Evolución hacia la cerámica fotovoltaica

L. SÁNCHEZ-MUÑOZ

Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. Campus Cantoblanco, c/ Kelsen 5, 28049 Madrid, España lsm@icv.cisc.es

Actualmente se distinguen dos tipos de cerámica, una tradicional y otra avanzada. El origen y desarrollo de la primera es anterior a los cambios revolucionarios en Ciencia y Tecnológica del siglo XIX, mientras que la segunda es su consecuencia directa. La cerámica tradicional, que está relacionada sobre todo con las necesidades humanas primarias y en particular a sus construcciones, es muy homogénea respecto a sus formulaciones, estando su diversidad ligada principalmente a los aspectos decorativos de una de sus superficies. La cerámica avanzada se caracteriza por una gran diversidad de materiales con respuestas físico-químicas específicas frente a las radiaciones y a los campos electromagnéticos, y sus principales beneficios económicos están ligados sobre todo con las necesidades humanas secundarias tales como las telecomunicaciones. Como consecuencia de la actual crisis de carácter global, las construcciones tradicionales pudieran ser rehabilitadas y/o sustituidas por edificios con eficiencia energética, también denominados edificios de energía cero. En ellos existe equilibrio entre la energía consumida y la producida “in situ”, y utilizan materiales respetuosos con el Medioambiente. La consecuencia directa de esta tendencia será la evolución de la cerámica por hibridación parcial de sus dos ancestros, con especial protagonismo de los semiconductores, hacia la producción de energía eléctrica, materiales a los que en este trabajo denominamos cerámica fotovoltaica.

Palabras clave: cerámica tradicional, cerámica avanzada, energía fotovoltaica, eficiencia energética

Evolution to photovoltaic ceramics

Nowadays there are two types of ceramic materials, i.e. traditional and advanced. The origin and development of the first one occurred before the revolutionary changes in Science and Technology of the nineteenth century, while the second one is its direct consequence. The traditional ceramics, which are related primarily to elementary human needs, in particular its constructions, is very homogeneous with respect to their formulations, being their diversity mainly linked to the decorative aspects of one surface. Advanced ceramics are characterized by a wide variety of materials with specific physical and chemical responses to radiation and electromagnetic fields, where major economic benefits are mainly related to secondary human needs such as telecommunications. As a result of the current global crisis, traditional buildings could be rehabilitated and/or replaced by energy efficient buildings, also called zero-energy buildings. In them there is a balance between energy consumed and produced “in situ”, and also using environmentally friendly materials. The direct consequence of this trend will be the evolution of ceramics by partial hybridization of its two ancestors, with special importance of semiconductor compounds, to the production of electrical energy as the basic objective, in this work called photovoltaic ceramics

Keywords: traditional ceramics, advanced ceramics, photovoltaic ceramics, energy efficiency

*“El devenir de la Historia se encargará de hacer viejo lo nuevo,
obsoleto lo actual, antiguo lo moderno, y atrasado lo avanzado”*

Antonio García Verduch [1]

1. CERÁMICA TRADICIONAL

La cerámica surgió hace más de 25.000 años gracias al uso del fuego (calor) sobre una mezcla de arcilla, arena y agua para obtener un material nuevo con una cohesión mayor que la inicial existente en la mezcla húmeda de precursores. Como desde el origen ha estado ligada a las necesidades humanas primarias, tanto en utensilios como en substratos para la escritura y el arte, etc, sus aplicaciones han dado lugar de manera natural a una *industria*, un *valor económico* y un *beneficio social*. Por lo tanto consideramos, de forma claramente subjetiva, que estos aspectos son indisolubles del término “cerámica”. El origen de la cohesión es el

proceso de la *sinterización* que deriva de la palabra germana “sinter” referida a “ceniza” soldada, en clara alusión al comportamiento observado en materiales volcánicos.

En Occidente, a pesar de que la cerámica se entendía y formulaba en base a los cuatro elementos de Empédocles (agua, tierra, fuego y aire), el ceramista fue un artesano y en general alejado de los problemas planteados por la ciencia clásica. Su saber no empieza a cobrar algún protagonismo para el mundo académico hasta el desarrollo de las ciencias baconianas [2], concretamente a finales del Siglo XVII en un intento de “contratipar” (término usado comúnmente para

referirse al proceso de reproducir un material partiendo de la información disponible en el producto final) la porcelana china. Utilizando el método de ensayo-error, se emplearon arcillas locales junto a otras materias primas que simplemente se tenían más a mano (yeso, ceniza de huesos, sepiolita, etc.) aprovechando sus ventajas e intentando resolver sus inconvenientes. Hay que destacar los resultados de E. Walther von Tschirnhaus y F.J. Böttger, que trabajando en el contexto de la alquimia, y ensayando la fusibilidad de diversos minerales, con la ayuda de nuevos tipos de hornos y quizás también gracias a cierto grado de azar, descubrieron hacia 1706 la forma de fabricar una cerámica muy sinterizada de tonalidad rojiza de tipo porcelana, que dio lugar a Cerámica de Meissen a partir de 1710. A finales del siglo XVIII en Sèvres, Jean d'Arcet en un trabajo titulado "Sur l'action d'un feu égal sur un grand nombre de terres" estudió los efectos del calor sobre un gran número de minerales y demostró que algunas mezclas tenían un punto de fusión inferior al de las fases puras. Se encontró que la mejor solución tecnológica estaba basada en la adición de "espátos" (hoy día utilizamos la palabra feldespato, que viene de "field" y "spar" y significa literalmente "las piedras con estructura laminar del campo").

Las formulaciones de las pastas cerámicas tradicionales son por tanto anteriores al conocimiento riguroso de los elementos químicos que las formaban, ya que no fue hasta 1808 cuando se aislaron K y Na, y luego Si en 1824 y Al en 1827 [3]. Por tanto, las pastas cerámicas básicas fueron establecidas principalmente en base a información mineralógica, y desde entonces ha habido pocos cambios. A lo largo del siglo XIX, la cerámica dejó de ser un producto secreto y local para desarrollar una industria con un incremento en la producción (sobre todo de revestimientos) asociada al auge de la urbanización del espacio Europeo.

De este modo, el saber y el desarrollo en cerámica tradicional siempre ha estado ligado al trabajo cotidiano, a la experiencia personal, a los usos domésticos, a la transmisión del conocimiento por vía oral, a la capacidad de manipular y purificar recursos concretos (la geografía natural de distribución de las materias primas siempre fue un aspecto esencial). El origen de la diversidad se debía a "cuestiones locales", tanto desde el punto de vista de las tradiciones artísticas y culturales como de las soluciones tecnológicas. La cerámica tradicional siempre estuvo más cerca del "art-ist" que del "scient-ist", y hoy día también del "technolog-ist". Así, la cerámica tradicional ha evolucionado recientemente sobre todo en la *naturaleza de los recubrimientos superficiales* (esmaltes, engobes y pigmentos) relacionados desde el origen a aspectos decorativos y artísticos, y en la *tecnología de producción*, concretamente el paso de la vía seca a la atomización (vía húmeda) y la cogeneración, del fuel-oil al gas natural, con la monococción rápida, el uso de la robótica y las técnicas decorativas recientes incluyendo la incorporación de la tecnología "ink-jet", así como la tecnología láser (ver ref. 4 a 8 para ideas recientes).

2. CERÁMICA AVANZADA

Con los cambios revolucionarios en Ciencia y Tecnología ocurridos durante el siglo XIX, surgió la capacidad para reconocer y manipular los minerales así como de aislar los elementos químicos. El resultado fue la aparición de una

industria química, y así por ejemplo gracias al proceso Bayer apareció la fabricación de la alúmina, el proceso de Acheson para el carburo de silicio, etc. Se aprendió a emplear más energía para obtener temperaturas cada vez más altas, a controlar la atmósfera de trabajo y a estudiar las respuestas de las cerámicas frente a las radiaciones y a los campos electromagnéticos, gracias a los tecnólogos resultantes de la progresiva unión del poder económico con las capacidades científicas del mundo académico. Entre 1875 y 1911 las aplicaciones en electricidad a partir de los trabajos de Thomas Edison, Walter H. Nerst, George Westinghouse, Von Bolton (Siemens), W.R. Whitney (General Electric), Carl Auer Von Welsbach entre otros, fueron un motor de búsqueda de materiales tanto para el encapsulamiento como para el filamento incandescente en dispositivos para la iluminación. De este modo nuevos materiales (cerámicos!) basados en óxidos de Zr, Y, Ce y Th entraron en escena [9]. Por otro lado, la búsqueda de sustitutos de los refractarios clásicos basados en arcillas, caolines y cuarzo, así como la necesidad de hornos más avanzados, llevaron a diversos investigadores a buscar modos de cohesionar carburo de silicio mediante óxidos y sales de hierro, metales, arcillas refractarias, etc, iniciándose la producción industrial de este tipo de refractarios en 1903 para suministro a la industria del Zn en Alemania y Bélgica [10]. Estas dos iniciativas, unida a la experiencia en cerámica tradicional, ponen de manifiesto el progresivo interés por conocer y controlar la sinterización, interés que no hace sino aumentar a lo largo del siglo XX.

Inicialmente estos ceramistas eran tecnólogos trabajando en equipos pequeños y aislados, cuyos descubrimientos se debían más a "serendipia" (descubrimiento por accidente y sagacidad, donde el azar juega un papel esencial) y al método de Edison (descubrimiento guiado por la experiencia e intuición obtenida gracias al proceso de ensayo-error) que a experimentos derivados de la consecuencia lógica a modo de predicción de teorías globales de gran poder de explicación, siempre esperadas pero que en realidad nunca llegaron. Así el método de Descartes por reduccionismo y compartimentación disciplinar del conocimiento no ha sido determinante en el origen de la cerámica avanzada, salvo excepciones. Hasta aproximadamente 1910, la práctica totalidad de los pigmentos cerámicos eran minerales naturales ya que se suponía que no podían existir reacciones químicas de tipo sólido-sólido. Con J.A. Hedvall (Fig. 1) a principios del siglo XX quedó demostrado que con lo que hoy denominamos "la ruta cerámica" se podían sintetizar óxidos complejos y otros materiales [11], abriendo la puerta a un sin número de nuevos materiales y aplicaciones, naciendo así la Química de Estado Sólido.

Más tarde, la asociación entre científicos del mundo académico y tecnólogos de la industria con el poder económico (y también a menudo con los intereses del poder político-militar) generó una reorganización social en forma de *empresas* que han mantenido una nueva tradición en inversiones en I+D+i, cuyo principal objetivo fue el económico con la producción a gran escala de materiales cerámicos y vidrios útiles para cubrir necesidades tanto civiles como militares. Si bien inicialmente las cerámicas y sus aplicaciones surgieron a partir de la electricidad y la óptica en ese entorno tecnocientífico, la llegada de la Mecánica Cuántica desembocó en la aparición de los semiconductores a partir de Si, Ge, etc, pero cuyo desarrollo conceptual tuvo lugar ya en un ambiente puramente científico tanto en Europa como en EEUU en la

década de 1930-1940 [12], y ya más tarde tecnológico en la década de 1940-1950, culminando con la invención de los transistores en 1947 por los laboratorios Bell.

Además llegaron las aplicaciones masivas de la cerámica en la industria del automóvil, primero como aislante en bujías y después en sustratos de catalizadores para tubos de escape. Aunque las circonas ya eran conocidas desde la década de los años 20 por los trabajos de W.H. Nerst en Alemania, las investigaciones de R.C. Garvie, R.H. Hannink, y R.T. Pascoe en la década de los años 70 promovieron el interés del mundo académico por esta cerámica ("ceramic steel?"), y se pensó en su uso como materiales para motores cerámicos así como en herramientas de corte (sólo el segundo uso está generalizado).

En la segunda mitad del S. XX y en el S. XXI el papel protagonista ya no lo han tenido individuos particulares (salvo excepciones) sino el trabajo en equipo de las empresas con sus colaboradores del mundo académico, destacando Philips (Koninklijke Philips Electronics N.V.) y TDK (Tokyo Denki Kagaku) en cerámicas magnéticas (particularmente ferritas), Corning Inc. en fibras ópticas para telecomunicaciones y sustratos cerámicos para la industria del motor, Champion (Cooper Industries), Bosch y NGK Spark Plug en cerámica aislante para bujías, AVX Corporation, Murata, Kyocera, NGK Insulators, Vishay, Kemet, etc en cerámica para la electrónica, de Toshiba en AlN, Matsushita en varistores de ZnO, General Electric, Hitachi Metals y Siemens en los centelladores cerámicos, Krosaki Corp., Murata y Konoshima en cerámicas transparentes, Ceradyne Inc. en cerámicas para blindajes, Nippon Carbon Co. Ltd. en fibras cerámicas de SiC en materiales compuestos, Saint-Gobain en aislantes térmicos y abrasivos, etc. [13,14]. El crecimiento de las empresas asociadas a estos materiales (y de las economías basadas en ellos) no está limitado por la disponibilidad geográfica de las materias primas, que son comercializadas por industrias químicas especializadas, sino por el origen, la producción, la naturaleza y la transferencia del *conocimiento*, tanto intra-tecnología como inter-tecnología [15]. En consecuencia, la cerámica avanzada ha sido junto a los metales el sustento material de la Sociedad Industrial, y las electrocerámicas se han integrado a modo de *componentes* con los materiales luminiscentes ("phosphors") y los semiconductores (incluyendo diodos, transistores, LEDs etc) en los dispositivos opto-electrónicos, que en la práctica son el "hardware" de la reciente *Sociedad de la Información* en que vivimos.

3. CONTEXTO HISTÓRICO ACTUAL

En la actualidad este mundo cerámico parece estar dividido en dos. Desde el punto de vista del mundo académico es *bicéfalo* ya que se dan dos tipos de actores y dos tipos de publicaciones bien diferenciados. La cerámica tradicional está más relacionada con la construcción, donde una gran parte de las investigaciones se publican en revistas al margen del Sistema SCI. La cerámica avanzada sin embargo está relacionada sobre todo con las telecomunicaciones, la óptica y la energía, con toda la información importante aparentemente disponible en las revistas del sistema SCI. Es como si de dos "especies" diferentes se tratara, unidos sólo porque en ambas es clave el fenómeno de la sinterización. En este punto, conviene tener clara la diferencia entre por un lado abordar problemas de materia condensada ligados a las cuestiones de la Ciencia Clásica (cuyos seguidores tienen poco o nulo interés

Fig. 1. Prof. Antonio García Verduch (izquierda) y Prof. J. Arvid Hedvall (derecha) en 1951, Gotemburgo (Suecia).

en experimentar con cerámicas policristalinas porosas para verificar sus modelos), y por otro lado perseguir aplicaciones donde el problema fundamental es conseguir una función práctica y optimizar el procesamiento para manipular un efecto o una propiedad.

Desde el punto de vista del mundo de la industria, la cerámica parece *bimodal*, como si fuesen dos "ecosistemas" separados, por un lado países como España o Italia ligados a la cerámica tradicional y países como Japón o EEUU dedicados a la cerámica avanzada. Esta diferencia se explica también por la capacidad de endeudamiento de ambos modelos productivos, ya que sólo algunos países pueden depender de la importación de materiales cerámicos convencionales y dedicarse a la innovación en materiales avanzados, limitando el desarrollo de las industrias que tienen poco valor añadido, que consumen muchas materias primas y que tienen elevados costes energéticos y medioambientales. Además este mundo es *fuertemente asimétrico* porque el beneficio socio-económico a escala global ligado a la cerámica tradicional supera al de la cerámica avanzada, porque no hay paralelismo entre la facturación y el empleo que producen (por ejemplo en 2006 la cerámica avanzada en Europa generó el ~ 10 % de la facturación de todo el sector cerámico pero sólo el ~ 5 % del empleo [16]), porque los beneficios en la cerámica avanzada están un su mayoría ligados a la cerámica electrónica [17], y finalmente, porque el beneficio socio-económico se acumula en sólo unas pocas empresas (por ejemplo, la facturación en 2007 de Corning Inc. fue similar a la de toda España en cerámica ligada de un modo u otro a la construcción en el mismo año).

Hoy día vivimos en la *Sociedad de la Información*, pero con la herencia de hábitos de consumo de la *Sociedad Industrial*, un modelo que podría estar llegando a su fin, ya que hay

claros indicios de una próxima transición forzada hacia una *Sociedad de la Sostenibilidad*. La causa del cambio está en la Crisis Global de nuestros días como herencia de un sinnúmero de desastros históricos ocurridos a lo largo de todo el Siglo XX, y que está caracterizada por la recesión económica, la falta de credibilidad del sistema financiero internacional, la formación y explosión luego de las burbujas inmobiliarias, el encarecimiento del petróleo y sus derivados (debido a su escasez creciente), la destrucción del empleo, el cambio climático, etc. Bajo la perspectiva del modelo de crecimiento sostenible, arrastramos una dependencia energética generada por la distribución geográfica desigual de los recursos y de las reservas de las fuentes de energía no renovables, por una saturación de información en los medios de comunicación que coexiste con una canalización del conocimiento más útil que va dirigida hacia los intereses del poder económico, el cual está concentrado de manera notable en actividades empresariales relativas a las industrias de automóvil y de las telecomunicaciones, y donde la construcción (con materiales cerámicos clásicos) era la “panacea” (remedio que buscaban los antiguos alquimistas para curar todas las enfermedades) de la economía. Además, se acerca la escasez extrema de los recursos no renovables junto a la superpoblación. ¿Qué futuro es razonable predecir cuando en el horizonte se ven converger el progresivo agotamiento de los recursos con el incremento de una población con dudosos hábitos de consumo, y la ausencia de organismos internacionales con capacidad real de regulación?

En el modelo anterior, las actividades del mundo académico estaban reguladas por su método y la compartimentación del conocimiento en disciplinas, mientras que las actividades de la industria estaban gobernadas por empresas con objetivos primordialmente económicos. En el modelo emergente, la I+D+i debe tener un *enfoque sistémico* donde la ignorancia (sea del tipo que sea) ya no tiene justificación, donde debe imperar la responsabilidad tantas veces invocada como condición para ejercer en Ciencia y Tecnología, para compartir *una parte de los objetivos*, y resolver los problemas que no son ya concretos sino globales. Cada vez es más obvio que no se puede considerar la realidad como un sistema simple, lineal e infinito en recursos naturales, donde el medioambiente podía soportar cualquier carga sin grandes trastornos. Lo que está emergiendo es un modelo socioeconómico basado en ecosistemas complejos, con dinámica no-lineal, donde los recursos naturales y el conocimiento deben ser considerados bajo un mismo prisma. Los actores sociales clásicos no parecen tener una gran capacidad de evolucionar y adaptarse a los tiempos que corren y siguen restringidos a los papeles que les otorgan su educación, tradiciones, raíces e identidades. Parece claro que debieran emerger nuevos actores con otra visión porque ya hay evidencias claras de que nos caemos de esta “Torre de Babel” (obra incapaz de ser terminada según el plan original por la falta de entendimiento entre los constructores). El Club de Roma, el Protocolo de Kyoto o el informe Stern son algunas de las manifestaciones en esta línea que no dejarán de crecer.

Clásicamente se ha considerado que el problema de la energía era como si de uno sólo se tratase, pero hoy día ya sabemos de que en realidad son tres, con variantes muy específicos ligados al sector de consumo final: industria, transporte y construcción. En el modelo emergente la construcción es la causa del gasto de más del 40 % del total

de la energía consumida en Europa y más de la tercera parte de la producción de los gases de efecto invernadero, ya que en occidente pasamos ~ 90 % de nuestro tiempo en *interiores*. Con el nuevo planteamiento hay que considerar la eficiencia energética de los edificios, y así está emergiendo la idea del autoabastecimiento energético, considerando la energía como una responsabilidad más en el mantenimiento y funcionamiento del hogar propio, que se ha denominado como “zero-energy building” (sobre todo en Europa) o “green-building” (sobre todo en EEUU). Para no emplear términos cualitativos como el *color* (verde) cargado de otras connotaciones en lengua castellana ajenos a la cuestión central, y apostar por una idea cuantitativa sin matices enfatizamos en la primera denominación, que se puede traducir como **“edificios de energía cero”**, en la que los *exteriores* son fundamentales, y cuya definición podría ser:

Edificios construidos con materiales inteligentes y que son respetuosos con el medioambiente, diseñados para obtener una alta eficiencia energética durante su tiempo de vida media útil, donde el consumo de energía primaria anual global será igual o menor que la energía producida por fuentes de energía renovables “in situ”.

En EEUU esta idea se manifiesta claramente en 1993 con la creación del U.S. Green Building Council, pero no es hasta 2008 cuando la Environmental Protection Agency EPA y el Department of Energy DOE adoptan estrategias y programas en esta dirección. Adicionalmente, la Ley de Reinversiones y Recuperación de Estados Unidos de 2009 (ARRA) firmado el 17 de febrero otorga cuantiosas ayudas económicas a tal fin. Más recientemente, en la Cumbre EEUU-China de noviembre de 2009 se ha formado el “U.S.-China Clean Energy Package” alcanzando acuerdos concretos en siete medidas para los tres subsectores de consumo de la energía, y tres de ellas haciendo referencia a la eficiencia energética con la creación de un espacio físico para la I+D+i, el marco legal de sus acciones conjuntas, así como el soporte y medio para la colaboración del mundo empresarial. Por otro lado, la respuesta institucional de la Unión Europea se plasmó ya en la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo el 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios. El Consejo de Europa de marzo de 2007 abogó para una aplicación rápida y de un “Plan de acción para la eficiencia energética”. Posteriormente, la Resolución de 31 de enero de 2008 reforzó las disposiciones de la Directiva 2002/91/CE. El 23 de abril de 2009 se publicó la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de las energías procedentes de fuentes renovables. En junio de 2009, la Directiva Europea relativa a “Promoción del Uso de Energía desde Fuentes Renovables” no sólo se refiere a los objetivos a alcanzar para los Estados Miembros para 2020 sino que da una trayectoria de cómo alcanzarlos: reducir en un 20 % las emisiones de gases de efecto invernadero. El 22 de junio de 2009 se abrió un portal de Internet específico para estas cuestiones [18]. El 18 de noviembre de 2009 se hizo un comunicado de prensa expresando que el sector público debe ser un ejemplo para el resto de la sociedad poseyendo o alquilando sólo este tipo de edificios para finales de 2018, y promoviendo la conversión y/o rehabilitación de los edificios actuales.

Otra de las características de nuestro tiempo es la Globalización de los Mercados que ha influido de manera directa a la dinámica empresarial y en particular a sus relaciones de *competitividad*, ya que las fronteras entre

naciones son ahora poco relevantes para la definición de un mercado. Las industrias cerámicas se han visto tanto más afectadas cuanto más porcentaje de su negocio dependía de las exportaciones, siendo mínimo en productos de bajo valor añadido que no permiten transporte en su comercialización (como en alfarería, ladrillos y tejas) y siendo máximo en los materiales de alto valor añadido como en la cerámica electrónica. La clave del éxito de las empresas de este tipo de cerámica se explica por la consecución de círculos virtuosos entre funcionalidad y demanda [19], y así hay muchos lugares en el mundo que es más fácil conseguir un teléfono móvil que disponer de agua potable en abundancia. La mundialización de la cerámica avanzada ha traído los siguientes resultados [13,19]:

i) El crecimiento de las empresas hasta formar grandes grupos *transnacionales* bien consolidados. La clave ha sido la formación de consorcios de las grandes empresas con otras locales pero de gran tradición y experiencia en aspectos concretos; la realización de proyectos coordinados con participación diversa (por ejemplo: suministradoras de las materias primas, con los fabricantes de un material dado y junto con la industria que lo emplea en su negocio de producto terminado); el desplazamiento de los centros de producción a países de mano de obra más barata; el menor interés por aventuras en nuevos productos para reforzar las líneas ya clásicas y robustecer la especialización y por tanto evitando la entrada de nuevos actores competidores.

ii) Disminución progresiva en los precios según el modelo de las curvas de aprendizaje, obligando a toda la comunidad empresarial a continuar con las políticas de I+D+i para abaratar costes y poder seguir compitiendo. La consecuencia ha sido el descenso de los tiempos de vida media (entre 2 y 4 años) de los productos en el mercado, la sobreproducción, y la dificultad en el reciclado debido a la miniaturización. En el caso de los materiales cerámicos (ladrillos, pavimentos y revestimientos), la tendencia ha sido hacia los grandes formatos para reducir los elevados costes de instalación respecto a otros tipos de materiales, y para favorecer la automatización y la rentabilidad de los procesos.

iii) La nueva fabricación de productos terminados a partir de sus componentes tradicionales más competitivos, por ejemplo la manufactura de cabezales de "ink-jet" completos por los fabricantes de los componentes piezoeléctricos. Esto ha llevado a la realización de proyectos conjuntos entre empresas anteriormente sin relación y pertenecientes a sectores distintos, por ejemplo con el sector de los semiconductores, explorando así (por necesidad) nuevos mercados en los que seguir creciendo.

En resumen, tanto desde el punto de vista de la evolución empresarial natural en el contexto de la Globalización, como por el impulso de los nuevos actores socioeconómicos, y desde las necesidades de la Sociedad de la Sostenibilidad, la cerámica y el vidrio están llamados a tener un papel protagonista en las aplicaciones fotovoltaicas, tanto en centrales de producción de energía eléctrica, como en las soluciones integradas en la construcción. A modo de ejemplo, Kyocera Corporation que produce cerámicas tradicionales y avanzadas es ya un líder de primer orden en la fabricación de celdas fotovoltaicas así como en la instalación de plantas de energía eléctrica (Fig. 2).

Fig. 2. La Planta Solar de Salamanca ha sido construida por Avanzalia Solar, consta de 70.000 módulos fabricados por la empresa cerámica japonesa Kyocera, que ocupan 36 hectáreas, con una producción pico de 13.8 MW. Fuente: Kyocera Corporation.

4. CERÁMICA FOTOVOLTAICA

Las construcciones tradicionales despilfarran la energía porque no tienen optimizado los mecanismos de acondicionamiento térmico gastando energía en exceso, tanto en calentar como en enfriar el aire interno. Además, sus superficies interiores y exteriores tienen sobre todo un papel decorativo. En los edificios de energía cero las superficies interiores deben tener funciones específicas relativas al confort, la salud y la seguridad [4], mientras que los exteriores deben utilizarse para la producción de energía. El sol ya no puede seguir considerándose como un elemento perturbador cuya energía decolora y daña la estética de las fachadas, sino como un aliado que suministra calor y potencialmente electricidad. La unión de los dispositivos de generación de energía eléctrica fotovoltaica, basados en materiales semiconductores, con la cerámica tradicional y la cerámica avanzada, dará lugar a un nuevo tipo que denominamos *cerámica fotovoltaica*, de uso en fachadas ventiladas y tejados. Alternativamente, si se desean exteriores transparentes a la luz, será el vidrio con recubrimientos de efecto fotovoltaico la solución escogida. La primera solución será ideal para la rehabilitación de edificios ya construidos, mientras que las futuras construcciones podrán disfrutar de las dos soluciones en función de sus necesidades energéticas y del grado de iluminación solar (en función de climas, longitud y latitud). Centrándonos en las cerámicas fotovoltaicas, quede claro que el problema a resolver no es ni el que tienen las centrales de producción de energía eléctrica, ni tampoco los aparatos de telecomunicaciones en el espacio, ya que en este caso sus requerimientos son tanto *energéticos* como *medio-ambientales*.

En relación al primer aspecto, simplemente habría que considerar no solo la producción de energía sino también el retorno energético, esto es, satisfacer la siguiente condición:

$$E_p \geq E_g + E_n$$

donde E_p es la energía total que puede producir en su tiempo de vida media, E_g es la suma de toda la energía gastada para su proceso de fabricación, y E_n es la energía

necesaria para satisfacer el concepto de edificio de energía cero en su lugar de instalación particular. Por lo tanto habrá que considerar tanto la resistencia a la alteración meteórica de las celdas por sus usos en exteriores como el tiempo de vida media de funcionamiento cumpliendo con las especificaciones necesarias. Así, la durabilidad de los dispositivos será una cuestión central, e irá ligada de una forma directa a la rentabilidad económica.

En el segundo aspecto, las soluciones tecnológicas deben emplear elementos químicos abundantes, no contaminantes (ya que su uso será global), e idealmente con procesamientos que no produzcan gases de efecto invernadero de forma masiva. En base a los conocimientos actuales, las tecnologías basadas en silicio (un elemento bien conocido por su utilización en la industria electrónica) pudiera ser una primera solución, quedando fuera por tanto de este análisis las otras posibilidades basadas en semiconductores de GaAs, CdTe y compuestos del sistema CIGS (Cu-In-Ga-Se-S).

El silicio se extrae del mineral cuarzo SiO_2 que compone el ~ 45 % de la corteza continental y que está distribuido por la mayoría de las rocas. Sin embargo, sólo forma masas monominerales de alta pureza en algunas rocas hidrotermales filonianas de baja temperatura y en el núcleo de algunas pegmatitas [20]. El elemento se separa del óxido por reducción con carbón (con producción de CO_2) en hornos de arco eléctrico obteniendo así en primer lugar una materia prima con silicio al 99 % en peso que se denomina silicio de *grado metalúrgico*. Para obtener la pureza útil en estas aplicaciones se emplea el proceso Siemens que se consigue convirtiendo el sólido impuro en gas y extrayendo el elemento en forma de triclorosilano u otro gas ya con la pureza deseada [21]. En este punto hay dos alternativas, una es depositarlo como sólido en forma de *polisilicio* y utilizar esta materia prima para formar la llamada *primera generación de celdas fotovoltaicas* y la otra es utilizar los gases para hacer deposiciones de capa delgada sobre un sustrato, o *segunda generación de celdas fotovoltaicas*.

En el primer caso las celdas se construyen con obleas de silicio fabricadas bien por secciones de espesor inferior a las 200 μm de monocristales obtenidos por la técnica Czochralski (crecimiento a partir de un germen de cristalización en un medio fundido de igual composición) o bien por secciones de masas multicristalinas obtenidas por cristalización en molde de su fundido. El mejor rendimiento energético en las celdas industriales se consiguen con las primeras siendo del 19.3 % [22]. Este material de partida es tratado para generar una única unión p-n, incorporando luego las capas finas anti-reflectoras, los electrodos y en algunos casos tratamientos superficiales de generación de relieve para optimizar la absorción de luz. Estas celdas se han utilizado para fabricar baldosas cerámicas fotovoltaicas utilizando métodos casi artesanales, ya que hay que cortar la cerámica para insertar las celdas, preparar las conexiones de los electrodos y después utilizar un aislamiento transparente (vítreo o polimérico) para evitar el deterioro del sistema por los agentes meteóricos. Esta solución, aunque posible quede claro que no es la mejor, ya que los costes y modos de producción la harán totalmente inviable, y no podrá competir con la que se desarrolle a partir de generaciones posteriores.

En el segundo caso, se reduce el gasto tecnológico en la preparación de la materia prima así como el contenido de la misma en el dispositivo, ya que se utilizan capas con espesor inferior a una micra mediante deposición química

Fig. 3. Ilustración que refleja el contraste entre los edificios tradicionales dependientes del suministro externo de energía y que hacen un uso poco eficiente de la energía además de ser poco respetuosos con el medioambiente, los futuros edificios de energía cero que producen energía "in situ" por dispositivos fotovoltaicos.

en fase vapor asistida por plasma (PECVD). Así se posibilita la fabricación de dispositivos multicapas o "en tandem", resultando en absorciones específicas en cada capa para diferentes longitudes de onda concretas de la luz solar, aumentando la eficiencia energética total del dispositivo. Se distinguen varios tipos de recubrimientos de Si en función de la proporción de sólido amorfo respecto del sólido cristalino, distribución de tamaño de los granos cristalinos, y del contenido en defectos a modo de "dangling bonds" (enlaces colgantes que tienen un comportamiento no deseado como trampas electrónicas o centros de recombinación electrón-hueco, que se dan en los bordes de grano y se pueden pasivar mediante hidrogenación, ya utilizada en la primera generación [23]). Se denomina silicio amorfo *a-Si* cuando el resultado de la deposición es silicio no cristalino, silicio microcristalino *mc-Si* si el elemento está formando cristales en la escala del micrómetro, y silicio policristalino *pc-Si* cuando los cristales tienen una distribución de tamaños donde abundan aquellos cuyo tamaño es del mismo orden que el espesor de la capa fina. Como consecuencia del método de fabricación, aparece el sustrato como un elemento adicional al dispositivo ausente en la primera generación, y es aquí donde la cerámica tradicional y el vidrio flotado entran en juego de manera directa a modo de materiales que compiten por implantarse en la misma tecnología [24-26], quedando excluidos en esta aplicación otros tipos de soportes sin capacidad de perdurar por tiempos prolongados en ambientes exteriores, ya sea por falta de peso, resistencia física o resistencia química. Además hay otros materiales cerámicos avanzados que entran a formar parte del dispositivo en forma de capas antirreflectantes (por ejemplo nitruros y carburos de silicio) así como de electrodos transparentes o TCO ("transparent conductive oxide") ya sean de naturaleza vítreo o cristalina, destacando $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, $\text{ZnO}:\text{Al}$ y TiO_2 [27].

Adicionalmente, se están investigando (y en algún caso también desarrollando tecnológicamente) dispositivos de *tercera generación* con múltiples aproximaciones conceptuales

[28,29], en los que se podría superar el límite de Shockley-Queiser (que impone una eficiencia máxima a causa de la Segunda Ley de la Termodinámica [30]) debido al efecto MEG ("multiple exciton generation") como por ejemplo en las celdas de "quantum dots" QDs [31]. Hay que destacar otros tipos de células como aquellas formadas por materiales orgánicos y sustratos poliméricos [32], las células basadas en óxido de titanio ya sean en complementación con pigmentos orgánicos de rutenio [33] o con QDs [34], así como aquellas basadas en conductores transparentes, y en particular en óxido de zinc [35]. En definitiva, a medio-largo plazo los materiales cerámicos van a ser posibilidades competitivas en todos los elementos de los dispositivos fotovoltaicos.

Existen dos formas de implementación diferente de las celdas fotovoltaicas sobre las edificaciones. Con las celdas de primera generación se han construido paneles que en la mayoría de los casos se han yuxtapuesto simplemente a las construcciones (tejado en edificio izquierdo de la Fig. 3). La segunda generación puede producir paneles con capacidad de integración en la estructura general de los edificios (fachada ventilada en el edificio izquierdo de la Fig. 3), denominada *tecnología BIPV* ("building-integrated photovoltaics") [36,37]. A pesar de que las comunicaciones científicas son escasas [38,39], la industria cerámica ya está participando de estas ideas desde principios de este siglo, destacando los proyectos de Fritta SL, Pamesa e Isofotón SA, de TAU Cerámica y Atersa, la reciente creación de System Photonics que utiliza polímeros de recubrimiento de Du Pont, y más recientemente la colaboración entre Butech (una filial de Porcelanosa) y Onyx Solar. Por otro lado, ya hay numerosas empresas de la industria fotovoltaica que ofrecen soluciones BIPV si bien utilizando sustratos de polímeros, metales y vidrios [40,41], aunque no en todos los casos se utiliza silicio.

En consecuencia, todo apunta a que tanto científica como técnicamente la cerámica del siglo XXI puede ser también fotovoltaica, pero económicamente ¿será rentable y competitiva alguna vez o va a depender siempre de los mecanismos tipo "feed-in-tariff"? Pues bien, todo apunta a que pronto el coste de la energía eléctrica fotovoltaica será competitivo con los costes en red (tarifas medias de referencia). Así, el coste de la primera generación de celdas fotovoltaicas en 1975 era de ~ 100 \$/Wp (Wp es vatio pico de potencia instalada), y la producción industrial empezó en la década de los 80 con valores de eficiencia energética $\eta \sim 15\%$. Estos valores han ido cambiando paulatinamente con el aprendizaje tecnológico hasta valores que a finales del 2008 eran ~ 7 \$/Wp (una mitad en la fabricación y la otra en la instalación) y $\eta \sim 20\%$ [42]. Sin embargo, ya hay empresas en las que los costes de fabricación pudieran ser muy inferiores a 2 \$/Wp [22]. El análisis del coste final de un kWh a partir del coste de fabricación y de la competitividad de una celda con otras fuentes de electricidad no es sencillo, ya que hay que tener en cuenta numerosos factores, entre los que destacan las horas de iluminación diarias, el precio de la energía tomada de la red eléctrica, el tiempo de vida del dispositivo, y de otros parámetros que implicar "adivinar" que va a pasar en los próximos 25 años. Lo que se puede afirmar es que en la actualidad ya hay islas soleadas con "grid parity" (paridad con red), esto es, un kWh hora cuesta aproximadamente igual al precio de venta en la red, por ejemplo en Hawaii [22]. En la Fig. 4 se muestra una curva de aprendizaje con la evolución de los precios de la electricidad conseguidos gracias a la

primera generación [43]. Finalmente, hay que destacar que actualmente podría haber ya al menos tres empresas con capacidad real para poder producir módulos fotovoltaicos de segunda generación con un coste de fabricación inferior a 1 \$/Wp, una de ellas utilizando semiconductores de silicio, habilitando la paridad con red en muchos otros lugares en un futuro ya aparentemente próximo. Estas tecnologías podrían ser auténticas soluciones al problema de la rehabilitación de los edificios para la eficiencia energética [44,45] en un plazo de tiempo razonable. Sin embargo, hay que destacar que el éxito final y la implantación masiva de la tecnología fotovoltaica en la sociedad pasa por poder ser fabricada a un coste razonable en dispositivos con los materiales actuales u otros de nueva creación, pero con *alta eficiencia energética* (por ejemplo > 50 %) así como por la capacidad de su almacenamiento, objetivos que sólo se podrán conseguir con esfuerzos progresivos, continuados y dirigidos en investigación científico-tecnológica, quizás con conceptos nuevos radicalmente diferentes, o quizás como hasta ahora ha sido en la historia de la ciencia con la ayuda de la siempre imprevisible serendipia.

5. CONCLUSIONES

La cerámica, en su versión tradicional, ya resolvió todos los problemas locales a los que se ha enfrentado, y en su versión reciente más avanzada ya ha ayudado suficientemente al desarrollo de la Sociedad de la Información. Es la hora de enfrentarse a los problemas de la Sociedad Global del siglo XXI, donde la energía y el Medioambiente, en primer lugar, y la escasez de recursos junto con la superpoblación a la vuelta de la esquina, deben de considerarse en toda su extensión. Nuevas relaciones de cooperación y coordinación tienen que surgir al menos entre el mundo académico y la Industria para la I+D+i, atravesando las sutiles fronteras de las identidades, de las disciplinas y de las tecnologías para en última instancia resolver los problemas reales de nuestros días.

Fig. 4. Curva de aprendizaje de la industria de fabricación de celdas fotovoltaicas de primera generación. Fuente: E. Sachs (MIT, EEUU), asumiendo un crecimiento anual de la producción de un 35 % y curva de aprendizaje de 18 %. Los costes fotovoltaicos se han hecho suponiendo un factor de planta del 18 % y una tasa de descuento del 7 % (<http://www.1366tech.com/v2/>).

Cuando se mira al pasado es corriente enmarcar eventos de carácter aparentemente determinante y personalizarlos en protagonistas particulares a partir de la información disponible. Tenemos el conocimiento suficiente para saber que cualquier creación humana no es sino el resultado del trabajo o la acción de muchos individuos, a menudo anónimos. Es por esto que opinamos que no se debe mirar al pasado (ni pensar en el futuro) para aplaudir aciertos o señalar errores en función de las creencias del momento, prefiriendo la perspectiva hermenéutica. Son el contexto histórico y las propias limitaciones de cada tiempo quienes juegan el papel esencial, a sabiendas de que tanto las acciones individuales tanto responsables como las insensatas también ejercen su acción. En este contexto, se ha planteado el origen, el progreso y el devenir de la cerámica y de los ceramistas con un enfoque sistémico. En la actualidad, tanto en cerámica tradicional (por la crisis del sector de la construcción) como en cerámica electrónica (por la saturación de los mercados y la alta competitividad) tienen una situación difícil y una solución para la supervivencia y el progreso puede ser evolucionar a otras aplicaciones de gran demanda en el momento actual, por ejemplo hibridando con el mundo de los semiconductores para emerger en forma de *cerámica fotovoltaica*.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado a modo de homenaje a Antonio García Verduch, cuyo estímulo, soporte y aprecio fue básico para el desarrollo profesional de este autor en el mundo de la Cerámica que él tanto amaba. Tenía una visión muy particular, creía que la Cerámica era una especie de sumidero, alimentado por un flujo diverso de ideas procedentes de todas las otras disciplinas (utilizando este término en sentido clásico), y es que este autor cree que las ciencias pasan pero las tecnologías quedan por más tiempo. El autor de este trabajo quiere agradecer también las correcciones de J.E. Iglesias, F.J. Valle Fuentes, Pilar Pena, J. García-Guinea y E. Criado, así como a Jesús Gras por la elaboración de la Figura 3.

7. REFERENCIAS

1. A. García Verduch. Cerámica tradicional y no tradicional. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 33(6): 309-313, (1994).
2. T.S. Kuhn. Mathematical vs experimental traditions in development of physical science. J. Interdisciplinary History, 7(1): 1-31, (1976).
3. M. Elvira. The discovery of the elements: XII. Other elements isolated with the aid of potassium and sodium: beryllium, boron, silicon, and aluminum. *Journal of Chemical Education*: 1386-1412, (1932).
4. L. Sánchez-Muñoz, I.T. Marinova, G.F. de la Fuente, I. Núñez, M.A. Rodríguez, J. Sanz, J.B. Carda. I+D+i para las baldosas cerámica del Siglo XXI: Competencia, Diversidad y Funcionalidad. Qualicer 2010.
5. E. Tortajada Esparza, D. Gabaldón Estevan, I. Fernández de Lucio. La evolución tecnológica del distrito cerámico de Castellón: la contribución de la industria de fritas, colores y esmaltes. Bol. Soc. Esp. Ceram. V. 47(2):57-80, (2008).
6. A. Barba-Juan. Technical evolution of the Spanish Ceramic Sector. Key Engineer. Mat. 264-268:1457-1462, (2003).
7. A. Moreno Berto. Ceramic tiles: Above and beyond traditional applications. J. Eur. Ceram. Soc. 27:1607-1613, (2007).
8. Lennikov VV, Pedra JM, Gomez JJ, de la Fuente GF, Carda JB (2007) In situ synthesis of composite $\text{MTiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ coatings via laser zone melting. Solid State Sciences 9: 404-409.
9. W.D. Kingery. Ceramic materials science in society. Ann. Rev. Mater. Sci. 19:1-20 (1989).
10. C.F. Geiger, The history of the development of silicon carbide refractories. J.Am. Ceram. Soc., 6(1): 301-306, (1923).
11. J.A. Hedvall. Solid State Chemistry. Whence, Where and Whiter. 1966, 100p.
12. L. Hoddeson, E. Braun, J. Teichmann, S. Weart. Out of the crystal maze. Chapters from the history of solid-state physics. Oxford University Press, New York, (1992).
13. C. Purrington, H.K. Bowen. Globalization in the advanced ceramics industry. En M. A. Rassmussen y W.D. Kingery (eds), Ceramics as a Global Enterprise. Ceramics and Civilization. Vol. IX. Am. Ceram. Soc. Westerville, OH, 2000.
14. H. Yanagida. Japan's role in global ceramics. En M. A. Rassmussen y W.D. Kingery (eds), Ceramics as a Global Enterprise. Ceramics and Civilization. Vol. IX. Am. Ceram. Soc. Westerville, OH, 2000.
15. M. Nakagawa, C. Watanabe, C. Griffy-Brown. Changes in the technology spillover structure due to economic paradigm shifts: A driver of the economic revival in Japan's material industry. Technovation 29:5-22, (2009).
16. FWC Sector Competitiveness Studies – Competitiveness of the Ceramics Sector. Within the Framework Contract of Sectoral Competitiveness Studies – ENTR/06/054. Final report, 13 October 2008. ECORYS.
17. T. Abraham. New age materials, US advanced ceramics. Industrial Min. 391:40-43 (2000).
18. www.buildup.eu, 17 de Noviembre de 2010.
19. A. Ohmura, N. Ouchi, S. Morisaki, C. Watanabe. Functionality development as a survival strategy for fine ceramics. Technovation 23: 833-842, (2003).
20. Sánchez-Muñoz L, Carda Castelló JB. Materias primas y aditivos cerámicos. Enciclopedia Cerámica. Tomo 2.1. cap. I a VII (2002) y Tomo 2.2. cap VIII a XVI (2003). Ed: Faenza Editrice Ibérica S.L.. Castellón.
21. A.F.B. Braga, S.P. Moreira, P.R. Zampieri, J.M.G. Bacchin, P.R. Mei. New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review. Solar Energy Mater. Solar Cells, 92:418-424, (2008).
22. H.W. Hillhouse, M.C. Beard. Solar cells from colloidal nanocrystals: Fundamentals, materials, devices and economics. Current Opin. Coll. Interface Sci. 14: 245-259, (2009).
23. A.G. Aberle. Surface passivation of crystalline Silicon solar cells: a review. Progress in Photovoltaics. Res. And Appl. 8: 473-487, (2000).
24. G. Beaucarne. Silicon thin-film solar cells. Adv. OptoElectronics. Doi: 10.1155/2007/36970, (2007).
25. J. Deubener, G. Hellsch, A. Moiseev, H. Bornhöft. Glasses for solar energy conversion systems. J. Eur. Ceram. Soc. 29:1203-1210, (2009).
26. A. Slaoui, E. Pihan, A. Focsa. Thin-film Silicon solar cells on mullite substrates. Solar Energy mat. Solar Cells 90:1542-1552, (2006).
27. E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D.C. Paine. Transparent conducting oxides for photovoltaics. MRS Bulletin 32(3):242-247, (2007).
28. G. Conibeer. Third-generation photovoltaics. Materials Today 10(11):42-50, (2007).
29. M.A. Green. Third generation photovoltaics: ultra-high conversion efficiency at low cost. Prog. Photovolt. Res. Appl. 9:123-135, (2001).
30. W. Shockley, H.J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. J. Appl. Phys. 32: 510-519 (1961).
31. A.J. Nozik. Multiple exciton generation in semiconductor quantum dots. Chem. Phys. Letters. 457:3-11, (2008).
32. G. Marsh. PV: make way for the organic movement. Renewable Energy Focus 9:34-40, (2008).
33. H.J. Snaitth, L. Schmidt-Mende. Advances in liquid-electrolyte and solid-state dye sensitized solar cells. Adv. Ceram. 19:3187-3200, (2007).
34. Y. Kim, C-H. Kim, Y. Lee, K-J Kim. Enhanced performance of dye-sensitized TiO_2 solar cells incorporating COOH-functionalized Si nanoparticles. Chem. Mater. 22:207-211, (2010).
35. R. Jose, V. Thavasi, S. Ramakrishna. Metal oxides for dye-sensitized solar cells. J. Am. Ceram. Soc. 92(2):289-301, (2009).
36. A. Bahaj. Solar photovoltaic energy: generation in the built environment. Civil Engineering 158:45-51, (2005).
37. G. Marsh. BIPV: innovation puts spotlight on solar. Renewable Energy Focus 9(3):62-67, (2008).
38. C. Guillen, J. Herrero, M.T. Gutiérrez, F. Lucas. Materiales en lámina delgada sobre sustratos cerámicos para aplicaciones fotovoltaicas. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio 44(1):5-8, (2005).
39. D. Iencinella, E. Centurioni, M.G. Busana. Thin-film solar cell on commercial ceramic tiles. Solar Energy Mat. Solar Cells. 93:206-210, (2009).
40. http://www.konarka.com/media/pdf/konarka_info_sheet_BIPV.pdf, 17 de Noviembre de 2010.
41. A. Shah, J. Meier, A. Buechel, U. Kroll, J. Teinhauser, F. Meillaud, H. Schade, D. Dominé. Towards very low-cost mass production of thin-film silicon photovoltaics (PV) solar modules on glass. Thin Solid Films 502:292-299, (2006).
42. A. Russell. Sunny days for solar power. Industrial Minerals, July, 46-51, (2009).
43. <http://www.1366tech.com/v2/> 17 de Noviembre de 2010.
44. J.M. Mieres. La iniciativa europea de la eficiencia energética en la edificación (E2B EI) y el papel de la industria cerámica. Qualicer 2010.
45. <http://www.e2b-ei.eu/default.php> 17 de Noviembre de 2010.

Recibido: 09/08/2010

Aceptado: 25/01/2011