-toxic by-products to increase the quantity of steam recovery, and improve total fuel savings	SOx is absorbed and recovered as useful by-product. NOx is decomposed to nitrogen, water and oxygen by ammonia. Dust is collected in activated coke. Dioxins are collected or absorbed in activated coke and decomposed at 400°C with no-oxygen. Commercial status: mature
Coke dry quenching (CDQ)	Sintering coke-making	The heat is used to produce steam, which may be used on-site or to generate electricity. Recovers the sensible heat of the coke. As an environmental control technology	Energy recovered is approximately 400–500 kg steam/t, equivalent to 800–1200 MJ/t coke. Others estimate energy conservation through steam generation (0.48 t/t coke). Decreased dust, CO ₂ and SOx emissions. Increased water efficiency. Better quality coke production, improved strength of coke by 4%. Commercial status: mature
Coal moisture control (CMC)	Sintering coke-making	Waste heat from the coke oven gas to dry the coal used for coke-making. The coal can be dried using the heat content of the coke oven gas or other waste heat sources	Fuel savings of approximately 0.3 GJ/t. Coke quality improvement (about 1.7%). Coke production increase (about 10%). Shorter cooking times. Decrease in water pollution (ammonia reduction). Commercial status: emerging
Top-pressure recovery turbine (TRT)	Sintering iron-making	TRT is a power generation system, which converts the physical energy of high-pressure blast furnace top gas into electricity by using an expansion turbine	Generates electric power of approximately 40–60 kWh/t pig iron. Excellent operational reliability, abrasion resistant. Suitable for larger furnaces and higher temperature gases compared to bag filter systems. Commercial status: mature
Blast furnace heat recuperation (BFHR)	Iron-making	Recuperation systems, e.g., Hot Blast Stove, BFG (Blast Furnace Gas) Preheating System, etc., are used to heat the combustion air of the blast furnace. The exit temperature of the flue gases, approximately 250°C, can be recovered to preheat the combustion air of the stoves	Hot Blast Stove fuel savings vary between 80–85 MJ/t. BFG Preheating System has an economic recovery for low to medium temperature grade heat. Energy savings of 3–5% for boiler. Commercial status: emerging
Smelting reduction process (SRP)	Iron-making	The excess gas produced is used for power generation, production of direct reduced iron (an alternative iron input for scrap), or as fuel gas. Smelting reduction processes, including Aumelt Ausiron®, HiSmelt®, CCF, DIOS and COREX, involve the pre-reduction of iron ore by gases coming from a hot bath	Low capital and operating costs. Single furnace with direct waste energy recovery. Low environmental impact (reduced CO ₂ , SO ₂ , and NOx). Recycling of steel plant dusts and slag, making effective uses of coal energy. Commercial status: emerging
Basic oxygen furnace (BOF)	Steel-making	The sensible heat of the off-gas is first recovered in a waste heat boiler, generating high-pressure steam. The gas is cleaned and recovered	Energy savings vary between 535 and 916 MJ/ton steel, depends on the way in which the steam is recovered; with increased power of 2 kWh/ton the total primary energy savings is 136%. Commercial status: mature

Table 1 continued

WtE technology	Iron and steel process	Typical uses	Key factors
Exhaust gas cooling system (EGCS)	Steel-making	Recovers the latent heat and sensible heat of gas as steam through heat exchange. Exhaust gas treatment consists of an exhaust gas cooling system and a cleaning system	Two types of steam recovery boilers, a full boiler equipped with a super heater and coal economizer, and a half boiler without such equipment. Several types of dust removal machines, such as electrical precipitators (which are the most popular, wet and dry type), venturi scrubbers and bag filters. Commercial status: mature
Scrap preheating (SP)	Steel-making	Reduce the power consumption of EAFs through from using the waste heat of the furnace to preheat the scrap charge. Various systems have been developed and are in use at various sites in the U.S. and Europe, i.e., Consteel tunnel-type preheater, Fuchs Finger Shaft, and Fuchs Twin Shaft	Consteel Process. Productivity increase of 33%. Reduced electrode consumption of 40% and dust emissions. Commercial status: mature. Fusch Shaft Furnaces. Electricity savings of 120 kWh/t and fuel increases of 0.7 GJ/t. Up to 20% productivity increase. 25% reduced flue gas dust emissions (reducing hazardous waste handling costs). Commercial status: mature
Rotary hearth furnace (RHF) dust recycling system	Common	Dust recycling in the rotary hearth furnace (RHF). Zinc and other impurities in the dust and sludge are expelled and exhausted into off-gas.	DRI (Direct Reduction Ore) pellets made from the dust and sludge have 70% metallization and are strong enough to be recycled to the blast furnaces. Waste reduction and decreased disposal costs. Recovery of unused resources (recycling iron, nickel, zinc, carbon, etc.). Commercial status: emerging
Activated carbon absorption (ACA)	Common	Remove high pollutant concentrations	Eliminate the yellow brown color of coke wastewater. Significant reduction of COD (Chemical Oxygen Demand) of the secondary wastewater treatment plant to below 5 mg/l. Heavy metals removal. Commercial status: mature
Regenerative burner (RB)	Common	Recovers the waste heat of the furnace exhaust gas to heat-up the combustion air of the furnace	20–50% of energy reduction possible, depending on types of furnace and condition of fuel up to 50% NOx reduction possible with high-temperature combustion. Commercial status: mature

Table 2 Summary of WtE technologies in the cement industry

WtE technology	Cement process	Typical uses	Key factors
Preheater (PH) and Precalciner (PC) Multistage cyclone	Dry manufacturing	Heat produced by the kiln to preheat the raw materials as they move through the various stages of the tall preheater towers.	Fuel efficient than long kilns using up to 50% less energy. Lowest heat consumption (due to the high heat recovery from kiln gas in the cyclones, and the low kiln heat losses). Offers the highest production capacity (EHS 2007). Comparing with wet kiln there is no evaporation of water (EHS 2007)
Waste heat recovery (WHR)	Dry manufacturing	Recovery the waste energy that was discharged unused in waste gases, and uses it in a steam turbine to convert the energy to electricity. Preheating the combustion air in the cooler while at same time cooling the clinker, and by using the exhaust the gas energy after the rotary kiln for calcining and preheating the raw meal in the calciner and preheater (Bolwerk 2005)	No added fuel is required, so generation is cleaner and running cost lower. Waste heat recoverable (1,000 ton/day of clinker capacity) from various streams can be (AIT 1997): by-pass gas: 120–241 MJ/ton of clinker cyclone preheater exhaust gas: 388–457 MJ/ton of clinker clinker cooler exhaust gas: 345–457 MJ/ton of clinker
Grate cooler (GC)	Clinker cooling	An excess of heated cooling air is re-circulated back to the PH or PC kiln (ESTAP 2010)	Efficiency of 70–75%. Electricity consumption ranges from 4 to 8 kWh/ton of clinker. Economical lifetime more than 10 years (ESTAP 2010). Commercial status: mature

Table 3 Main WtE technologies in the primary aluminum production industry

WtE technology	Primary aluminum process	Typical uses	Key factors
Hall-Héroult (HH)	Electrolysis	High intensity energy conversion systems. Point-fed prebaked technology (IEA 2007)	Electricity consumption for pre-baked is in the range of 13–16.5 kWh/kg. Difference in efficiency between 20% attributed to different cell types (IEA 2007). Commercial status: mature New technology Inert Anode (Prebake Anode or PBANOD) would improve (Luo and Soria 2007): energy efficiency 10–25% Commercial status: availability is expected by 2020
Reverberatory furnace (RF)	Alloying and melting	Capture the waste heat in the stack gas to preheat incoming materials. Heat is transferred to the molten metal by convection and radiation (EERE 2007)	Increases energy efficiency and reduces the time required to melt the metal. Recuperated waste heat can also be used to preheat combustion air and cogeneration. Reduce fuel usage to less than 0.57 kWh/kg of aluminum (EERE 2007)

Table 4 WtE technologies in metal casting process

WtE technology	Metal casting process	Typical uses	Key factors
Cupola furnace (CP)	Melting	Melting cast iron because the molten droplets of metal directly contact the coke and flux during their descent, saturating the liquid iron with carbon and refining the metal product	Energy efficiency from 40 to over 70%. Air blast preheating offer energy saving with efficient off-gas combustion systems. Waste heat recuperators preheat the hot blast air up to 650°C (1,200°F). Oxygen-fuel burners increase energy efficiency with dust injection systems and provide a method of recycling plant-generated residues (cupola dust, finishing dust, and sand reclamation dust)
Stack furnace (SF)	Melting	Flue gases to preheat the charge materials	The hot exhaust gases preheat the incoming charge, improving the energy efficiency of the stack furnace by 40–50%. SF has waste gas control and preheating area
Heat recovery system (HRS)	Melting	Transfer thermal energy from the high-temperature effluent stream to a low-temperature input stream (make-up air or metal charge)	Waste-heat-conversion methods, as absorption refrigeration, thermoelectric and thermionic, utilize the elevated flue gas temperatures to drive energy conversion devices. This WtE is reused, it save up 20% of energy costs and reduce emissions
Preheating system (PS)	Melting	Preheat scrap for the second charge of the heat or the first part of the next heat. Shaft furnace technology and twin shell system	Scrap preheating reduce the energy for melting (by up to 50–75 kWh/ton) and electric energy by 30–60 kWh/ton

The remaining glass melting is roughly divided between the flat glass (24%) and pressed and blown glass (19%) segments (SOTA 1997).

More than half of energy consumption in the glass production process corresponds to the melting process. The main production steps found in virtually all glass plants are: raw materials selection, batch preparation (weighing and mixing raw materials), melting and refining, conditioning and forming, and post-processing—annealing, tempering, polishing or coating (IEA 2007). WtE technologies related to glass process are shown in Table 5.

Applications

Waste heat recovery technologies in energy-intensive industries

Between 20 and 50% of industrial energy input is estimated to be lost as waste heat in the form of hot exhaust gases, cooling water, and heat lost from hot equipment surfaces and heated products (ITP 2008). In fact, heating is considered to be the second largest energy-consuming operation (EERE 2007).

Table 5 WtE technologies related to glass industry

WtE technology	Glass process	Typical uses	Key factors
Oxy-fuel furnace (OFF)	Melting	Oxygen as a way to increase fuel efficiency and reduce emissions	Reduces NOx and CO ₂ emissions substantially. Improves heat transfer characteristics and reduced volatilization of alkali vapors from glass melting. (Kobayashi and Van Hassel 2005)
Waste heat recovery boiler (WHRB)	Float and container	Residual heat of waste gases to preheat raw materials and cullet	The recovered waste heat is about 0.28 GJ/t where the overall energy consumption of the furnace is about 3.78 GJ/t. This corresponds in energy savings of 7.4% of the furnace fuel consumption (Wesselink and Deng 2009). It is estimated that 40% of the capacity in the container glass production can be retrofitted with batch WHRB systems in the next two decades (Wesselink and Deng 2009)
Recuperative furnace (RF)	Common system	Continuous preheat of combustion air by the waste gases	Metallic heat exchangers for heat recovery. Excess heat in the off-gas stream can be used to generate steam in a WHRB. Increase overall efficiency to 50–65% (Worrell et al. 2008)

Table 6 presents a current state of WHR practices in a variety of applications in energy-intensive industries as collected from International Technologies Program in U.S. industry (2008). The results from this investigation serve as a basis for understanding the current state of WHR in terms of commercialization status, technical, and economic feasibility in the U.S. industry.

New technologies are emerging as options for heat recovery such as the kalina cycle for low temperature power generation and thermoelectric devices (direct conversion technologies) (ITP 2008).

Case study in the steel sector

A case study for solid recovery using WHR in sintering process is illustrated (Fig. 2) as a real-world example.

The key points for solid recovery are: two hoods with two air/water tubular heat exchangers (50% of the cooler is covered), one bag filter for the dedusting of gas and two blowers. There is a reduction of 250 t/h of sinter from 500 to 50°C => 30 MW (theory) and emission reduction of 92% of the diffuse dust (ArcelorMittal 2010).

A first conclusion is that heat recovery can be used alone or with dedusting and good synergy exists between cooler dedusting and heat recovery. Moreover, heat can be used for district heating, but other applications are possible, such as preheating combustion air or sinter raw mix. Finally, heat recovery can lead to CO₂ emission reduction.

Synergetic interaction between continuous process industries

Table 7 describes the interaction between continuous process industries in terms of synergy (inter-industry collaboration), typical uses, and key factors.

R&D areas of new WtE technologies

Literature searches were conducted to obtain available information on R&D areas of new WtE technologies. The U.S.A. appears to be the top country in terms of relative amount of annual R&D intensities and number of scientists and engineers per million people (WBCSD 2010). Based on the report of the World Business Council for Sustainable Development (2010), which lists a wide range of WtE technologies in continuous industrial processes, there are two issues on R&D:

- The first issue is focusing on industrial reactions & separations related to: advanced water removal (500 TBtu), low-water-use industrial processes, advanced gas separations (60 TBtu), hybrid distillation (240 TBtu), energy-intensive conversion processes (200 TBtu), and is projected in the long-term (2030) savings of 1,000 TBtu and 75 MMTCO₂ (Chan 2010; Glatt 2010).
- The second issue is waste heat minimization & recovery related to: super Boiler (350 TBtu), ultra-high efficiency furnace (90 TBtu), waste heat recovery systems (260 TBtu), and is projected savings in 2030 of 700 TBtu and 50 MMTCO₂ (Chan 2010; Glatt 2010).

Top three R&D areas of new WtE technologies are: low-temperature waste heat recovery (steam generation, heat utilization), high efficiency thermoelectric for low temperature heat recovery, and combined heat & power (CHP): systems recover waste heat to generate electricity and heat at >80% efficiency.

Conclusions

This research has been conducted on the field of “WtE technologies”, which represents an emerging technology

Table 6 WHR in the U.S. energy-intensive industries

		Iron and steel			Blast furnace			Hot blast stove exhaust		
		Coke oven			Waste gas			Blast furnace gas		
		Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic
Regenerator	-	-	-	+	+	+	-	-	n	-
Recuperator	-	-	-	n	-	-	-	n	n	-
Heat wheel	-	-	-	n	m	-	n	n	+	+
Passive air preheater	-	-	-	-	o	o	n	n	+	+
Thermal medium system	o	-	n	m	-	n	n	n	+	+
Waste heat boiler	-	-	-	-	-	-	n	n	-	-
Low T power cycle	-	-	-	n	m	-	n	n	m	n
Solid state generation	-	-	-	m	-	-	-	-	m	-
Load preheat										
Process specific/other ^a	o	o	-	o	o	-	o	o	+	-
		Iron and steel			Glass industry			Glass melting		
		BOF			EAF			Glass melting		
		Basic oxygen furnace gas			Electric arc furnace offgas			Gas-fired melting furnace		
		Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic
Regenerator	x	x	x	x	x	x	+	+	o	-
Recuperator	x	x	x	x	x	x	+	+	-	o
Heat wheel	x	x	x	x	x	x	o	-	n	-
Passive air preheater	x	x	x	x	x	x	n	n	n	n
Thermal medium system	n	n	n	n	n	n	o	+	o	+
Waste heat boiler	o	+	o	n	-	n	o	-	n	n
Low T power cycle	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Solid state generation	-	-	-	-	-	-	m	-	m	-
Load preheat							o	n	o	o
Process specific/other ^a							+	o	o	o

Table 6 continued

	Cement			Primary aluminum			Metal casting		
	Cement kiln			Hall-Héroult Cells			Melting furnace		
	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic	Commercial	Technical	Economic
Regenerator	n	n	n	–	–	–	+	0	n
Recuperator	n	n	n	–	–	–	+	0	+
Heat wheel	n	n	n	–	–	–	o	0	n
Passive air preheater	n	n	n	–	–	–	n	n	n
Thermal medium system	n	n	n	–	–	–	n	n	n
Waste heat boiler	+	+	+	–	–	–	n	n	n
Low T power cycle	o	+	o	–	–	–	x	x	n
Solid state generation	–	m	–	–	m	–	m	–	m
Load preheat	+	+	+	n	n	+	+	0	–
Process specific/other ^a	+	+	+						–

Key Commercial status

+ Frequently used in US

o Limited commercialization

– Not deployed

Technical feasibility

+ No technical barriers

o Proven in limited applications

m May be feasible, not demonstrated

– Not technically feasible

Economic feasibility

+ Cost effective

o Application-specific

– Cost-prohibitive

n Not addressed in available literature

x Not applicable

^a “Process Specific” includes coal moisture control for coke-making, dry-type top-pressure recovery turbines for blast furnace, and recovery from cement clinker cooler

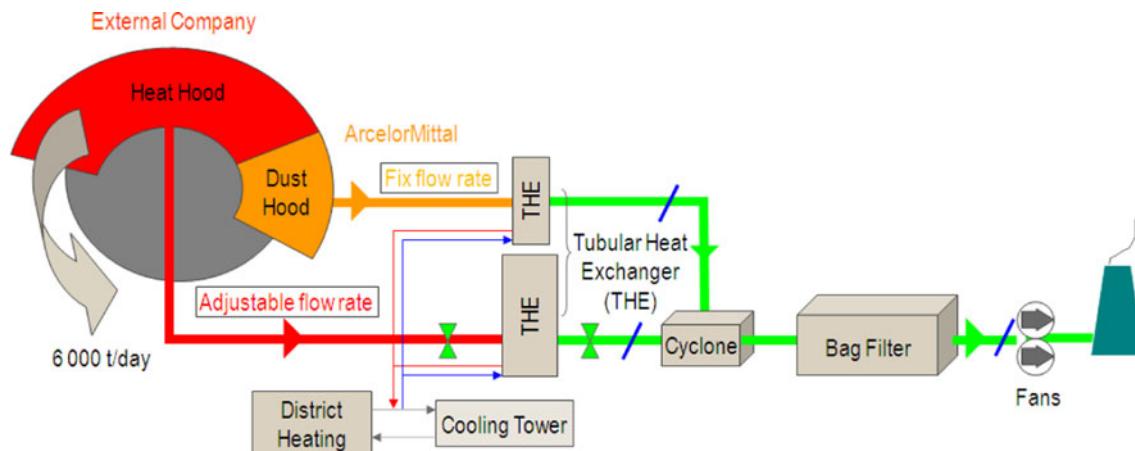


Fig. 2 Case study in the steel sector using WHR

Table 7 Synergetic interaction between continuous process industries

Synergy	Industry	Typical uses	Key factors
Iron and steel—Blast-furnace slag	Cement	About half of all blast-furnace slag is already used for cement-making. The main objective is replacing the clinker ingredient with less energy-intensive	The slag is water-cooled. Transport distances and costs are acceptable. If all blast-furnace slag were used, this would yield a CO ₂ reduction of approximately 100 Mt CO ₂ (IEA 2008a)
Iron and steel—Steel slag	Cement	The CemStar uses 15% charge of air-cooled steel slag pebbles in the rotary kiln feedstock mix. The main goal is replacing the clinker ingredient with other mineral industrial components, which less energy-intensive	CO ₂ reduction of approximately 0.47 t/t steel slag added. Successfully applied in the United States (IEA 2008a)
Iron and steel—Steel slag	Metal casting	Slag can be recycled as a feed to cupola furnaces (gray iron production line)	The cupola furnace slag scavenges trace metals from the induction furnace slag. The resulting cupola slag may be rendered a nonhazardous waste
Cement—Rotary kiln	Primary aluminum	The kiln can be rotary (like a cement works) or, in more modern plants a fluid bed furnace	Lower capital costs because of smaller equipment. Lower temperatures resulting in lower NOx emissions and a wider variety of fuels can be used, as well as lower energy use
Glass—Oxy-fuel technology	Primary aluminum	Know-how of OFF in glass industry as a way to increase fuel efficiency and reduce emissions	Reduce the volume of the waste gases and the use of heat recovery systems is avoided
Metal casting—Stack furnaces	Primary aluminum	A modified reverberatory furnace where its efficiency is improved by better sealing of the furnace and the use of the flue gases to preheat the charge materials	Higher energy efficiency than reverberatory furnaces

group for energy-intensive industries apart from the wide concept of “clean energy technologies”. The current state of WtE technologies has been investigated for five representative sectors in continuous industrial processes: iron and steel, cement, primary aluminum production, metal casting, and glass industry. Goals for the “factories of the future” in all of those sectors are “zero emissions” and “zero material waste” (clean energy technologies) plus maximum efficiency in energy consumption, which requires the best specific technologies for waste energy recovery.

This new group of WtE technologies in continuous process industries has been analyzed in terms of conversion, transportation, management, and recovery or reuse energy from any type of waste (solid, liquid, gas, and heat). Such technologies have the potential for increasing heat recovery, emissions reduction, electric efficiency, transportation fuel substitution, and storing energy and fuel.

This article outlines the potential for technological advancement in the continuous industrial processes of the five sectors studied, as well as inter-industry energy-efficiency opportunities. The aim of the study has been to

provide a practical classification of the typical uses and key factors of current WtE technologies. As an application, some synergetic interactions between continuous process industries have been identified, mostly related to WHR technologies, in addition to potentially energy-saving R&D areas of new WtE technologies.

WtE technologies for industrial processes represent a challenge that requires scientific innovation, process development, and manufacturing scale-up required to accelerate the commercialization of WtE technologies with potential cross-industry collaboration. In conclusion, WtE technologies are the key to success as energy-efficiency technologies to reduce energy use and GHG emissions in medium- and long-term approach.

References

- AIT (1997) Technology, energy, efficiency and environmental externalities in the cement industry. School of Environment, Resources, and Development, Asian Institute of Technology, Pathumthani, Thailand
- APP (2007) The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for steelmaking handbook. APP for Clean Development and Climate (December 2007)
- APP (2008) Steel task force, action plan. Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate (November 2008)
- ArcelorMittal (2010) ArcelorMittal's sintering process projects. Global R&D ArcelorMittal
- ArcelorMittal (2011) Energy saving technologies in steel process. Global R&D ArcelorMittal
- Balomenos E, Gianopoulos I, Panias D et al (2009) ENEXAL: novel technologies for enhanced energy and exergy efficiencies in primary aluminium production industry. MJoM 15:203–217
- Bolwerk R (2005) Co-processing of waste and energy efficiency by cement plants. Presentation in session: innovative energy efficiency examples of different industrial sectors—energy efficiency in the cement, metal and petrochemical industry, Council Government of Münster
- Chan I (2010) Energy solutions for American industry. EERE, U.S. Department of Energy, Washington
- EERE (2007) U.S. energy requirements for aluminum production. Historical perspective, theoretical limits and current practices. U.S. DOE, Washington
- EHS (2007) Environmental, health, and safety guidelines for cement and lime manufacturing. International Finance Corporation, Washington
- EPA (Environmental Protection Agency) (2011) Iron and steel, sector profile. U.S. EPA, Washington. <http://www.epa.gov/sectors/sectorinfo/sectorprofiles/steel.html>. Accessed 28 March 2011
- Eppich R, Naranjo RD (2007) Implementation of metal casting best practices. EERE, U.S. DOE, Washington
- ESTAP (2010) Cement production. IEA Energy Technology Network. <http://www.etsap.org/E-techDS/>. Accesed 31 March 2011
- EU (2010) Industrial technologies conference: integrating nano, materials and production. Theme of the EU Seventh RTD Framework Programme. The Industrial Technologies conference held in Brussels
- Glatt S (2010) Changing the way industry uses energy. In: NASEO annual meeting, ITP, U.S. DOE
- IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. IEA, Paris
- IEA (2008a) Energy technology perspectives—scenarios and strategies to 2050. IEA, Paris
- IEA (2008b) World energy balances: 1971–2006. IEA, Paris
- IEA (2009) Cement technology roadmap, carbon emissions reductions up to 2050. IEA, Paris
- ITP (2005) advanced melting technologies: energy saving concepts and opportunities for the metal casting industry. U.S. DOE, Washington
- ITP (2008) Waste heat recovery. Technologies and opportunities in U.S. industry. U.S. DOE, Washington
- Kobayashi H, Van Hassel B (2005) Reduction of CO₂ emissions using oxy-fuel combustion in industrial furnaces and boilers. In: Eighth international conference on energy for a clean environment, Lisbon
- Luo Z, Soria A (2007) Prospective study of the world aluminium industry. JRC Scientific and Technical Reports. EUR 22951 EN-2007
- Manning CP, Fruehan RJ (2001) Emerging technologies for iron and steelmaking. JOM 53:36–43. doi:[10.1007/s11837-001-0054-3](https://doi.org/10.1007/s11837-001-0054-3)
- Münster M, Lund H (2009) Comparing waste-to-energy technologies by applying energy systems analysis. Waste Manag 30: 1251–1263. doi:[10.1016/j.wasman.2009.07.001](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.001)
- SOTA (1997) State-of-the-art (SOTA). Manual for the glass industry. Air Quality Permitting Program. Department of Environmental Protection, New Jersey
- WBSCD (2010) Innovating for green growth. Drivers of private sector RD&D. WBSCD
- Wesselink B, Deng Y (2009) Sectoral Emission Reduction Potentials and Economic Costs for Climate Change (SERPEC-CC). ECOFYS
- Worrell E, Galitsky C, Masanet E, Wina G (2008) Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the glass industry. Environmental Energy Technologies Division, University of California, Berkeley

5.2 Waste heat recovery technology in continuous casting process

Se presenta la siguiente publicación:

- Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2014). Waste heat recovery technology in continuous casting process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI: 10.1007/s10098-014-0801-0.
 - ✓ Estado: **Publicado online**

Waste heat recovery technology in continuous casting process

Arturo Villar · Jorge Parrondo · Juan José Arribas

Received: 1 March 2014 / Accepted: 3 June 2014
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract The study has been conducted on waste heat recovery (WHR) field in a continuous casting process at an integrated steel mill. The goal was to analyze an innovative heat recovery solution to accomplish energy efficiency opportunities, increase the sustainability, synergies with other industrial continuous operations, and protect the environment, as well as save costs. A real-world application for heat recovery from solids using WHR after oxygen cutting machines of slabs in continuous casting process has been proposed. To study new ways to reduce energy use and emissions, a numerical simulation software was used. The solution proposed has two main items: first, waste heat is covered by a steel thermal shield, and second, is a progressive absorption of waste heat by the water flow in pipeline zone, which is placed inside of the thermal shield. With the expected design and optimized solution, a maximum difference in temperature between inlet and outlet water (ΔT_w) of 90 °C and a system performance (ε) around 77 % could be obtained within operation constraints.

Keywords Waste heat recovery · Continuous process industries · Iron and steel industry · Energy saving · CO₂ emission reduction

Introduction

The WHR field is a key step in recovering waste heat more efficiently from non-traditional sources. Energy productivity is increased endogenously by means of reducing the operating costs for facilities (IEA 2008). Currently, steel industries are the largest energy-consuming sector in the world. They account for 15 % of the world's industrial energy consumption—across the globe, steel industries are highly energy intensive. Of the total cost of producing steel, 20 % is spent on energy (Worldsteel 2013). It also has a significant impact on the environment, each tonne of steel produced emits 1.9 t of CO₂ (Zhang and Zhou 2009).

Industrial energy input between 20 and 50 % is estimated to be lost as waste heat in the form of hot exhaust gases, cooling water, and heat lost from hot equipment surfaces and heated products (ITP 2008). In fact, heating is considered to be the second largest energy-consuming operation (EERE 2007).

Many WHR techniques have already been put into practice, and they can be considered to be well-established technologies. However, there are various applications too where waste heat is not recovered due to a combination of economic costs and technical barriers. According to ITP (2004), heat recovering in the U.S.A. iron and steel industry in 2004 might allow for an energy saving equivalent to 1,672 TBtu. The steel production accounted for 19 % of final energy use and about a quarter of direct CO₂ emissions from the industry sector (IEA 2007). Waste energy recovery in the iron and steel business tends to be more prevalent in countries with high energy prices, where the waste heat is used for power generation (IEA 2007). The properties of waste heat (i.e., temperature, composition, energy content, and accessibility) vary significantly and depend on the industrial process that originate it (ITP 2006).

A. Villar (✉) · J. Parrondo
 Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, Edificio Zona Este, Campus Universitario de Gijón, 33271 Gijón, Spain
 e-mail: arturovillarmenendez@gmail.com

J. J. Arribas
 Global R&D, ArcelorMittal, 33400 Avilés, Spain

A number of the previous studies have investigated alternatives for the iron and steel industry with regard to energy efficiency measures and mitigation of CO₂ emissions (Worrell et al. 2001; Hayashi and Krey 2007; Zhang and Wang 2007; Guo and Fu 2009; Xu and Cang 2010), though none of these investigations considered the specific application of WHR. Álvarez et al. (2012) made a review of the slag energy potential on a global scale, and a proposal for a recovery plant in the factories of ArcelorMittal in Asturias (Spain), based on a steam Rankine cycle for electricity production in a turbine. Villar et al. (2012) analyzed the current state of waste-to-energy (WtE) technologies in continuous process industries and outlined the potential for technological advancement in recovery energy from any types of wastes (solid, liquid, gas, and heat) for applications such as increasing heat recovery, emissions reduction, electrical efficiency, transportation fuel substitution, and storing energy and fuel.

Mansouri et al. (2012) presented an analysis of the temperature distribution and heat loss from a strip passing through the transfer table under three cases in a hot-strip rolling process, namely, in the absence of a thermal shield, in the presence of a thermal shield, and using both a thermal shield and a heat source.

Cases for excess heat recovery and utilization of industrial surplus heat were studied (Villar et al. 2013; Viklund and Johansson 2014). Despite of these advances, there is a need of innovativeness in breakthrough WHR techniques in the iron and steel processes.

The aim of this study is to show an innovative WHR solution and its real-world application for solid heat recovery in continuous casting process at an integrated steel mill. In this paper, first, the details of a case under study are described. Then, 2-D model simulation study done for this case is presented. The computational fluid dynamics (CFD) model has been used to analyze the effect of operational and geometry modifications such as different enclosure degrees for the steel thermal shield. Finally, some conclusions are provided regarding transversal technology for energy efficiency and short- and medium-term opportunities in continuous processes.

Case study: continuous casting process

The continuous casting is a common process in steelmaking (Fig. 1). The liquid steel at about 1,500–1,600 °C is processed into solidified slabs, and usually there are two continuous casting lines. First, a steel ladle containing 300 t of liquid steel is placed into the turret, which is turned 180° to bring the ladle into casting position. By opening the nozzle at the bottom of the steel ladle, the steel flows into tundish. The tundish has two tap holes, each of them leading to a mold,

which determines the size of the cast slabs. Slabs have a maximum width of 1.80 m and a thickness of 0.25 m. As soon as the liquid steel reaches the water cooled mold, it starts solidifying. After leaving the mold, the slab is supported by a series of rolls—grouped into segments and a distance of 2 m between each roll—through which the slab is guided. Large quantities of cooling water are then sprayed upon the slab between the rolls in order to solidify it. The slabs leaving the casting machine are cut to a maximum length of 11.7 m by natural gas and high-pressure oxygen cutting machines. In this region, the temperature of the slab is between 800 and 900 °C. After cutting, the slabs are air cooled/kept in air for further processing or passed to hot or cold rolling mills for further reduction in size. In the process, the temperature of the slab of metal is gradually reduced to 200–300 °C. Lot of sensible heat from the slabs is wasted.

The annual production capacity reported for the LDA Steel Plant of ArcelorMittal in Avilés is 4.2 million t (ArcelorMittal 2009). So, there is huge potential to recover this waste heat. For the case study, slabs produced after oxygen cutting machines are considered. Objective is to recover the waste heat from solid slabs, which is mostly generated by radiated emissions. Although the distance is 50 m from oxygen cutting machines until the end of strand, there are 20 m restricted to operations of large tonnage overhead cranes for displacement of slabs. As a consequence, the hypothetical WHR is possible in the first 30 m of strand after the cutting machines. It have been estimated that there is a descent of 1 °C per meter travelled with a velocity of 0.1 m/s (Fig. 2). The reason is that the steel is a material with a high heat capacity, and a simple calculation shows that there is a drop in temperature of 0.1 °C per second from the cutting machines until the end of the strand.

Some thermographies were made in the current continuous casting process at LDA Steel Plant of ArcelorMittal in Avilés (Spain). The thermographies shown (Figs. 3, 4, 5) were calculated with emissivity coefficient of 0.7 and a distance of 5 m to the slabs.

Based on the temperature measures presented above, the case study proposes an innovative technique to recover the continuous waste heat emitted by the slabs in the continuous casting process. The WHR solution consists of a thermal shield with a pipeline, which is placed on inside of the shield—in a special interior side. The heat can be recovered by allowing the water to flow, which enters the pipe at room temperature and leaves it at much higher temperature, which depends especially on the mass flow rate of the water.

2D model simulation

Considering the high cost of on-site experiments, it is appropriate to apply computational modeling to explore the

Fig. 1 Layout in continuous casting process

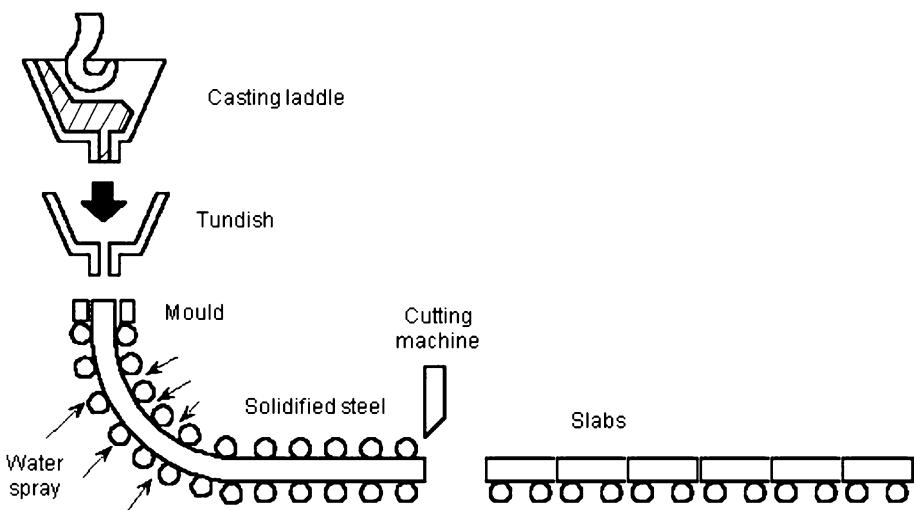


Fig. 2 Slabs in the continuous casting lines

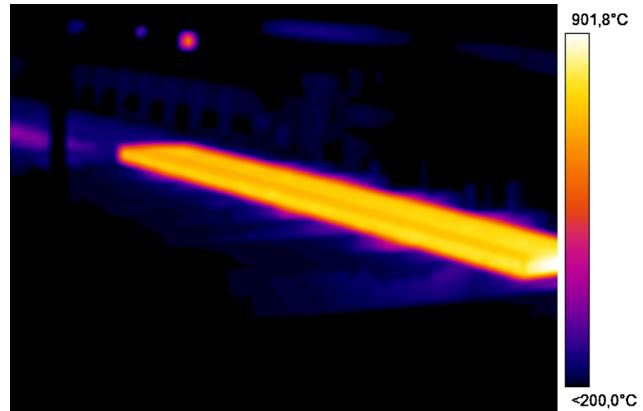


Fig. 4 Thermography of a slab in the *middle* of the strand

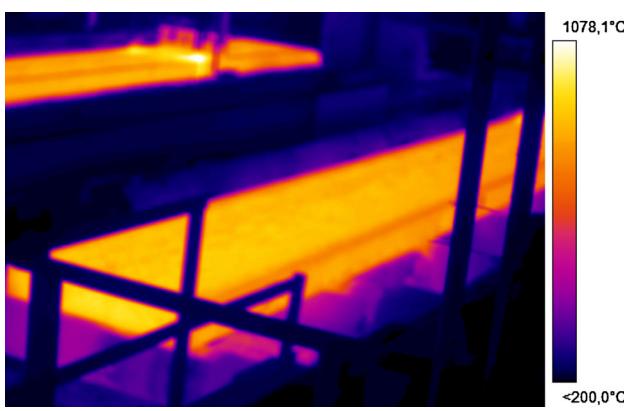


Fig. 3 Thermography of slabs in the oxygen cutting machine

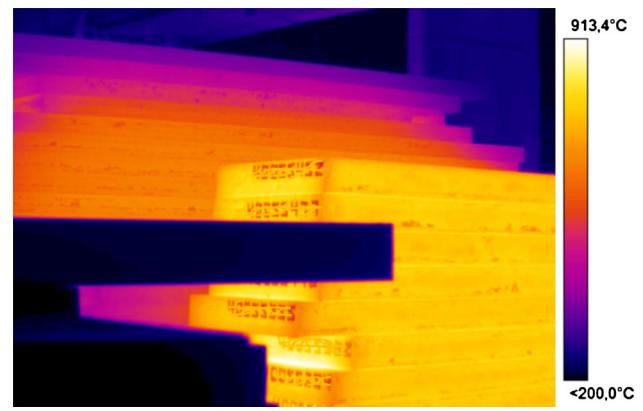


Fig. 5 Stacks of slabs at the *end* of the strand in the continuous casting process

theoretical limits of continuous casting speed and productivity (Li and Thomas 2002). In order to get a better description of the heat transfer phenomena by radiated

emissions and the natural convection air flows present in this continuous casting process, a numerical simulation was conducted by means of the commercial software Fluent,

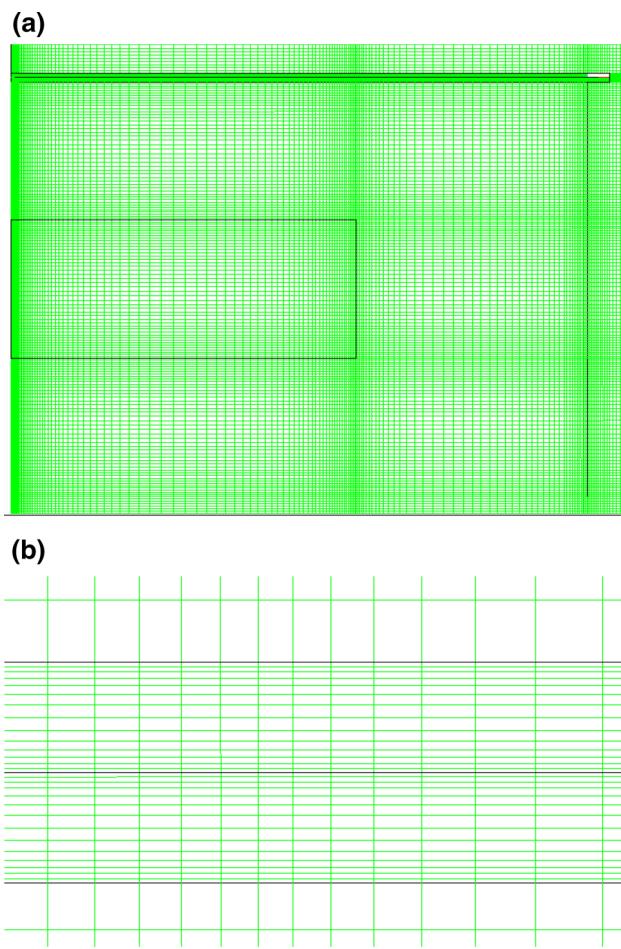


Fig. 6 Geometry and grid used to simulate the proposed solution: **a** symmetric domain; **b** grid detail in the pipeline zone

which is a CFD code based on the finite volume method (Fluent 2006). The software has already been used in numerous recent investigations dealing with heat transfer in the steel industry. For example, 2-dimensional transient heat transfer of strip steel using a mathematical model to determine the effective cooling parameters in hot rolling process (Nobari and Serajzadeh 2011), or during controlled cooling after hot rolling process (Suebsomran and Butdee 2013). It was also used in numerical simulations for the heat recovery with modified solar absorbers at the side of the cooling bed in a pilot plant (Tarrés et al. 2014). There are also few studies suggesting heat recovery from region previous to the cutting machine in the continuous casting process (Fernández et al. 2009; Shamsi and Ajmani 2010; Warzecha 2011).

In the present study, this software was used to solve the Reynolds averaged equations (continuity, linear momentum, and energy) that govern the motion of air together with adequate models for turbulence ($k-\omega$), heat conduction in the steel slabs, and heat radiation (surface-to-surface method).

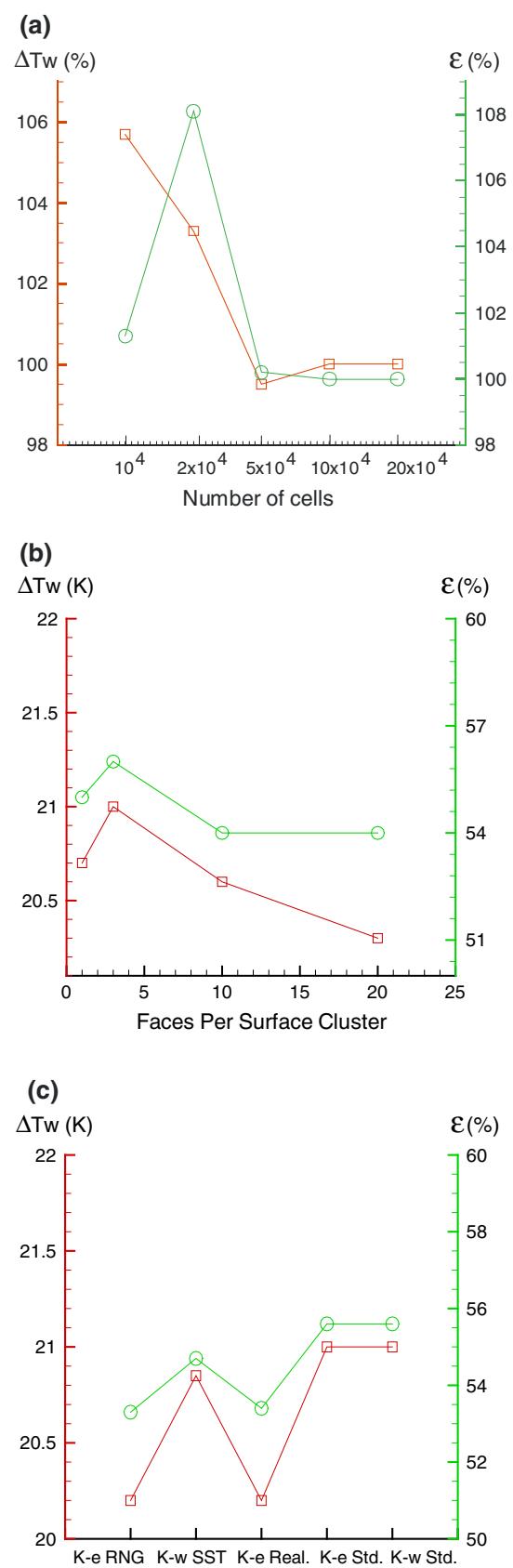


Fig. 7 Comparison ΔT_w (represented by square dots) and ε in all the 2D simulations related to variation of calculation parameters

To simplify the calculations, a 2D domain was considered, and symmetric boundary conditions were applied to simulate the middle of slab and the thermal shield with pipeline (Fig. 6a). Each half of slab has a heat generation rate per unit length compatible with 80 kWm. The domain was discretized in 54,183 quadrilateral cells, with special refinement degrees in the zone of the water flow through pipeline layout (Fig. 6b). After imposition of boundary conditions (15 °C and atmospheric pressure at a horizontal plane above the ceiling) and selection of other calculation parameters, computations were performed iteratively until convergence is achieved. The simulation has been conducted under stationary conditions without actual consideration of the progressive reduction of the slab temperature along time. This means that the velocity and temperature data calculated can be assumed to represent average values along the strand in the continuous casting process.

Figure 7 represents the sensitivity of calculation parameters to the number of cells, faces per surface cluster, and turbulence models selected for water flow rate of 0.5 kg/s. Figure 7a shows the comparison of difference in temperature between water inlet and outlet (ΔT_w), and system performance (ε) is equal to power supply to water divided by power consumed by the system for 1, 2, 5, 10, and 20 ($\times 10^4$) with number of cells. It is clear from the Fig. 7a that increasing the number of cells beyond 10×10^4 will not have any significant impact on the results. On the one hand, the results are relatively constant when numbers of faces per surface cluster were varied from 1 to 20 ($\times 10^4$), as seen from Fig. 7b. Figure 7c shows that there can be a difference of 7 % in the values of ΔT_w and ε when different turbulence models are used for the simulation.

As a conclusion, a domain with 50,000 cells, 3 faces per surface cluster, and $K-e$ Standard or $K-w$ Standard are considered good for further simulations of design and optimization Table 1.

Design and optimization

The design is related to variation of geometry parameters such as variation in shield dimensions, and slab to pipeline, slab to shield, and lateral thermal shield to ground distances. Whereas, the optimization is related to variations in mass flow rate and emissivity coefficient. For that purpose, new CFD simulations of the continuous casting process were undertaken considering different simulation cases of the design and optimization (Fig. 8). The mass flow rate is 0.5 kg/s for all the simulations, which is same as for the calculation parameters selected in the previous section.

Figure 8 is divided into three parts. Simulations were carried out with different lengths of the shield and also with different distances between lateral thermal shields from

ground. Lateral shield is thought to be used to control the heat dissipation through the openings. The results are as shown in Fig. 8a. The effect of distance between slab and surroundings (shield and pipe) is as presented in Fig. 8b. Therefore, Fig. 8a, b summarizes all the cases related to variations in geometric parameters. Effects of changing mass flow rate and emissivity coefficient values are studied to optimize the proposed solution. The results are as illustrated in Fig. 8c.

As the lateral thermal shield decreases its length, the system performance is minimum due to the natural convection of the waste heat by the surrounding air. Additionally, there is an inflection point in the distance between slab and shield by means of air rotation patterns, which increased or decreased ε values. Another interesting result is that the absorption of waste heat is lower when the mass flow rate is major, and a completely different behavior happens when the emissivity coefficient is higher, and the absorption of waste heat is increased.

So, as the result of all the simulation cases shown in Fig. 8, the efficient design is one where the distances, 300 mm from upper surface of slab to pipeline, 500 mm from lateral surface to lateral thermal shield, and 800 mm from upper surface of slab to ground, are proposed (Table 1).

The results from these studies could not be compared with the temperatures of the thermographies already explained in the case study. This is due to the fact that the maximum and minimum values of the working temperatures exhibited in the thermographies are slightly different because the simulation has 0.6 of emissivity coefficient, and thermographies were calculated with 0.7.

Figure 9 shows the predictions obtained for air velocity vectors. Figure 9 illustrates two main air velocity regions. First region is the direct radiation of waste heat from the slabs. These radiated emissions make that the air velocity close to the slab is relatively high, up to 1.6 m/s, which favors the waste heat convection process due to air velocity circulation. On the other hand, second region is absorption of waste heat by water flow in pipeline zone. The air velocity goes in the reverse direction to the first region due to rotation patterns in the regions between lateral thermal shield as well as backflow on the low surface of the ground, which is internal to the shield because the results presented are the final solution where the swinging shield is totally closed. So, this arrangement makes that air velocity which enter to the pipeline zone is from 0.8 to 1.1 m/s.

Figure 10 represents air temperature increases along the channel between the slab and the pipeline, due to the lateral thermal shield is totally closed, and there is a progressive absorption of waste heat by the water flow, in which the waste heat is mainly generated from the slab. In particular, the temperature of the air along the channel is around 200 °C. The maximum temperature calculated in the domain, which is located inside the inner slab, was 850 °C,

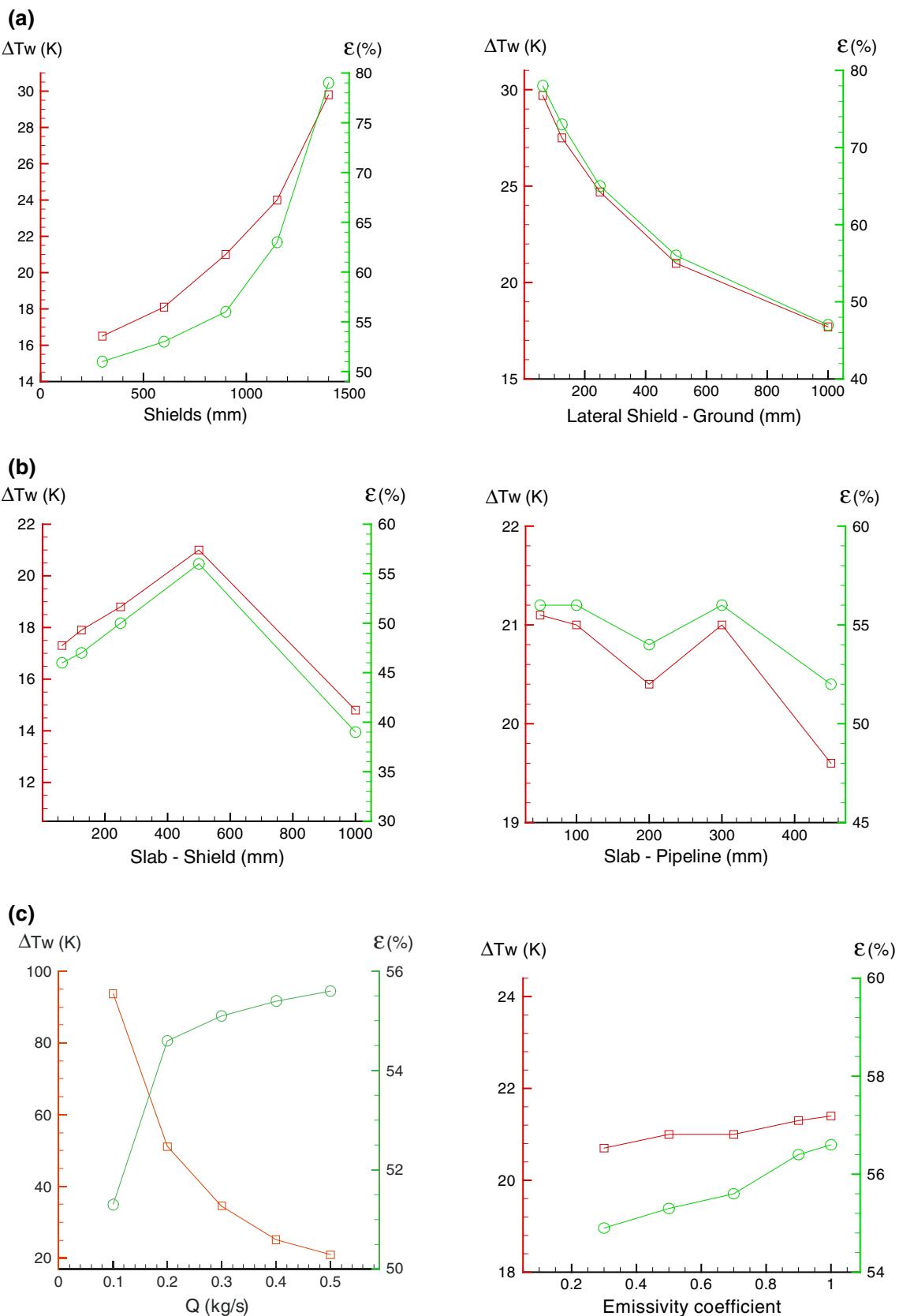


Fig. 8 Comparison of ΔT_w (represented by square dots) and ε for different cases: geometry parameters, mass flow rate, and emissivity coefficient

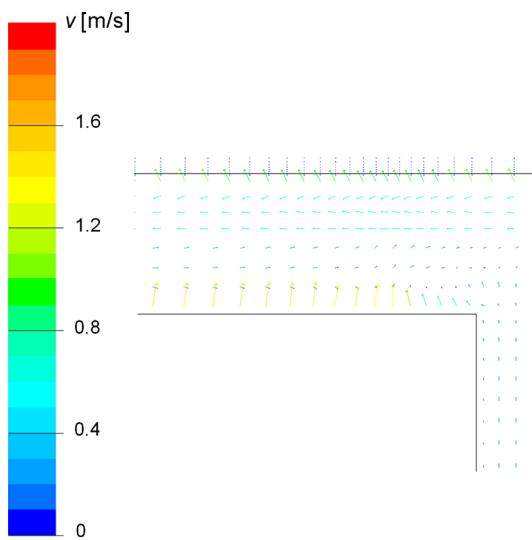


Fig. 9 Prediction of air velocity vectors under final technical solution

while the average temperature on the surface of the slab varied from 500 to 600 °C. Finally, the temperature of the water could reach much more than 90 °C set as ΔT_w due to operation constraints related to cavitation problems, boiling point, and accomplish end-user requirements for other internal processes at the integrated steel mill, such as preheating oil for hydraulic systems.

The solution proposed has some key aspects in the design and optimization (Table 1), which are important to discuss. From the scientific point of view, when the lateral thermal shield is totally closed, and there is a progressive absorption of waste heat by the water flow. So, the optimum geometry distances between slab and pipeline have a crucial role in order to increase the air temperature along the channel between the slab and the pipeline. Furthermore, regarding the numerical simulation, the air velocity circulation, up to 1.6 m/s, is key to the optimum position of the pipeline zone, which favors the maximum absorption of waste heat by means of direct radiation from the slabs and the rotation patterns between surface of slab and pipeline.

Table 1 Summary of geometry distances and key values

Geometry distances	Key values
300 mm from upper surface of slab to pipeline	Symmetric boundary conditions to simulate the middle of the domain
500 mm from lateral surface to lateral thermal shield	Stationary conditions
800 mm from upper surface of slab to ground	Calculations parameters: discretization of 54,183 quadrilateral cells, 3 faces per faces cluster and $K-w$ standard Mass flow rate: 0.2 kg/s Emissivity coefficient: 0.2 for thermal shield, 0.5 for pipeline, 0.6 for the slab

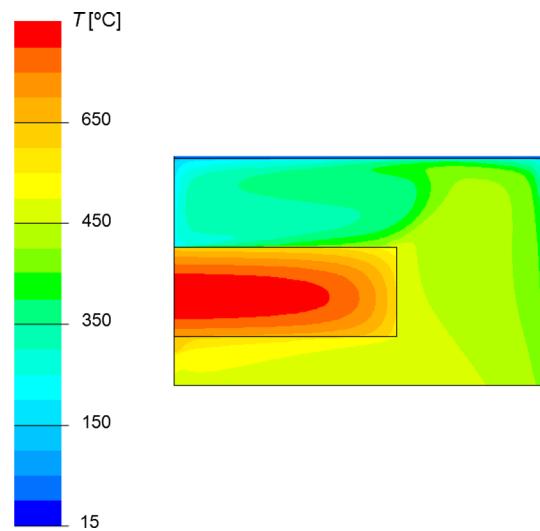


Fig. 10 Prediction of temperature distribution under final technical solution

One of the practical implications of the solution is to have found the optimal geometry distances from a thermal shield to a slab, which help to have a reference for covering a solid slab in any continuous process with similar heat source properties. Moreover, the use like a swinging panel with different degrees for lateral thermal shield had been set for avoiding design problems in relation to slab movement and maintenance operations along the strand.

Conclusions

WHR technology assumes a key role on the field of “WtE technologies”, and the challenge has been to recover waste heat from solids, which is mostly generated by radiated emissions.

The aim of the work has been to provide a practical solution of a current WHR case. Furthermore, the study presents an innovative and unique solution of WHR from slabs in a continuous process. Based on not interfere in the production process with a lateral thermal shield that is adaptable with different degrees and a pipeline inside the thermal shield, which increase the recovery and absorption of heat. As a result of the design and optimization, a maximum difference in temperature between inlet and outlet water (ΔT_w) of 90 °C and a system performance (ϵ) around 77 % could be obtained within operation constraints.

As the numerical results are promising, further research is suggested to install a pilot test facility in a continuous casting process in the short-term and outlined the potential for technological advancement at an integrated steel mill. The solution proposed has a higher scalability for

industrialization due to practical commissioning by means of a flexible design. Another utility is toward advanced, and cleaner technologies are reduction of energy consumption, CO₂ emissions, and cost savings in order to be an alternative to fossil fuel such as consuming less natural gas for preheating oil for hydraulic systems in continuous processes.

The solution presented has synergies between other common processes in many industrial applications such as metal casting, cement, primary aluminum production, plastics, and glass processing operations, which are possible to recover waste heat from solids. We believe that in the medium-term approach, there are more opportunities in WHR techniques for continuous processes based on transversal issues for energy efficiency.

References

- Álvarez E, Gutiérrez AJ, Suárez JM, Xiberta J (2012) Steel mil slags energy potential: the case of the steel factory of Arcelor-Mittal in Asturias (Spain). *Clean Technol Environ Policy* 14:869–877. doi:[10.1007/s10098-012-0455-8](https://doi.org/10.1007/s10098-012-0455-8)
- ArcelorMittal (2009). Investor presentations www.acelormittal.com/corp/~/media/Files/A/ArcelorMittal/investors/presentations/investor-days/2009/627-27-1-0-ArcelorMittalAsturias_200903.pdf. Last Accessed 21 Feb 2014
- EERE (2007) U.S. energy requirements for aluminum production. Historical perspective, theoretical limits and current practices. DOE, Washington
- Fernández JM; Santolaria C; Rodríguez-Somoano J, & Alvarez M (2009). Multiphase modelling of the steel grade transition in a continuous casting tundish. *Proceedings of ASME Fluids Engineering Summer Meeting*, vol 1pp 2183–2194
- Fluent (2006) Inc. User's guide. 10 Cavendish Court, Lebanon, NH03766. New England
- Guo ZC, Fu ZX (2009) Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. *Energy* 35:4356–4360. doi:[10.1016/j.energy.2009.04.008](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.008)
- Hayashi D, Krey M (2007) Assessment of clean development mechanism potential of large-scale energy efficiency measures in heavy industries. *Energy* 32:1917–1931. doi:[10.1016/j.energy.2007.03.003](https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.03.003)
- IEA (2007) Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. IEA, Paris
- IEA (2008) Energy technology perspectives—scenarios and strategies to 2050. IEA, Paris
- ITP (2004) Energy use, loss, opportunities, analysis: U.S. manufacturing & mining. Washington, DOE
- ITP (2006) Engineering scoping study of thermoelectric generator packages for industrial waste heat recovery. Washington, DOE
- ITP (2008) Waste heat recovery. Technologies and opportunities in U.S. industry. DOE, Washington
- Li C, Thomas BG (2002) Maximum casting speed continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation. 85th Steelmaking Conference. Proc., ISS, Warrendale, PA, (held in Nashville, TN, 10–13 March 2002, pp 109–130
- Mansouri N, Mirhosseini A, Saboonchi A (2012) Thermal modeling of strip across the transfer table in the hot rolling process. *Appl Therm Eng* 38:91–104. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2011.12.049](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.049)
- Nobari AH, Serajzadeh S (2011) Modeling of heat transfer during controlled cooling in hot rod rolling of carbon steels. *Appl Therm Eng* 31:487–492. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2010.10.003](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.003)
- Shamsi MRRI, Ajmani SK (2010) Analysis of mould, spray and radiation zones of continuous billet caster by three-dimensional mathematical model based on a turbulent fluid flow. *Steel Res Int* 81:132–141. doi:[10.1002/srin.200900103](https://doi.org/10.1002/srin.200900103)
- Suebsomran A, Butdee S (2013) Cooling process on a run-out table by the simulation method. *Case Stud Therm Eng*. doi:[10.1016/j.csite.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.csite.2013.07.002)
- Tarrés J, Maas S, Scholzen F, Zürbes A (2014) Simulated and experimental results on heat recovery from hot steel beams in a cooling bed applying modified solar absorbers. *J Clean Prod* 68:261–271. doi:[10.1016/j.jclepro.2014.01.020](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.020)
- Viklund SB, Johansson MT (2014) Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction. *Energy Convers Manag* 77:369–379. doi:[10.1016/j.enconman.2013.09.052](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052)
- Villar A, Arribas JJ, Parrondo J (2012) Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technol Environ Policy* 14:29–39. doi:[10.1007/s10098-011-0385-x](https://doi.org/10.1007/s10098-011-0385-x)
- Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2013) District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain). *Environ Prog Sustain Energy*. doi:[10.1002/ep.11883](https://doi.org/10.1002/ep.11883)
- Warzecha M (2011) Numerical and physical modelling of steel flow in a one-strand continuous casting tundish. *Metallurgija* 50:147–150
- Worldsteel (2013) Steel turns energy reduction from pipe dream to reality. www.worldsteel.org/media-centre/Steel-news/Steel-reducing-energy-use.html. Last accessed 26 Feb 2014
- Worrell E, Price L, Martin N (2001) Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector. *Energy* 26:513–536. doi:[10.1016/S0360-5442\(01\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00017-2)
- Xu C, D-q Cang (2010) A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. *J Iron Steel Res Int* 17:1–7. doi:[10.1016/S1006-706X\(10\)60064-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60064-7)
- Zhang J, Wang G (2007) Energy saving technologies and productive efficiency in the Chinese iron and steel sector. *Energy* 33:525–537. doi:[10.1016/j.energy.2007.11.002](https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.11.002)
- Zhang X, Zhou S (2009) The prospect of sensible heat recovery of blast furnace slag. The 7th China Iron and steel annual meeting proceedings

5.3 District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain)

Se presenta la siguiente publicación:

- Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2014). District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain). Environmental Progress and Sustainable Energy. DOI: 10.1002/ep.11883.
 - ✓ Estado: **Publicado online (2013)**

District Heating From Industrial Surplus Heat in Avilés (Spain)

Arturo Villar, Jorge Parrondo, and Juan José Arribas

Departamento de Energía, Universidad de Oviedo. Edificio Zona Este, Campus Universitario de Gijón, Gijón, 33271, Spain; arturovillarmenendez@gmail.com (for correspondence)

Published online 00 Month 2013 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.11883

This article presents a study on a waste-to-energy (WtE) technology and its application for district heating (DH) at a particular site in the city of Avilés (Spain). The study is based on the recovery of surplus heat from a cooling facility at a steel mill in the neighborhood of Avilés. The thermal energy demanded by the potential users, which include apartment blocks, a hotel, and a sport, and spa center, has been estimated in 1.1 MW in winter and 0.5 MW in summer, during daytime. The process proposed has two main stages: first, surplus hot air is collected by hoods in the factory and circulated through a heat exchanger; and second, the resulting hot water is transported to the destination sites by means of a new insulated pipeline network. Total technical costs (not including financial nor insurance costs) have been estimated in 660 k€. The study raised a number of key issues such as the necessity of simulation tools to predict the process performance when modifying the plant scheme or the convenience for additional economical or social incentives, like those related to the current municipal project denoted as "Isla de la Innovación." © 2013 American Institute of Chemical Engineers Environ Prog, 00: 000–000, 2013

Keywords: district heating, industrial surplus heat, waste-to-energy technology, continuous process industry, waste heat recovery

INTRODUCTION

The term district heating (DH) is often used in relation to the distribution of heat generated from combined heat and power (CHP) and renewable sources (biomass, geothermal, solar thermal) [1]. However, DH can also be based on the recover or reuse of surplus (waste) heat from continuous industrial processes such as those in the iron and steel, primary aluminum or glass industries. Certainly, DH appears as an effective tool to reduce the fossil fuel consumption and so it can greatly contribute to achieve policy objectives relating to global energy efficiency and environmental issues [2]. The degree of penetration of DH varies by country depending on heat source availability, environmental conditions and economic and legal framework. In Europe, where DH has been particularly favored, Iceland leads the use of DH technologies from geothermal heat, while countries such as Denmark, the Netherlands, and Finland stand out for DH based on bioenergy, i.e., materials derived from biological sources [3]. In fact, most East European countries consider the development of CHP and DH technologies in their national energy planning.

Present address of Juan José Arribas, Global R&D, ArcelorMittal, 33400, Avilés, Spain

© 2013 American Institute of Chemical Engineers

On the one hand, some articles present past and current drivers for heat recovery studies like Ammar et al. [4] addressing the potential for low grade heat recovery with regard to new incentives and technological advances in the process industry. Tanaka [5] presented a comparison study of EU and Japan where points of concern in the iron and steel industry are identified in the areas of calculating energy saving, determining CO₂ emissions, and setting benchmarks. Larsson and Dahl [6] developed a method that can serve as a benchmark for different steelmaking operations and constitute a basis for the continuous work involved in energy, material or economic analyses for the steel production system. The heat under 300°C is not utilized in a steel plant and Matsuda et al. [7] identified with pinch technology the distribution and the quantity of such heat and proposed plans to use it for energy saving. Álvarez et al. [8] proposed the energy recovery from steel mill slags in Asturias.

On the other hand, numerous recent studies have been undertaken to analyze and optimize the implementation of DH technologies under different sceneries. Mahapatra and Gustavsson [9] examined the willingness of house owners in Sweden to connect to DH networks. Also, Lygnerud and Peltola-Ojala [10] evaluated options for supplying district heat to areas with low density heat consumption in Sweden and Finland, while Ghafghazi et al. [11] applied multi-criteria analysis to planning DH systems in Canada. Difs et al. [12] have studied the potential for expansion of DH into Swedish industrial areas by analyzing heat load duration curves. Möller and Lund [13] modeled how new district heat can be supplied from an energy system with high shares of renewable energy. Rezaie and Rosen [14] presented a review on the DH technology and its potential enhancements.

Most DH studies and applications have been proposed in relation to cold climates, but DH can also be an advantageous solution to achieve energy efficiency and environmental goals in milder climates, for instance at urban areas close to industrial sites with continuous processes [15], which usually happen to be large energy consumers. This article presents a study on a DH application from the recovery of surplus heat in the city of Avilés, which is located on the northern coast of Spain and has a maritime climate (mild winter and warm summer). In particular, this study considers recovering hot air from a cooling facility at a steel mill site in Avilés, in order to supply thermal energy to the local development area denoted as "Isla de la Innovación" (Island of the Innovation). Technically, it is the first study of DH with waste heat from industry in Spain.

The aim of this study is to show an innovative solution to recover surplus heat and its application for DH at a particular



Figure 1. Exterior view of a building for slab cooling at the steel mill in Avilés. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]



Figure 2. Yard with train transportation of slabs at the steel mill in Avilés. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

site in the city of Avilés (Spain). The structure of the article is as follows. First, the site is described. Second, the proposed technology section is divided in three subsections to describe the current state of the case under consideration, including energy availability in cooling facilities, potential users and recovery and transport facilities. The computational fluid dynamics (CFD) model is used to analyze the effect of modifications in the cooling building and the main technical features of the system proposed for energy recovery and transportation. Finally, a brief discussion is provided in the viability and conclusions section regarding technical viability aspects and financial issues.

SITE

Avilés is a seashore city situated in the Principality of Asturias (Spain), on the Spanish Bay of Biscay coast. The industrial city has a population of 85,000 inhabitants [16]. A significant number of factories and plants that represent several industrial sectors have been operating in the Avilés area for decades, and so it is considered one of the main heavy industry sites in Spain. Examples of industrial companies established in the surroundings of Avilés are Alcoa (world leading producer of aluminum) [17], ArcelorMittal (world leading steel company) [18] and Saint-Gobain Glass (leading manufacturer of flat glass in Western Europe) [19].

As most cities, the municipality of Avilés has undergone several urban transformations towards a more livable and sustainable town. One of the most notorious town-planning projects in recent years, promoted as “Isla de la Innovación” which covers some 572000 m² [16], pursues the restoration of a degraded zone by the Avilés estuary that had been formerly occupied by old metal-mechanic workshops and ore bunkers. The first major action of the “Isla de la Innovación” project, already accomplished, has been the building of the so-called Niemeyer Cultural Centre, a complex intended for auditions, performances, art exhibitions and congresses. Subsequent developments of that urban plan include the construction of apartment blocks for a total of 1000 tenants (in two phases) as well as a four-star hotel and sport and spa center. Indeed, these new buildings are going to give rise to a considerable energy demand in various categories such as heating and domestic hot water (DHW).

On the other hand, some of the industries located in the city surroundings have continuous processes that require high-energy consumption levels, often with poor energy efficiency, so that there is a nearly continuous generation of surplus heat, currently wasted. Certainly, one possible use for this wasted energy is DH, and the “Isla de la Innovación” project appears as a suitable candidate for a first DH application in the Avilés area, which is the purpose of this study. And, because of its relative proximity to the “Isla de la

Innovación” site (about 3 km apart), the steel mill plant of ArcelorMittal [20] is the first choice for the analysis of wasted-energy recovery opportunities.

In particular, this article considers the wasted heat originated during the cooling of the steel slabs produced at the steel mill, which result from continuous casting at high temperature. By means of overhead bridge cranes, the hot slabs (initially above 800°C) are sequentially located in different buildings (Figure 1) so that the cooling process is performed in several stages. At the end, the slabs are piled up in a yard (Figure 2). Especially in the high temperature range, cooling should progress at a pace low enough not to affect the steel quality, i.e., slabs should remain at each cooling building for sufficient time. This implies a limitation for the capacity of using the slabs heat because a high rate of heat extraction from the cooling enclosures may result in an excessively uneven temperature distribution, i.e., it may raise the probability for material defects. This limitation is less important in the low-temperature stage (below 500°C), because in this temperature range the material properties can hardly be modified. Nevertheless, the amount of waste-heat in this last stage is still large enough for advantageous recovery, as described below.

PROPOSED TECHNOLOGY

Available Energy in Cooling Facility

The last building for slab cooling (Figure 1) is about 120 × 45 m² in plan view and 21-m high. It has large tonnage overhead cranes for the displacement of the steel slabs. These slabs, which are plates up to 11.7-m long with an average cross-section of 1.5 m in width and 0.25 m in thickness, are piled up on the ground forming columns of 2–3 m high. While new hot slabs enter into the building at about 500°C, other slabs are progressively removed when their temperature has decreased at least 250°C, so that at any time there are slab stacks with different degrees of cooling, i.e., at different temperatures. The annual production capacity reported for the LDA Steel Plant of ArcelorMittal in Avilés is 4.2 million ton [20]. Assuming a conservative estimate of 60% in effective steel production with respect to capacity, the corresponding annual average thermal power to be dissipated in the last cooling factory is at least 9 MW.

Cooling of the slab stacks occurs by thermal radiation toward the building boundaries and by natural convection to the surrounding air. To facilitate this convection, the lateral sides of the building are open to the outside from ground to 6-m high, i.e., the physical façade goes from 6 to 21 m high (Figure 1). This allows space for fresh air to enter into the

factory close to the ground, and for hot air to go out close to the low edge of the façade. If necessary, additional cooling flow may be achieved by activating local openings at the ceiling.

To get a better description of the heat transfer phenomena and the natural convection air flows present in this cooling process, a numerical simulation was conducted by means of the commercial software Fluent, which is a CFD code based on the finite volume method [21]. This software has already been used in numerous recent investigations dealing with heat transfer in the steel industry, such as temperature distribution in a re-heating furnace [22], continuous casting of steel slabs [23–25] and heat recovery from steel slags [26]. This software was used to solve the Reynolds averaged equations (continuity, linear momentum and energy) that govern the motion of air together with adequate models for turbulence ($k-\omega$), heat conduction in the steel slabs and heat radiation (surface-to-surface method). To simplify the calculations, a 2D domain was considered (Figure 3) in which the slab stacks were aligned in eight rows inside the factory, each with a heat generation rate per unit length compatible with 9MW for the whole building. The domain was discretized in 26,000 quadrilateral cells, with special refinement degrees in the zone of the slab stacks (Figure 4). After imposition of boundary conditions (12°C and atmospheric pressure at a horizontal plane above the ceiling) and selection of other calculation parameters, computations were performed in an iterative fashion until achieving convergence.

Figures 5 and 6 present the predictions obtained for the air velocity vectors and the temperature distribution in the case of totally closed ceiling. The results shown correspond to half of the calculation domain (plane ABCD in Figure 3).

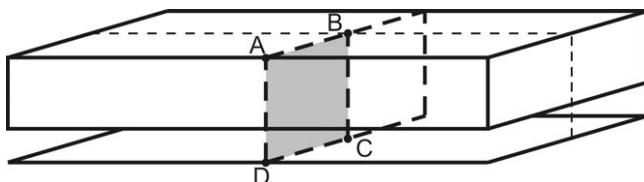


Figure 3. Schematic layout of the cooling building and calculation plane ABCD.

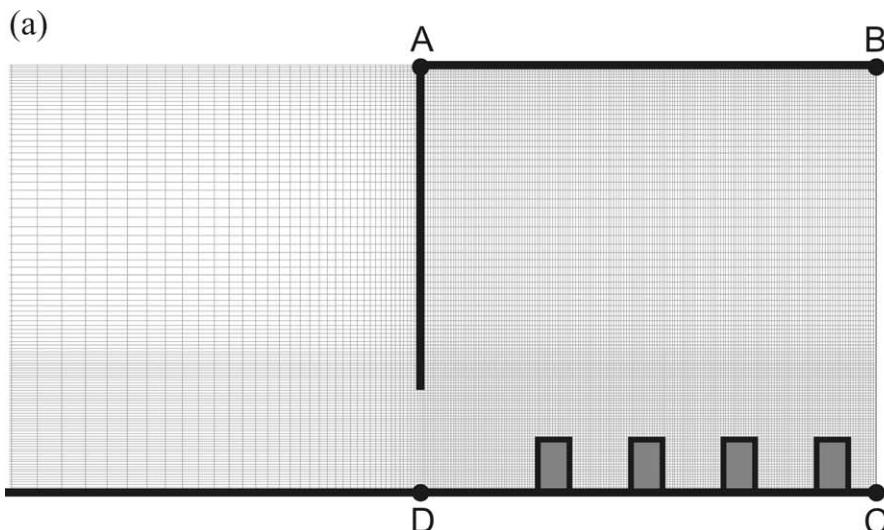


Figure 4. Geometry and grid used for CFD simulation under current conditions: (a) cooling building region; (b) grid detail at one slab stack.

As expected, in Figure 5 the external air is seen to approach the stacks of slabs close to the ground, elevate, turn round and exit the building, passing under its lateral wall. The value calculated for this 2D convection air flow was $1.98 \text{ kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$. Inside the factory, maximum velocity values are in the range of 1 m/s and correspond to the near slabs region. Figure 6 shows that temperature stratifies in the building, with maximum values in the order of 185°C at the ceiling. This accumulation of hot air at the ceiling is due to the combined effect of heat radiation from the stacks and natural convection of heated air. Though not shown in Figure 6, the average temperature calculated at the surface of the stacks varied from 272°C (outer stack) to 306°C (inner stack), whereas the maximum temperature inside the slabs was 438°C (inner stack).

This simulation has been conducted under stationary conditions without actual consideration of the progressive reduction along time of the slab temperature. This means that the velocity and temperature data calculated can be assumed to represent average values along the cooling process. In

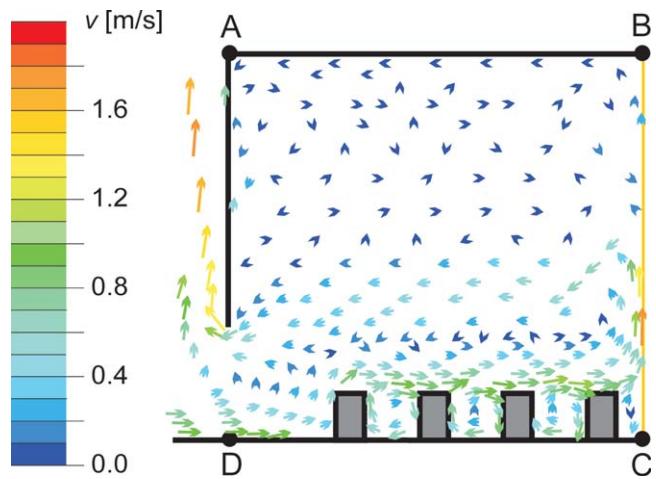


Figure 5. Prediction of air velocity vectors under current conditions (plane ABCD as in Figure 3). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

practice, however, the usual schedules for slab input/output determine that simultaneous slabs in the cooling building have in fact very different degrees of cooling. Hence, it is reasonable to assume that these computations do represent the average dissipation of thermal power, with relatively little fluctuation along time. In any case, it is clear that there is a significant accumulation of hot air at the ceiling area which is worth to recover.

POTENTIAL USERS

As indicated in the Site section, recover of the waste heat in the cooling facility can find its best use in the DH of the “Isla de la Innovación” at Avilés, which is still mostly in draft. In the current plan of the “Isla de la Innovación”, the most likely candidates for DH are:

- Construction of buildings for 500 apartments, in several stages.
- A one hundred room hotel with restaurant services, conference rooms and gym.
- Sport and spa center with swimming pool, learning pool, and spa facilities including relaxing therapy pool, jacuzzi pools, sauna, steam bath etc.

The thermal demands corresponding to these users are season dependent and can be separated into hot water consumption and heating. Regarding DHW, the Spanish Institute for Energy Diversification and Saving (IDAE) has recently published a report on the energy consumption of Spanish households [27], from which the DHW by households in the Cantabrian region represents an average annual power of 260 W. Assuming 500 apartments, the resulting average daily demand is 3120 kWh. In the case of the four-star hotel, the average DHW consumption can be estimated in 70 L at 60°C per person and day [28]. Hence, for an occupancy level of 100 guests, the corresponding average daily demand amounts about 375 kWh.

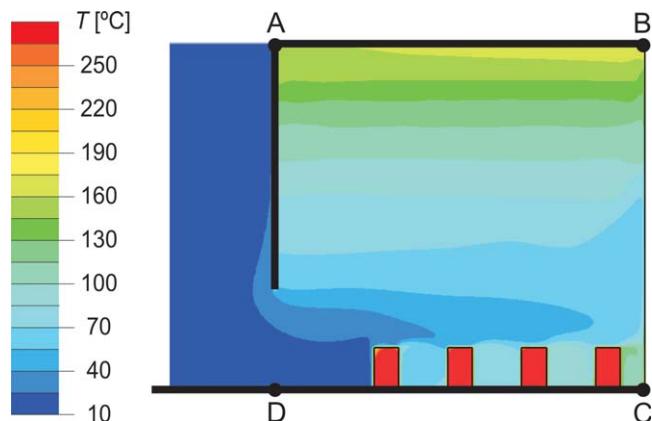


Figure 6. Prediction of temperature distribution under current conditions (plane ABCD as in Figure 3). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

Nevertheless, the largest DHW consumer is the sport and spa center. Considering an eight lane swimming pool of 420 m³ in volume, a swim learning and game pool of 70 m³ and a spa dynamic pool of 65 m³, the necessities in water re-heating may be estimated in 18 m³/h being raised 17°C. This flow rate is compatible with the minimum requirements established by the Spanish regulations for recirculation flow rate in public pool installations [29]. Besides the consumption in pool warming, this sport and spa center would also have other significant DHW consumers such as jacuzzi baths and showers. This leads to an average daily demand of 5900 kWh.

In the case of house heating, the data provided by IDAE [27] indicates an average annual power demand of 215 W for block apartments in the Spanish North Atlantic region (including Avilés area). Since the climate in this region is oceanic, with mild summers and chilly winters, it is reasonable considering that all the heating consumption takes place in the winter period, approximately during the 5 months from November to March. Consequently, the equivalent demand for the 500 block apartments during that 5-month period would be 6200 kWh per day. In the case of the hotel and sport and spa center, heating necessities will depend on the external surface area and façade finishing, which have not been defined yet. From consideration of mean values for other buildings with equivalent use and size, the daily energy consumption due to heating has been estimated in 480 kWh for the hotel and 1080 kWh for the sport and spa center, during the 5-month winter period.

Table 1 collects the data of thermal power demands for the winter and summer periods as obtained from the previous estimations. The general pattern of the annual energy demand is characterized by a maximum power demand of 1.075 MW for the winter period during daytime, which reduces to 278 kW at nighttime. In summer, the expected demand during daytime is close to 0.5 MW, whereas the nighttime demand can be considered negligible. Nevertheless, since these power data are average values during daytime or nighttime, they will be subject to significant fluctuations at different hours, depending on the daily conditions (meteorological, workday, or holiday).

RECOVERY AND TRANSPORT FACILITIES

The energy operator responsible to attend the power demands of consumers at the “Isla de la Innovación” has to be capable of satisfying even the demand peaks, and so the global supply system needs to be designed for power values well above those of Table 1. Besides, that system has to be reliable, i.e., the supply capability has to be very little dependent on expected or unexpected events. This means that, in the case of a DH system based on hot water recovered from an industrial plant, the energy distribution structure has to include auxiliary energy supply systems, for instance based on direct connection to the main natural gas or electricity networks. On one hand such alternative system has to allow for compensation of eventual production drops in the industrial plant; in fact, it has to be able to fully cover the energy supply whenever the plant has to stop, e.g., for

Table 1. Potential users' consumption.

	Average daily demand (kWh)			Average power (kW)	
	DHW	Heating	Daytime (16 hr)	Winter	Summer
Consumers					
Apartment blocks	3120	2580	534	258	138
Hotel	375	200	53	20	17
Sport and spa center	5900	450	488	-	332
Total	9395	3230	1075	278	487

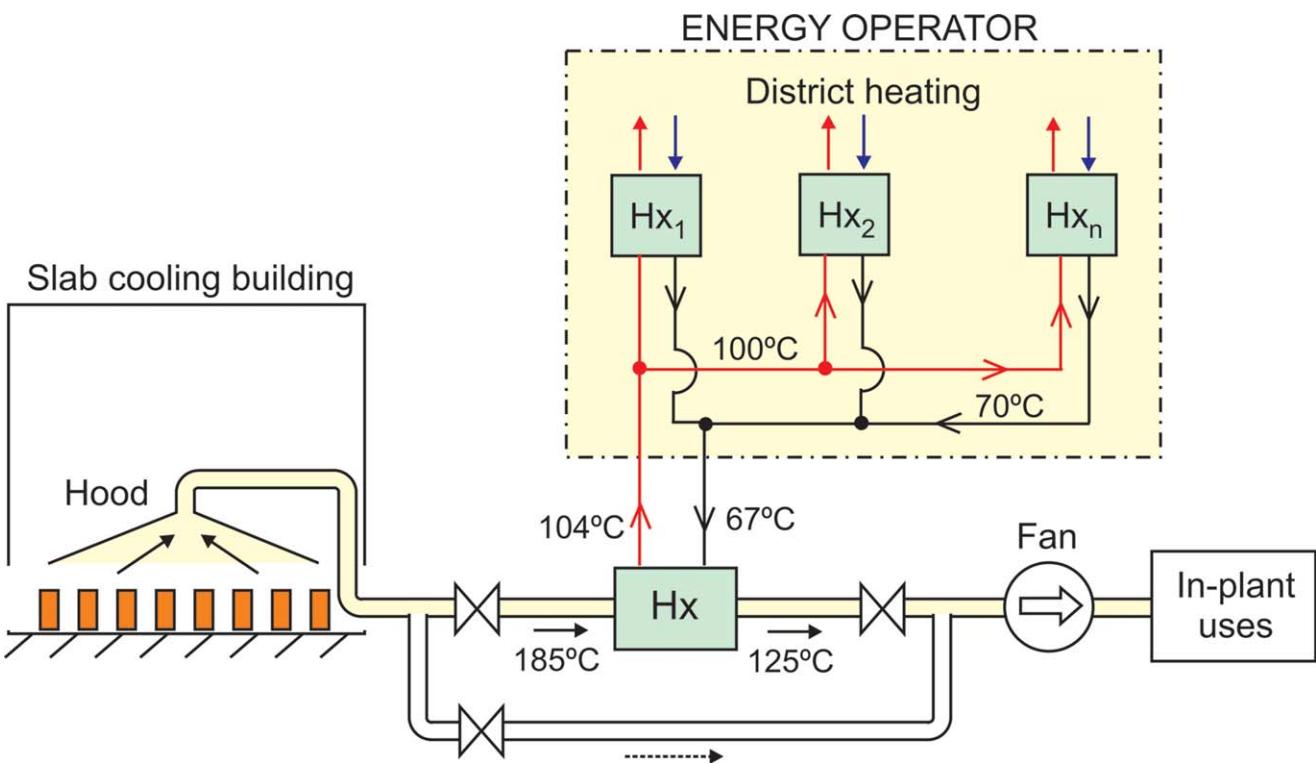


Figure 7. Scheme of the waste heat recovery system. [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

maintenance operation. And, on the other hand, that system can complement the energy supplied from the industrial source when the energy demand is at peaks, so that the installations for heat recovery and transport may be designed for not too large power values.

According to these considerations, it is reasonable to dimension the supply installation for a nominal power of 1.1 MW, which is slightly above the expected average value for daytime during the winter months (Table 1). The proposed solution, depicted in Figure 7, is formed by:

- Hoods in the cooling facility above the lines of slab stacks to accumulate and collect hot air (above 180°C).
- Thermally insulated air duct (2 m in diameter) with butterfly valves and fan to drive hot air from hoods through the primary heat exchanger (with normally closed by-pass valve) and then to other in-plant processes (as additional heating source). Nominal air mass flow rate = 25 kg/s.
- Shell-and-tube heat exchanger to heat water of the secondary circuit in about 37°C for an air temperature reduction of about 65°C.
- Two-way water pipeline (4 inch diameter, 2 × 3 km length) between the primary heat exchanger at the industrial plant and the customer heat exchangers at the consumer sites, with recirculation pump and valves. The pipelines are to be coated with high-grade thermal insulation and buried, so that water can be supplied at 100°C and returned at 70°C. Nominal water flow rate = 9 L/s.

The expected air flow of 25 kg/s at 185°C from the slab cooling building represents a continuous removal of approximately 4.3 MW. This is about half of the average power produced at that facility and so, in principle, it is compatible with the slab cooling process. Nevertheless, it is necessary to check that the hoods and the forced air current do not really induce undesired alterations in the cooling slab process.

For that purpose, new CFD simulations of the cooling facility were undertaken considering different schemes for

the location and size of the hoods as well as different degrees of lateral opening of the cooling building. The configuration finally proposed as most suitable consists of hoods that extend transversely in the building above the slab stacks and can be moved longitudinally on rails. Also, the lateral openings in the façades are to be reduced from 6 m high from ground down to 2 m by means of swinging panels, so that heat dissipation through the openings can be controlled. Figure 8a shows the geometry and grid used to simulate that configuration, which represents the left half of the calculation domain (plane ABCD in Figure 3). Figure 8b displays the central part of the hood, where hot air is being collected and extracted, with a detail of the triangular unstructured cells used at that zone. Like in the case of the simulations under current conditions, the ceiling was considered to be totally closed.

Figures 9 and 10 present the predictions obtained for the air velocity vectors and the temperature distribution for an air extraction at the top of the half-hood of 0.3 kg/(s·m), which is equivalent to 25 kg/s for the whole facility. The rest of parameters, including the heat generation rate at the stacks, were the same used for the cooling facility under current conditions. Figure 9 shows that the external air enters into the cooling building through the lateral opening and moves along the zone between the slab stacks and the hood until reaching the exit at the hood top, while creating rotation patterns in the regions between adjacent stacks as well as some back-flow on the low surface of the hood. This arrangement makes that air velocity close to the stacks surface is relatively high, up to 1.4 m/s, which favors the heat convection process, whereas most of the air above the hood is nearly at rest. Unlike the case of Figure 5, there is no significant warm airflow exiting through the lateral opening of the building.

Figure 10 shows that air temperature increases along the channel between the slab stacks and the hood, due to the

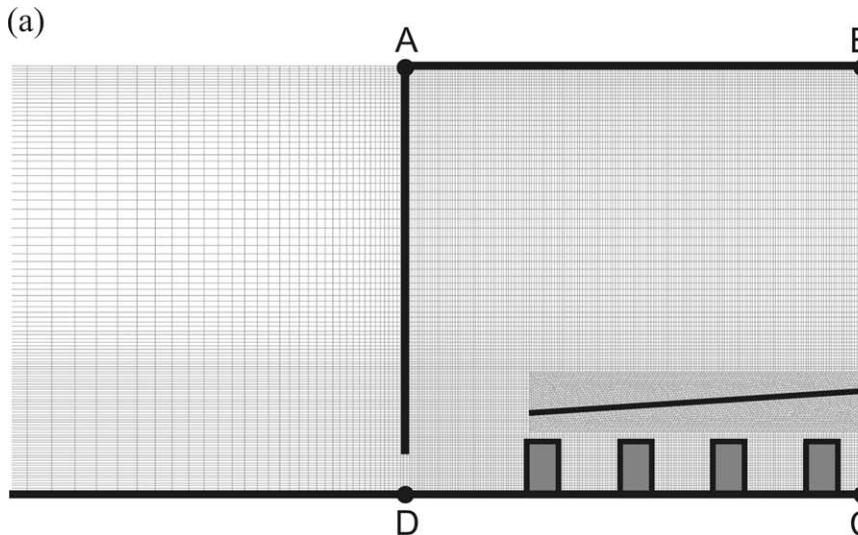


Figure 8. Geometry and grid used for CFD simulation of the modified cooling building: (a) building region; (b) grid detail of hood at the hot air suction port.

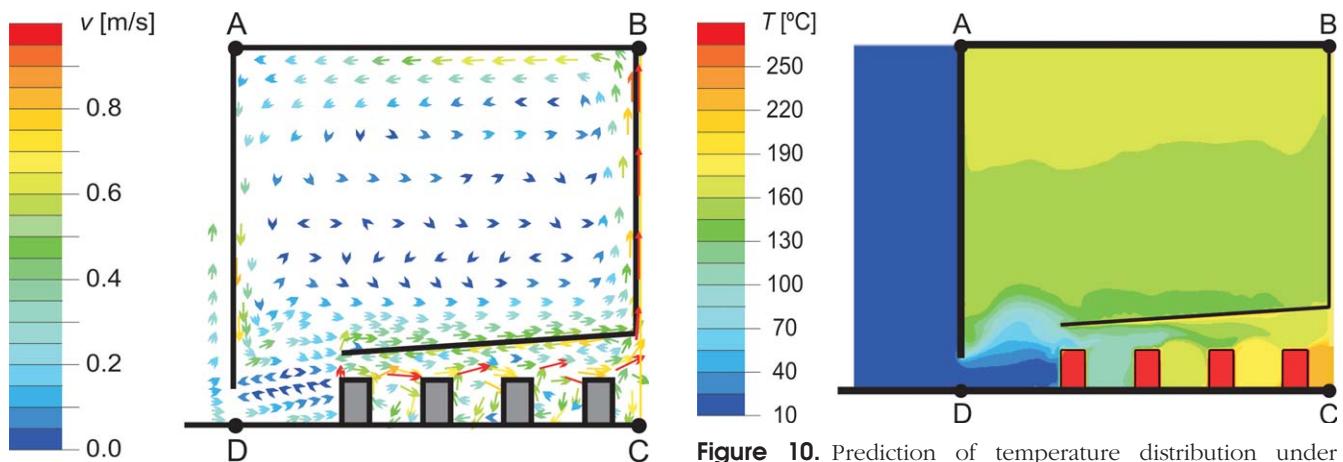


Figure 9. Prediction of air velocity vectors under technical solution (plane ABCD as in Figure 3). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

Figure 10. Prediction of temperature distribution under technical solution (plane ABCD as in Figure 3). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at wileyonlinelibrary.com.]

progressive absorption of heat from the slabs, until reaching values above 200°C in the central region of the building. In particular, the temperature of the air being extracted at the top of the hood results to be 185°C, which is the value assumed at the inlet of the main heat exchanger in Figure 7. The maximum temperature calculated in the domain, which is located inside the inner stack slab, was 498°C, while the average temperature on the surface of the stacks varied from 300°C (outer stack) to 368°C (inner stack). Besides, temperature results to be high on the hood, because of the direct heat radiation from the slabs. Finally, hot air is seen to accumulate in the ceiling region, but if necessary its temperature could be easily reduced by opening of local skylights.

Again, this simulation has assumed stationary average conditions, regardless of the foreseeable evolution of temperature values along time, but in spite of that, it is reasonable to consider that it represents the characteristic situation during the periods of maximum thermal power demand, i.e., during the winter months in daytime. Control mechanisms

are necessary to adapt the thermal power supply to the hourly fluctuating demand from consumers, as well as to prevent variations in the production schedule of the plant. These control mechanisms are:

- Variable velocity drives for the fan in the primary air circuit and for the pump in the secondary water circuit.
- Butterfly valves in the principle air line to isolate the primary heat exchanger in case of supply suspension, with possible opening of by-pass line to other in-plant processes.
- Placement or removal of hoods in the slab cooling building by displacement on rails.
- Opening or closing of swinging panels on the lateral side of the slab cooling building to modify the rate of heat transfer through them.

When necessary, the last two items allow returning to the current geometrical and physical conditions of the cooling process. That is the case of zero demand from consumers, like in summer during nighttime. For that reason, auxiliary cooling towers are not necessary. As conclusion of the

Table 2. Comparison on CFD data of the current conditions and the new proposed technology

	Current conditions	New proposed technology
Maximum velocity near the slabs	1 m/s	1.5 m/s
Temperature at the surface of the stacks (from outer to inner)	272–306°C	300–368°C
Maximum temperature at the ceiling	185°C	200°C
Maximum temperature inside the slabs	438°C	498°C

Table 3. Percentage distribution of engineering costs.

Item	Cost (%)
Equipment at slab cooling facility	18
Hoods	9
Ducts	5
Swinging panels	4
Hot air line	26
Ducts	5
Valves	4
Main heat exchanger	10
Fan, drive, control system	4
Exhaust	3
Waterline	40
Piping	15
Pumps, drives, control system	5
Civil works	20
Distribution to users	16
Secondary heat exchangers	6
Piping	6
Pumps, drives, control system	4

section is presented a comparison on CFD data of the current conditions and the new proposed technology (Table 2).

VIABILITY

The continuous industrial process analyzed, which is the last stage in slab cooling at a steel plant, produces a considerable amount of thermal energy that is not used at present. According to the statistics of the plant annual production, a conservative estimate for the corresponding average waste power available for uptake is 9 MW. Close to the plant area, there are a number of potential external users for that heat, which together require a thermal power of the order of 1.1 MW in winter and 0.5 MW in summer (daytime). Remaining hot air can also be used as additional heating source for other processes in the steel mill, but the specific analysis and the subsequent large modifications required at the current installations are beyond the scope of the present study. A special installation has been proposed for the recovery of that thermal energy and its distribution to external users. This installation involves modifications at the cooling facility itself, mounting of pipelines, heat exchangers and other fluid equipment, and civil works. Table 3 shows the estimation of percentage distribution of costs for four main engineering groups. The total engineering cost (excluding financial, insurance and license costs) has been estimated in 660 k€.

From an operational perspective, the project has to be coordinated between the steel company that owns the cooling facility and the energy operator that is in charge of the supply to customers (Figure 7), so that this supply is assured even if eventually the steel plant cannot provide enough thermal power to meet the customer demand. From the point of view of project development, however, it is very convenient that both companies and the local municipality establish a special partnership that holds the ownership of the DH system [30].

The expected business returns will depend on the price fluctuations in the energy market and on the special rates to be applied for each type of customer. Considering the power demands listed in Table 1 and an end-user discount policy [31] with respect to the consumer rates currently charged by the energy operator in the region, minimum annual returns can be estimated in 200 k€. After deducting operation and maintenance costs, the foreseeable payback period for the total project investment, including technical (Table 3) and financial costs, can be assessed in 6 years based on a conservative funding strategy. Though this amortization period may be considered high from a purely accounting perspective, there are other benefits to be kept in view, such as:

- The needs for environment protection and for reducing the energy dependence from conventional sources are impelling the policy rules in each country to become gradually more demanding in terms of energy efficiency, for instance through energy taxation, waste regulations affecting the energy system or tradable-emission allowances, as described in [32] for the case of Göteborg. This trend is particularly strong in the field of energy intensive industry [33–35]. Hence, it is to be expected that not taking energy saving measures like the one proposed in this article can result in the closure of factories in the short-term.
- On the other hand, public administrations should favor this type of actions towards energy saving and environmental protection [36] by adequate incentive policies (i.e., tax breaks and soft loans) that contribute to diminish the payback period.
- In addition, the firms involved in the project would gain a significant benefit in terms of image projection as eco-friendly companies that promote energy-efficiency measures. This image would be strengthened by the amplifying effect of the development of the “Isla de la Innovación,” to which this DH study is associated. In turn, the project would also contribute to reinforce the concept and subsequent projection of the “Isla de la Innovación” area.

Based on the foregoing, it can be concluded that the project is technically and economically feasible, and, moreover, it can provide other intangible benefits of interest for the promoting companies and also from the perspective of social environment.

CONCLUSIONS

A study has been conducted on a DH application in Avilés, in northern Spain, based on waste heat recovery at a relatively close steel mill, in particular from the cooling process of hot steel slabs. As a first requirement, the heat recovery system should not modify the characteristics of the current cooling process while providing sufficient thermal power. Because of that, the design and dimensions of the heat recovery system were assessed based on the numerical simulation of the airflow and heat transfer process at the cooling site by means of appropriate CFD software. In particular, several possible configurations were considered and tested including a variety of hoods for hot air gathering and different enclosure degrees for the current façades of the cooling building. This procedure proved to be convenient and efficient to analyze the effects of the geometry and

operation parameters of the system as a previous step for the subsequent selection of the most satisfactory plant layout. Besides, this hot air recovery system was complemented with a transportation network with heat exchangers, insulated piping and fluid machinery, capable to distribute above 1.1 MW in thermal power to customers. Investment for the technical costs of this facility was estimated in 660 k€.

On the other hand, the thermal power supplied is expected to be applied for heating and DHW in new apartment blocks and a hotel and, overall, for pool warming at a sport and spa center. Despite of the relative favorable conditions of the potential customers, the total payback period (based on conservative assumptions) has been estimated in 6 years and so the investment may be considered questionable from a purely accounting point of view. However, the concurrence of additional benefits related to energy saving regulations, incentive policies, and image projection as green company can make the investment very attractive if not necessary.

Under a wider perspective, planning the obliged recovery of waste energy at cross-industries with continuous processes should consider both technical and economical aspects. In general, checking the technical viability will require detailed analysis of the effects of the modifications proposed on the process itself, by means of adequate simulation tools (like software for lumped component modeling of chemical processes [30] or a CFD software as in this study). On the other hand, the economic viability may be strongly dependent on having a proper incentive framework where the heat price is set just below the price customers would pay for an alternative heating technology [31]. Finally, the valorization of intangible benefits such as company image should be taken into account for this innovative solution in sustainable and energy-efficiency measures.

ABBREVIATIONS

CFD	Computational fluid dynamics
CHP	Combined heat and power
DH	District heating
DHW	Domestic hot water
IDAE	Institute for Energy Diversification and Saving

LITERATURE CITED

- IEA (2011). Co-generation and renewable—Solutions for a low-carbon energy future, IEA: Paris.
- EU (2007). Strategy on climate change: the way ahead for 2020 and beyond. European Energy Policy. Available at: http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/l28188_en.htm. Accessed on September 28, 2012.
- IEA (2011). Clean energy—Progress report. IEA input to the clean energy ministerial, IEA: Paris.
- Ammar, Y., Joyce, S., Norman, R., Wang Y., & Roskilly A. (2012). Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Applied Energy* 89, 3–20.
- Tanaka, K. (2012). A comparison study of EU and Japan methods to assess CO₂ emission reduction and energy saving in the iron and steel industry. *Energy Policy* 51, 578–585.
- Larsson, M., & Dahl, J. (2003). Reduction of the specific energy use in an integrated steel plant—The effect of an optimisation model. *ISIJ International* 43, 1664–1673.
- Matsuda, K., Tanaka, S., Endou, M., & Iiyoshi, T. (2012). Energy saving study on a large steel plant by total site based pinch technology. *Applied Thermal Engineering* 43, 14–19.
- Álvarez, E., Gutiérrez, A.J., Suárez, J.M., & Xiberta, J. (2012). Steel mill slags energy potential: the case of the steel factory of Arcelor-Mittal in Asturias (Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy* 14, 869–877.
- Mahapatra, K., & Gustavsson, L. (2009). Influencing Swedish homeowners to adopt district heating system. *Applied Energy* 86, 144–154.
- Lygerud K., & Peltola-Ojala P. (2010). Factors impacting district heating companies' decision to provide small house customers with heat. *Applied Energy* 87, 185–190.
- Ghafghazi S., Sowlati T., Sokhansanj S., & Melin S. (2010). A multicriteria approach to evaluate district heating system options. *Applied Energy* 87, 1134–1140.
- Difs K., Danestig M., & Trygg L. (2009). Increased use of district heating in industrial processes—Impacts on heat load duration. *Applied Energy* 86, 2327–2334.
- Möller B., & Lund H. (2010). Conversion of individual natural gas to district heating: geographical studies of supply costs and consequences for the Danish energy system. *Applied Energy* 87, 1846–1857.
- Rezaie B., & Rosen M. (2012). District heating and cooling: review of technology and potential enhancements. *Applied Energy* 93, 2–10.
- Villar A., Arribas J.J., & Parrondo J. (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technologies and Environmental Policy* 14, 29–39.
- New European Economy (2013). Avilés in the Atlantic Arc. Available at: <http://www.neweuropeaneconomy.com/home-mainmenu-51/fdi-mainmenu-59/556-aviles-in-the-atlantic-arc>. Accessed on January 6, 2013.
- Alcoa (2013). Avilés Smelter. Available at: http://www.alcoa.com/locations/spain_aviles/en/about/profile.asp. Accessed on January 30, 2013.
- ArcelorMittal (2013). At a glance. Available at: <http://www.arcelormittal.com/corp/who-we-are/at-a-glance>. Accessed on February 18, 2013.
- Saint-Gobain (2013). Glass. Available at: <http://www.saint-gobain-glass.com/>. Accessed on January 11, 2013.
- ArcelorMittal (2009). Investor presentations. Available at: http://www.arcelormittal.com/corp/~/media/Files/A/ArcelorMittal/investors/presentations/investor-days/2009/627-27-1-0-ArcelorMittalAsturias_200903.pdf. Accessed on September 15, 2012.
- Fluent Inc. User's guide. 10 Cavendish Court, Lebanon, NH03766, 2006.
- Wu, B., Arnold, A.M., Xu, Z., Arnold, E., Downey, G., & Zhou, C.Q. (2008). CFD analysis of batch-type reheating furnace. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions* (volume 6, pp. 753–759).
- Fernández, J.M., Santolaria, C., Rodríguez-Somoano, J., & Alvarez, M. (2009). Multiphase modelling of the steel grade transition in a continuous casting tundish. *Proceedings of ASME Fluids Engineering Summer Meeting* (Volume 1, pp. 2183–2194).
- Shamsi, M.R.R. I., & Ajmani, S.K. (2010). Analysis of mould, spray and radiation zones of continuous billet caster by three-dimensional mathematical model based on a turbulent fluid flow. *Steel Research International* 81, 132–141.
- Warzecha, M. (2011). Numerical and physical modelling of steel flow in a one-strand continuous casting tundish. *Metallurgija* 50, 147–150.
- Gutiérrez, A.J., Álvarez, E., Río, J.L., Suárez, J.M., & Xiberta, J. (2013). Design and evaluation of a heat recuperator for steel slags. *Applied Thermal Energy* 56, 11–17.
- IDAE (2011). Análisis del Consumo Energético del Sector Residencial en España. Informe Final. Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE, Madrid.
- CTE (2009). DB HE4 Ahorro de Energía. CTE, Madrid.
- BOE (2003). Anexo 5 R.D. 865/2003, Criterios higiénicos-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. Ministerio de Sanidad y Consumo, Madrid.

30. Ajah, A., Patil, A., Herder, P., & Grievink, J. (2007). Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system. *Applied Thermal Engineering* 27, 1158–1164.
31. Sjödin, J., & Henning, D. (2004). Calculating the marginal costs of a district-heating utility. *Applied Energy* 78, 1–18.
32. Holmgren, K. (2006). Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources—The case of Göteborg. *Applied Energy* 83, 1351–1367.
33. Sivill, L., Manninen, J., Hippinen, I., & Ahtila, P. (2013). Success factors of energy management in energy-intensive industries: Development priority of energy performance measurement. *International Journal of Energy Research* 37, 936–951.
34. Thollander, P., Rohdin, P., Moshfegh, B., Karlsson, M., & Söderström, M. (2013). Energy in Swedish industry 2020—Current status, policy instruments, and policy implications. *Journal of Cleaner Production* 51, 109–117.
35. Hasanbeigi, A., Lobscheid, A., Lu, H., Price, L., & Dai, Y. (2013). Quantifying the co-benefits of energy-efficiency policies: A case study of the cement industry in Shandong Province. *Science of the Total Environment* 458, 624–636.
36. Chubbs, S.T., & Steiner, B.A. (1998). Life cycle assessment in the steel industry. *Environmental Progress* 17, 92–95.

6. Informe sobre la Calidad de las Publicaciones

En este punto se incluye la información sobre la calidad y el factor de impacto de las publicaciones presentadas en el punto anterior.

Artículo I

- Villar A, Arribas JJ, Parrondo J (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technologies and Environmental Policy* 14:29-39. DOI: 10.1007/s10098-011-0385-x.
 - ✓ Editorial: Springer-Verlag
 - ✓ Estado: **Publicado**
 - ✓ Citas: 4 (Web of Science), 3 (Scopus), 11 (Google Scholar)
 - ✓ Factor de impacto (JCR 2012): 1,827
 - ✓ Factor de impacto (5 años): 1,86
 - ✓ Categoría SJR (SCImago): 18/72 (Q1 – Environmental Engineering)
 - ✓ Categoría JCR: 20/42 (Q2 – Environmental Engineering)

Artículo II

- Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2014). Waste heat recovery technology in continuous casting process. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI:10.1007/s10098-014-0801-0.
 - ✓ Editorial: Springer-Verlag
 - ✓ Estado: **Publicado online**
 - ✓ Factor de impacto (JCR 2012): 1,827
 - ✓ Factor de impacto (5 años): 1,86
 - ✓ Categoría SJR (SCImago): 18/72 (Q1 – Environmental Engineering)
 - ✓ Categoría JCR: 20/42 (Q2 – Environmental Engineering)

Artículo III

- Villar A, Parrondo J, Arribas JJ (2013). District heating from industrial surplus heat in Avilés (Spain). *Environmental Progress and Sustainable Energy*. DOI:10.1002/ep.11883.
 - ✓ Editorial: American Institute of Chemical Engineers (AIChE)
 - ✓ Estado: **Publicado online (2013)**
 - ✓ Factor de impacto (JCR 2012): 0,865
 - ✓ Factor de impacto (5 años): 1,553
 - ✓ Categoría SJR (SCImago): 27/62 (Q2 – Renewal Energy, Sustainability and the Environment)
 - ✓ Categoría JCR: 79/133 (Q3 – Engineering Chemical)