

# DESCARBONIZACIÓN DEL PROCESO CERÁMICO CON CALENTAMIENTO ELÉCTRICO PROCEDENTE DE FUENTES RENOVABLES

**S. Casadio, D. Costa, C. Ricci, A. Bresciani**

**SACMI, Imola BO, Italia**

## 1. RESUMEN

El sector de baldosas y placas cerámicas es uno de los sectores industriales que más necesita una conversión de sus propios procesos de alta intensidad energética, pasando gradualmente del uso de combustibles fósiles (como el gas natural) a vectores sostenibles (como las energías renovables, el hidrógeno verde, etc.), para poder satisfacer las demandas de reducción de emisiones previstas en el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) (reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero de al menos un 55% para el 2030 respecto a los niveles de 1990).

Además, la reciente crisis energética, que ha llevado a un aumento significativo del coste del gas natural, empuja al sector cerámico a buscar respuestas alternativas al uso del gas en los procesos térmicos, en particular para aquellos a altas temperaturas.

Otro factor que no debe pasarse por alto, es el constante aumento de los costes relacionados con las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, reguladas por el sistema EU ETS, que probablemente seguirán aumentando en los próximos años, impulsando aún más el abandono de los combustibles fósiles.

Paralelamente, se está asistiendo en estos últimos tiempos a una verdadera carrera por instalar campos solares y eólicos, capaces de explotar los recursos naturales renovables y proporcionar una cuota de energía eléctrica "verde" cada vez mayor (en el 2022 al menos el 58% de la energía eléctrica en Europa era de origen no fósil).

En la producción cerámica hay dos fases principales de uso de energía térmica que constituyen casi la totalidad de las emisiones directas de CO<sub>2</sub>. De hecho, la fase de atomización contribuye aproximadamente el 40% de estas emisiones, el 60% restante procede de las fases de secado y cocción.

La atomización, dada su temperatura de trabajo entre 450 y 600 °C, es adecuada para una conversión parcial o integral del generador de calor de combustible fósil (en general, gas metano) a un generador eléctrico alimentado con energía de origen no fósil (y por lo tanto, con cero emisiones de CO<sub>2</sub>).

El presente estudio tiene como objetivo definir y poner a punto un sistema de calentamiento del aire que entra en el atomizador capaz de funcionar en modo híbrido (gas + electricidad) con una contribución eléctrica variable de 0% a 100% (cero emisiones).

En concreto, el ensayo se centró en tres aspectos técnicos: el estudio fluidodinámico del generador de calor para optimizar la geometría del intercambio térmico en condiciones de caudal y velocidad del flujo no presentes en otras aplicaciones industriales, la modulación de las importantes potencias involucradas (de 1 a 40 MW), la gestión de la contribución eléctrica en base a la disponibilidad de energía renovable (alternancia día/noche, parcialización del amanecer/atardecer).

El estudio ha mostrado la viabilidad industrial de un generador de calor híbrido para aplicar a los atomizadores para la cerámica, tanto nuevos como existentes, permitiendo de este modo una descarbonización sustancial del proceso, garantizando al mismo tiempo una inalterada productividad y calidad de las baldosas y placas cerámicas obtenidas de esta manera.

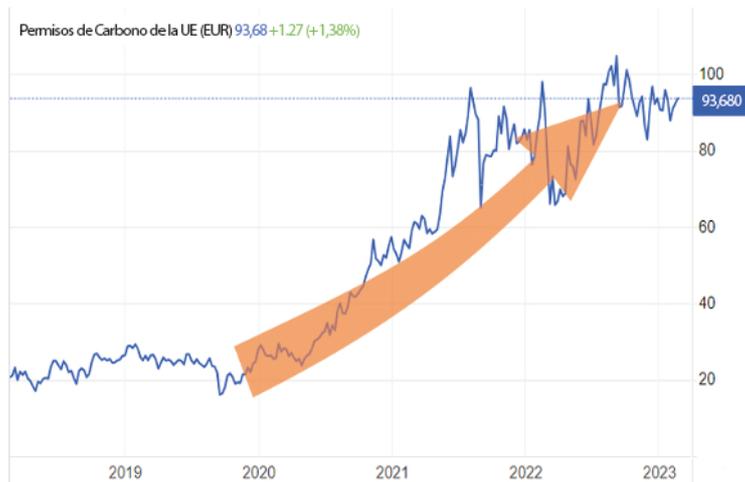
## 2. INTRODUCCIÓN

Para poder cumplir las directrices de reducción de emisiones en el “*European Green Deal*” (Pacto Verde Europeo) (reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% de aquí al 2030 con respecto a los niveles de 1990), el sector de las baldosas y placas cerámicas será uno de los sectores industriales (como el cemento, el vidrio y el acero) que tendrá que reconvertir sus procesos de alto consumo energético (también denominados procesos “*hard to abate*” (difíciles de mitigar)) [1].

El primer motor de reducción de las emisiones es la mejora de la eficiencia global de los procesos y de las instalaciones, que se produce de forma natural como desarrollo de la tecnología y que ya ha permitido al sector reducir el consumo específico por m<sup>2</sup> de producto en más del 35% con respecto a 1990 [2].

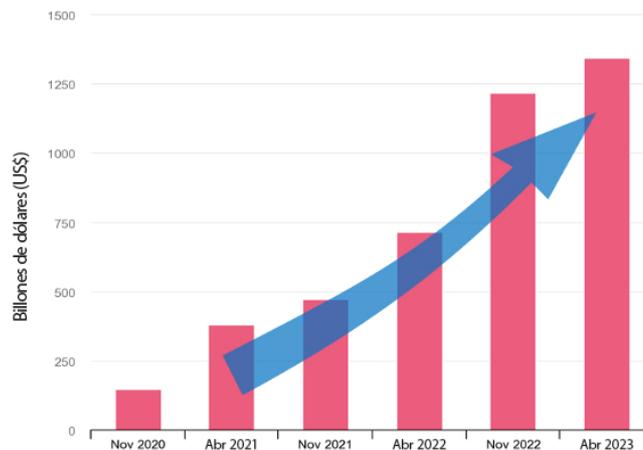
La segunda dirección de investigación y desarrollo es la sustitución gradual de los combustibles fósiles (por ejemplo, el gas natural) con fuentes de energía medioambientalmente sostenibles (como la electricidad procedente de fuentes renovables o el hidrógeno verde) que garanticen una reducción sustancial o total de las emisiones de gases de efecto invernadero en las fases del proceso que requieren energía térmica.

El mecanismo de regulación de las emisiones *EU ETS* (*Emissions Trading System*) (régimen de comercio de derechos de emisión de la Unión Europea) ha provocado recientemente un aumento considerable de los costes relacionados con las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, como se muestra en la **Fig 1**. con un valor por tonelada de CO<sub>2</sub> que en tres años ha pasado de 20 euros (en el 2020) a más de 100 euros (en marzo de 2023) y que probablemente seguirá aumentando en los próximos años, lo que impulsará aún más el abandono de los combustibles fósiles hacia tecnologías “*carbon neutral*” (de neutralidad en carbono).



**Fig. 1** – Tendencia de las cotizaciones ETS [3]

Paralelamente, asistimos en estos últimos tiempos a una verdadera carrera por instalar parques solares y eólicos, para poder explotar los recursos naturales renovables y poner a disposición una cuota cada vez mayor de energía eléctrica "verde". También los gobiernos llevan tiempo incentivando, en todo el mundo, las inversiones en energías limpias, con políticas específicas y desgravaciones fiscales. En la **Fig.2** se presenta la tendencia global a nivel mundial de estas inversiones; como se puede ver, la progresión es similar a la del gráfico de la **Fig.1**.

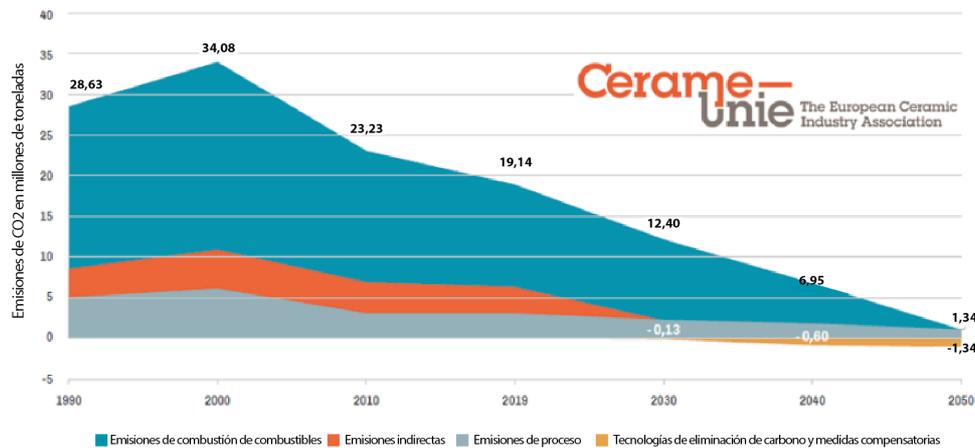


**Fig. 2** – Gasto público para el apoyo a las inversiones en energía limpia [4]

En el 2023, por primera vez, las inversiones mundiales en energía limpia superaron a las inversiones en energía fósil. Esto significa que el coste de la energía verde disminuirá en el futuro y (también) será cada vez más conveniente económicamente.

La industria cerámica europea lleva mucho tiempo en la senda de la conversión energética progresiva de sus procesos productivos. Para cumplir las exigencias de la UE, la Cerame-Unie (Asociación Europea de la Industria Cerámica) ha desarrollado un modelo de reducción de las emisiones que combina una serie de medidas para obtener una reducción gradual hasta alcanzar la neutralidad de carbono antes del 2050.

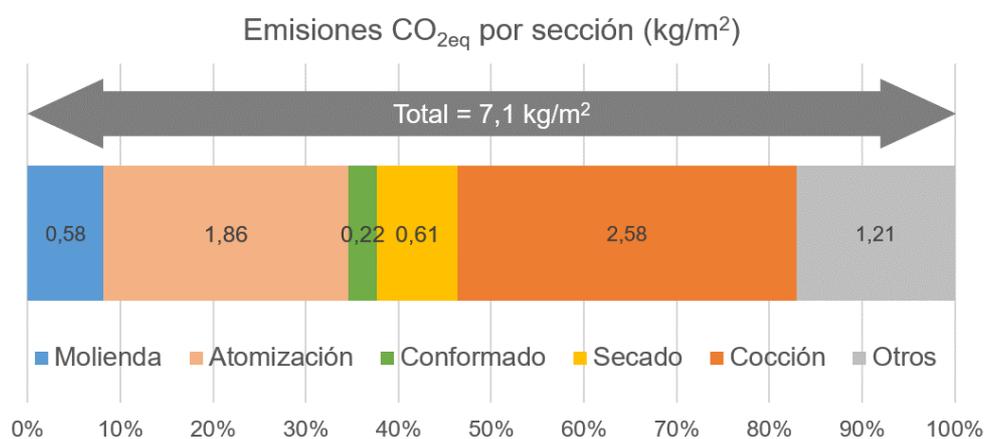
El gráfico de la **Fig.3** muestra las emisiones acumuladas (millones de toneladas de CO<sub>2</sub>) a lo largo de las décadas, desde el 1990 hasta la actualidad, y una previsión hasta el 2050 (cuando se espera alcanzar la neutralidad de carbono) para la industria cerámica europea. La combustión directa de los combustibles (gráfica azul) representa obviamente la mayor parte de las emisiones totales.



**Fig. 3** – Emisiones históricas y previsiones hasta el 2050 de la industria cerámica europea [5]

### 3. EL ATOMIZADOR CERÁMICO

Al analizar las emisiones directas de CO<sub>2</sub> en el ciclo de producción de las baldosas cerámicas [5], se obtiene una distribución por fases productivas, como la de la **Fig.4**. Entre las fases productivas que requieren energía térmica (atomización, secado y cocción), la fase de atomización contribuye aproximadamente el 40% (1,86 kg de CO<sub>2</sub> sobre un total de 5,05 kg de CO<sub>2</sub> procedentes de los procesos térmicos).



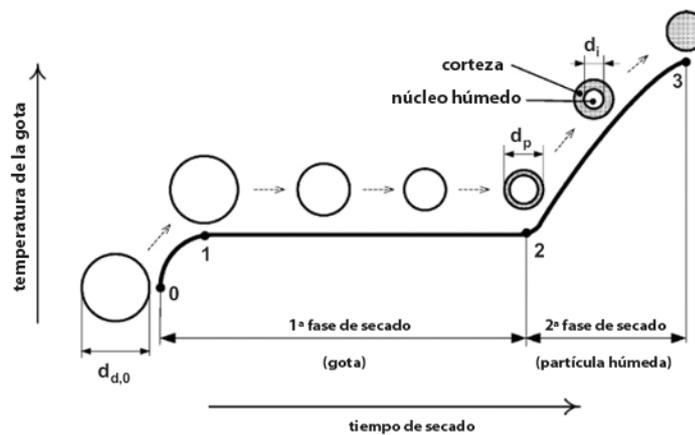
**Fig. 4** – Emisiones actuales de CO<sub>2</sub> subdivididas entre las secciones de la planta cerámica [2]

La fase de atomización requiere grandes volúmenes de aire caliente a una temperatura intermedia (entre 450 y 600 °C), sin ningún requisito particular de pureza, y ha sido durante mucho tiempo objeto de soluciones de eficiencia energética con recuperación de humos de combustión, por ejemplo, de plantas de cogeneración eléctrica con turbina de gas o motor de combustión interna alternativo.



**Fig. 5** – Instalación moderna de atomización

En el interior de la torre de atomización (ver **Fig.5**), se produce un intercambio de calor entre las gotas de barbotina atomizadas y los humos calientes. El producto cerámico alcanza temperaturas máximas de aprox. 60 °C y no sufre ninguna transformación química inducida por la atmósfera o por la temperatura, como se representa en la **Fig.6**.



**Fig. 6** – Evolución en el tiempo del secado de la gota[6]

Los humos entran sin filtrar en la cámara de secado; las eventuales cenizas u otros productos de la combustión no alteran el proceso de secado, pero pueden ser considerados como contaminantes en función de la pureza requerida para el polvo atomizado. El atomizador trabaja normalmente siempre a plena carga, con pequeñas paradas para limpieza y mantenimiento; por lo tanto, es muy adecuado para acoplarse a sistemas de recuperación de calor residual o de autoproducción de energía, por ejemplo, mediante cogeneración.

En la atomización, la sustitución del combustible fósil (de cualquier naturaleza gaseosa, líquida o sólida) por **hidrógeno** no parece presentar dificultades técnicas particulares, siempre que se utilicen tecnologías adecuadas y componentes certificados.

Para obtener una verdadera descarbonización del proceso, sería necesario utilizar el hidrógeno verde como combustible. A fecha de hoy, su producción se obtiene mediante electrólisis del agua, utilizando energía eléctrica procedente de fuentes renovables. Esto hace que su uso no sea rentable, ya que cuesta aproximadamente 2 veces más que la energía eléctrica y 4 veces más respecto al gas natural que hoy cubre casi la totalidad de las necesidades en Europa.

El uso del hidrógeno solamente está justificado en procesos a muy alta temperatura (más de 1.000 °C) o cuando se requieren condiciones especiales de pureza de la atmósfera de combustión.

Para procesos térmicos con temperaturas de hasta 600 °C, se ha analizado la posibilidad de utilizar la energía eléctrica directamente en un calentador eléctrico sin tener que descontar las pérdidas de energía debidas al proceso de electrólisis para la producción de hidrógeno.

Por tanto, para la atomización resulta interesante la conversión parcial o total del generador de calor, pasando de combustible fósil a un **generador eléctrico híbrido** alimentado con energía de origen no fósil (y, por tanto, con cero emisiones de CO<sub>2</sub>).

#### 4. EL GENERADOR DE CALOR HÍBRIDO

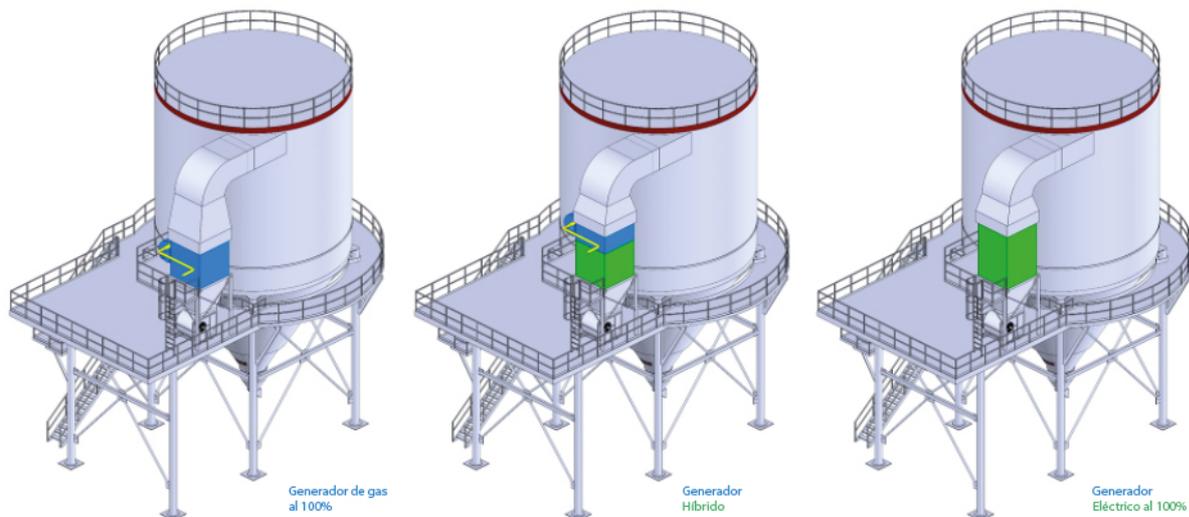
Se ha desarrollado (y patentado) un atomizador innovador para cerámica provisto con un sistema de calentamiento del aire de entrada capaz de funcionar en modo híbrido (fósil + eléctrico) con una contribución eléctrica variable del 0% al 100% y, en consecuencia, con emisiones de CO<sub>2</sub> variables.

La **Fig.7** ilustra tres posibles configuraciones / condiciones de funcionamiento del sistema:

- generador 100% fósil: es la condición equivalente a las instalaciones actuales, y se utiliza cuando, por la razón que sea, no se dispone de energía eléctrica procedente de fuentes renovables (autoproducida o comprada en la red). En este caso, las emisiones de CO<sub>2</sub> son máximas.
- generador híbrido: cuando se dispone de una parte de energía eléctrica verde pero no es suficiente para la potencia total del sistema, el generador integra una fracción de combustible fósil hasta alcanzar la potencia térmica necesaria. La presencia del quemador de combustible fósil y del calentador eléctrico garantiza la máxima flexibilidad al sistema, manteniendo la rapidez y eficacia de regulación en cada una de las condiciones de disponibilidad de las distintas fuentes energéticas.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> son intermedias y relacionadas con la cantidad de combustible fósil utilizado.

- generador 100% eléctrico: cuando la energía eléctrica renovable es suficiente, el sistema funciona únicamente con el calentador eléctrico. En estas condiciones, las emisiones de CO<sub>2</sub> son nulas.



**Fig. 7** – Posibles configuraciones del sistema de calentamiento

El generador eléctrico utiliza una nueva clase de calentadores de alta potencia, que se han desarrollado e introducido recientemente en el mercado. La **Fig.8** muestra un detalle concreto de las resistencias eléctricas que componen estos calentadores.



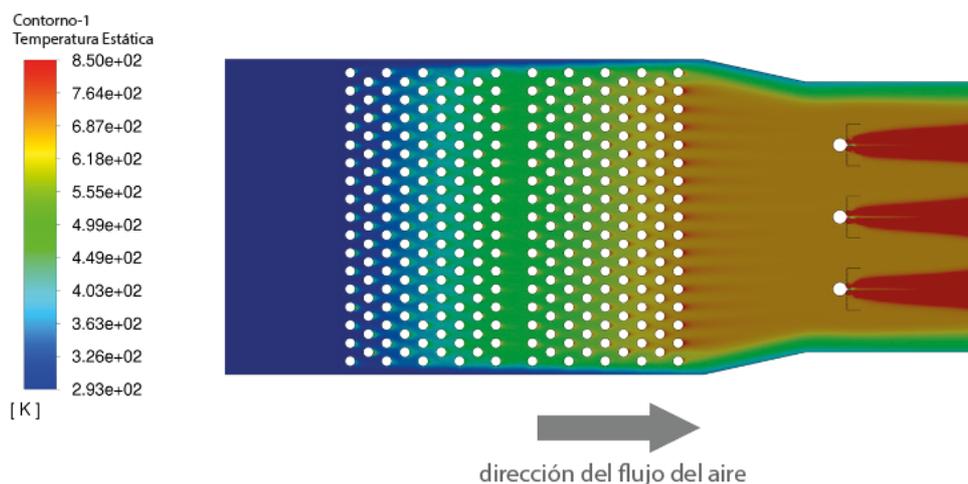
**Fig. 8** – Detalle de las resistencias que componen el calentador eléctrico

Vista la gran potencia térmica que requieren los atomizadores industriales -una gama típica de máquinas para industrias cerámicas va desde 1 a 40 MW térmicos-, se ha adoptado una solución modular, que permite combinar un número adecuado de calentadores, hasta alcanzar la potencia de proyecto. La construcción modular del calentador eléctrico permite dimensionarlo en función de la disponibilidad de energía verde de la planta, considerando la posibilidad de ampliaciones posteriores.

Para maximizar la eficiencia del equipo y contener sus costes, se ha desarrollado un sistema electrónico de regulación de la potencia térmica que garantiza una eficiencia de conversión superior al 98%.

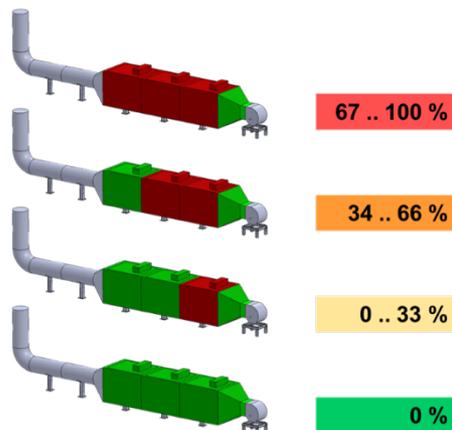
Las actividades de diseño y ensayo se han centrado en tres aspectos técnicos:

- el estudio fluidodinámico del generador de calor para optimizar la geometría de intercambio térmico en condiciones de caudal y velocidad del flujo que no están presentes en otras aplicaciones industriales.



**Fig. 9** – Análisis fluidodinámico del generador híbrido: se observa la sección de las resistencias eléctricas seguidas de tres quemadores de combustible. La temperatura aumenta progresivamente desde 20 °C hasta aprox. 600 °C

- la modulación de las importantes potencias involucradas: el diseño modular permite la inserción secuencial de los diversos módulos en función de la demanda térmica del sistema. El uso de los más avanzados sistemas de alimentación permite parcializar la contribución de cada etapa individual con la máxima precisión de regulación de la temperatura.



**Fig. 10** – Ejemplo de construcción modular de un generador (3 módulos)

- la gestión de la contribución del quemador térmico y del calentador eléctrico en base a la disponibilidad instantánea de las dos fuentes de energía (alternancia día/noche, parcialización amanecer/atardecer). Se han implantado sofisticados programas de control automático para gestionar mejor los períodos transitorios, evitando cualquier alteración tecnológica en el producto acabado (el polvo atomizado).

Las tablas de la **Fig.11** muestran una comparación entre las principales características y prestaciones del generador de calor en las tres configuraciones de la **Fig 7.**, dimensionado para evaporar hasta 9.000 litros/hora de agua (ATM90). La versión híbrida se ha considerado aquí con el 30% de potencia térmica suministrada por los módulos de resistencias eléctricas.

Tipo de generador		Full carbon (Carbono total)	Hybrid (Híbrido)	Full electric (Eléctrico total)
Cuota de la parte eléctrica	%	0	30	100
Potencia nominal total	kW	8.720	8.720	8.720
Potencia nominal quemador de gas	kW	8.720	6.100	0
Potencia nominal resistencias eléctricas	kW	0	2.620	8.720
Caudal aire ambiente	kg/h	63.300	63.300	63.300
Temperatura de trabajo	°C	550	550	550
Producción de polvo (*)	kg/h	21.200	21.200	21.200
Potencia utilizada total	kW	7.850	7.850	7.850
Coefficiente de carga térmica	%	90	90	90
Potencia utilizada quemador de gas	kW	7.850	5.230	0
Emisión de CO <sub>2</sub> (**)	t/año	11.460	7.630	0

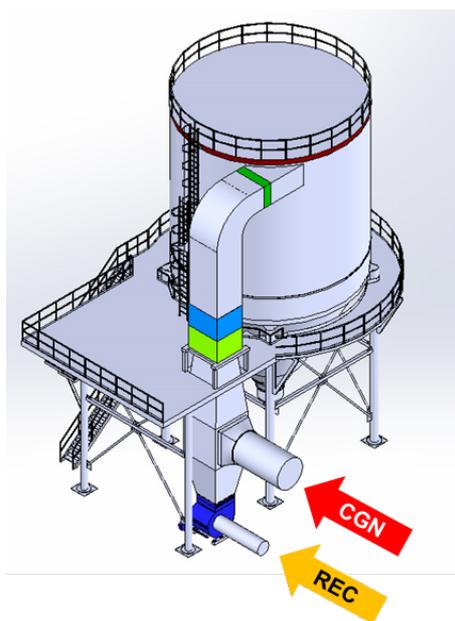
(\*) con humedad de barbotina 34% y humedad a la salida 6%  
 (\*\*) considerando 7.000 horas de trabajo/año

**Fig. 11** – Principales características de los generadores de calor

## 5. CONCLUSIONES

El nuevo atomizador con generador de calor híbrido desarrollado por SACMI no sólo permite una progresiva reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (hasta del 100%, cuando se alimenta totalmente con electricidad verde), sino que también proporciona las siguientes ventajas

- **Mejor eficiencia global** (>98%) respecto a las soluciones híbridas con hidrógeno: no hay pérdidas de conversión en el proceso de electrólisis (actualmente al menos del 30%), y por consiguiente una mayor eficiencia en la conversión de la energía eléctrica en energía térmica.
- Las **características generales** de los nuevos atomizadores (como velocidad y volúmenes de aire) siguen siendo las mismas que las de los aparatos tradicionales, lo que facilita su regulación.
- Los sistemas de calentamiento eléctrico no generan **agua de combustión adicional**, como lo hacen los sistemas convencionales y los de hidrógeno; por lo tanto, los humos calientes son más secos, lo que beneficia la eficiencia de secado de la máquina.
- El **diseño modular** y el control del generador permiten al usuario regular con precisión el consumo eléctrico, en el caso de energía verde autogenerada (por ejemplo, con sistemas fotovoltaicos).
- El generador innovador puede instalarse en combinación con cualquier otro **sistema de recuperación de calor** (por ejemplo, humos calientes procedentes del horno, de la planta de cogeneración, etc.).



**Fig. 12** – Generador innovador con alimentación de humos calientes procedentes de hornos (REC) o de plantas de cogeneración (CGN)

El nuevo generador de calor híbrido puede instalarse en atomizadores para cerámica, tanto nuevos como existentes, permitiendo de este modo una sustancial descarbonización del proceso, garantizando al mismo tiempo que no se altera ni la productividad ni la calidad de las baldosas y placas cerámicas obtenidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] PALTSEV S., MORRIS J., KHESHGI H., HERZOG H., "Hard-to-Abate Sectors: The role of industrial carbon capture and storage (CCS) in emission mitigation", Applied Energy, 300 (2021)
- [2] A. BRESCIANI, C. RICCI, "New developments for ceramic plants with low environmental impact", Qualicer 2022
- [3] <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (update 22/08/2023)
- [4] IEA, Government spending for clean energy investment support, Q2 2023 <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/government-spending-for-clean-energy-investment-support-and-crisis-related-short-term-consumer-energy-affordability-measures-q2-2023>
- [5] CERAME-UNIE, "Ceramic roadmap to 2050", <https://www.ceramicroadmap2050.eu/>
- [6] "Ceramic Tile Technology", Volume II, 3<sup>rd</sup> Ed., SACMI (2022)