

HERRAMIENTAS NO-CODE EN LA FABRICACIÓN DE PASTILLAS DE URANIO



JAVIER CÁMARA EZQUERRA
Ingeniero de Calidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS
S.A. S.M.E.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción industrial requiere un manejo cada vez más sofisticado de datos y procesos para asegurar la calidad y eficiencia en la fabricación. En este contexto, ENUSA Industrias Avanzadas S.A. S.M.E., una empresa pública española encargada del diseño, la fabricación y el suministro de combustible nuclear, se encuentra abordando este desafío mediante distintos proyectos como el desarrollado en este artículo.

ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL PROYECTO. PROCESO Y COMPONENTES DE FABRICACIÓN

La fabricación de los elementos combustibles nucleares se realiza en la fábrica de ENUSA, situada en la localidad de Juzbado (Salamanca). Desde su puesta en marcha en 1985 provee de combustible a centrales nucleares españolas y europeas, como las localizadas en Francia, Finlandia, Suecia o Bélgica.

Dentro de la fábrica y de forma generalista, el proceso de fabricación se puede dividir en dos grandes áreas: el proceso cerámico y el proceso mecánico. En el proceso cerámico, se comienza con el polvo de óxido de Uranio (UO_2), el cual se mezcla con otros elementos complementarios, se pre-prensa, granula, prensa y sinteriza para obtener pastillas con los parámetros fisicoquímicos deseados. Estas pastillas se rectifican, inspeccionan y analizan para asegurar que cumplen con las especificaciones dimensionales requeridas. Posteriormente, se procede a introducirlas en

tubos de aleaciones de circonio (Zircaloy), iniciándose así el proceso mecánico. Después, se presuriza con gas inerte y se sella el tapón superior. Estas barras pasan a ser inspeccionadas mediante distintos métodos: ultrasonidos, gamma scanner, rayos x, etc. y posteriormente se ensamblan en estructuras mayores, conocidas como elementos combustibles, que finalmente se preparan para su transporte y posterior uso en los reactores nucleares.

Proceso cerámico, componentes de fabricación

El proceso cerámico podría definirse brevemente como un proceso de pulvimetalurgia cuyo componente principal es el polvo de Uranio. La pulvimetalurgia es una tecnología de procesamiento de materiales que consiste en la producción de piezas metálicas y compuestos a partir de polvos finos. Este proceso permite la fabricación de un gran número de piezas, control de las propiedades mecánicas de alta precisión dimensional [1], haciendo que sea el método de fabricación utilizado para obtener pastillas de Uranio.

Este proceso de pulvimetalurgia está marcado por distintas etapas de fabricación, de forma general, éstas son:

- **Mezclado:** El polvo de UO_2 se mezcla con polvo de U_3O_8 , formador de poros (AZB) y ocasionalmente con polvo de Gd_2O_3 en mezcladoras de tipo troncocónico para asegurar una mezcla homogénea. Cada elemento tiene un papel importante dentro de la mezcla. Como ya se ha indicado anteriormente, el polvo de Uranio enriquecido se trata del componente principal. El polvo de U_3O_8 , se trata de polvo procedente de los rechazos y excedentes de material que se dan durante el proceso. El formador de poros es un

compuesto orgánico que permite, tras su volatilización en el proceso de sinterizado, generar porosidad interna y por lo tanto modificar la densidad hasta el valor buscado. El polvo de Gadolinio (Gd_2O_3), es lo que se denomina un veneno neutrónico, dado que es un moderador para controlar la reacción en cadena dentro del reactor al ser un eficiente absorbedor de neutrones y tener un grado de quemado que coincide con el del U^{235} [2]. Es importante destacar que este elemento tan sólo se añade en ciertos diseños específicos.

- Pre-Prensado y granulado: El polvo de UO_2 mezclado tiene un tamaño de partícula pequeño y su grado de fluidez es muy bajo, por lo tanto, se procede a compactar y granularlo. De esta forma se obtiene una partícula con una densidad mayor en el pre-prensado, en torno a un 50% de la densidad teórica del material, y posteriormente se procede a granular los compactos rompiéndolos contra una malla de tamaño de luz definido, obteniéndose así gránulos de polvo que se comportan de una manera mucho más homogénea.

- Prensado: Al material granulado se le añade un lubricante (generalmente, ACRAWAX) para evitar daños en el utillaje dado las grandes presiones aplicadas durante este proceso (en torno a unas 3.5 toneladas) y así obtener un compacto libre de defectos. Tras este proceso se obtiene una pastilla que tiene unas dimensiones y densidad preconcebidas.

- Sinterizado: estas pastillas se introducen en hornos continuos que alcanzan en alguna zona elevadas temperaturas de hasta unos $1800^\circ C$, temperatura por debajo del punto de fusión. Esto provoca la unión de las partículas entre sí mediante difusión atómica en los límites de grano. Obteniéndose piezas densas, con una mayor resistencia mecánica y con una microestructura correctamente desarrollada. Otras características como la humedad, el tiempo de sinterizado y la atmósfera reductora se controlan para asegurar la calidad del producto.

- Rectificado: las pastillas sinterizadas se rectifican en una rectificadora sin centros para ajustar el diámetro hasta el indicado de acuerdo con las especificaciones. Tras ello,

se procede a la inspección final de distintas características como su aspecto superficial (ausencia de defectos), diámetro, perpendicularidad, rugosidad, integridad de la pastilla, etc.

El polvo de Dióxido de Uranio. Componente principal de la fabricación de pastillas

En la fabricación de pastillas de Uranio para reactores nucleares, el UO_2 se utiliza como material nuclear debido a su capacidad para mantener una reacción en cadena. La literatura asociada indica que de las características físico-químicas del polvo de UO_2 depende muy significativamente el procesamiento de la mezcla y los resultados obtenidos durante el proceso de fabricación de pastillas de Uranio [3, 4]. Es por ello, que el análisis, estudio y control de estas características es primordial para la correcta fabricación, rendimiento y fiabilidad del combustible.

Previo al proceso de utilización de un determinado componente para realizar pastillas de Uranio, se realiza un exhaustivo proceso de comprobación de la materia prima en cuestión. Entre otros controles y para el polvo de UO_2 , se procede a verificar el certificado del suministrador en el que se incluyen más de setenta características químicas/físicas distintas, comparándose los valores frente a los requisitos que requiere la especificación de producto.

Entre los parámetros mostrados en estos certificados a continuación se indican algunos, mostrando su importancia y efectos derivados:

- Test de sinterizado: se trata de realizar una micro producción de 12 pastillas con unos parámetros prefijados para la determinación de la densidad de esas pastillas. Esta prueba permite a los ingenieros de proceso, ajustar los componentes y parámetros en su fabricación a gran escala para obtener una densidad objetivo.

- Concentración de U^{235} : el Uranio natural tiene una baja concentración del isótopo Uranio-235 (0.71%). Una mayor proporción de este isótopo facilita que el reactor mantenga una fisión más eficiente y controlada, generando más energía.

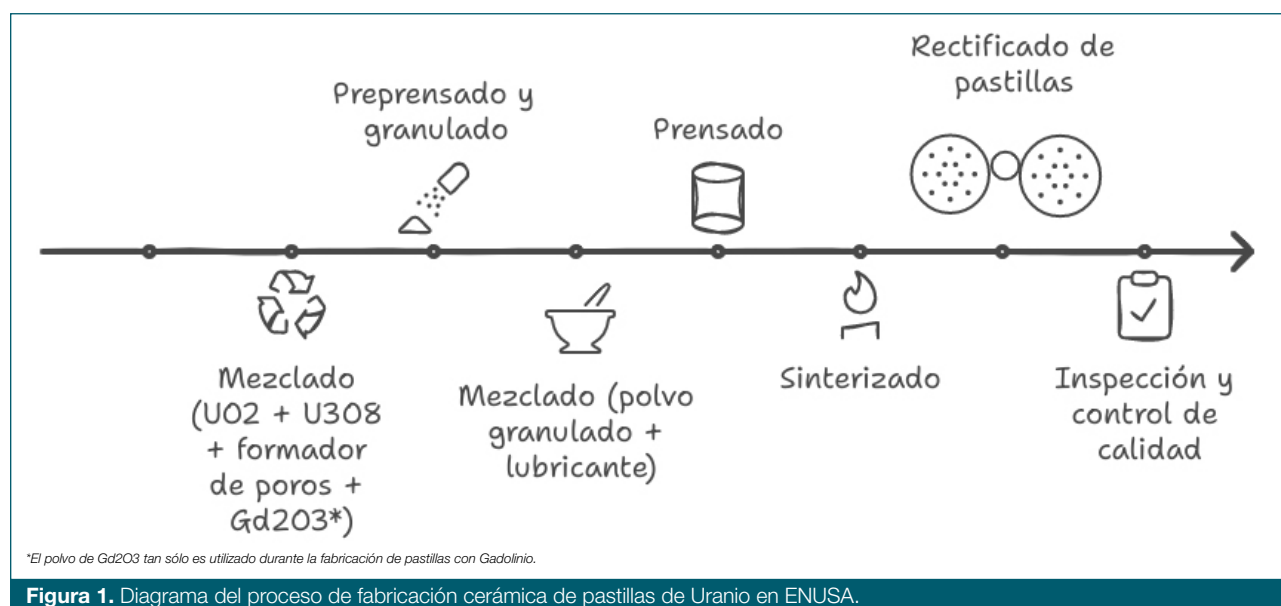


Figura 1. Diagrama del proceso de fabricación cerámica de pastillas de Uranio en ENUSA.

- **Impurezas:** existen una amplia gama de elementos que son analizados. Algunas pueden provocar modificaciones en ciertas características de la pastilla final. Como ejemplo, el contenido de Aluminio, es promotor del crecimiento de grano durante el proceso de sinterizado, permitiendo incluso triplicar el tamaño de grano en algunos casos [5]. Otros elementos, como el Flúor, puede llegar a generar picaduras (pequeñas cavidades o agujeros) debido a su reactividad con el Uranio. Su reacción forma compuestos volátiles que se evaporan, dando lugar a la formación de esos vacíos o defectos superficiales.

- **Características físicas del polvo** como pueden ser la densidad aparente compactada (*tap density*) y la densidad sin compactar (*pour density*). Estos elementos influyen en la eficiencia durante las etapas de prensado, afectando por ejemplo al llenado uniforme de las matrices, y sinterizado, pudiendo afectar a la retracción uniforme del material y a la distribución uniforme de la densidad final [5, 6].

Esta cantidad de variables y su importancia para la fabricación, calidad y desempeño del combustible, que aún ya siendo controladas de acuerdo a los límites pautados en las especificaciones, indican que un mayor seguimiento de estas características es ampliamente recomendable, siendo el punto de partida para este artículo.

FUNCIONAMIENTO DEL FLUJO AUTOMATIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL POLVO DE URANIO

Los certificados de polvo se reciben desde el inicio de la fabricación de pastillas de Uranio en ENUSA en 1985. Desde ese momento, la información ha sido revisada y contrastada mediante diversos medios de acuerdo con el avance de la tecnología en cada momento. Los últimos 15 años se encuentran digitalizados en formato PDF en el sistema digital de documentación denominado CODEX. Los más antiguos son fotocopias como la mostrada a continuación en la **Figura 2**.

Este hecho ha provocado que no pudieran generarse regis-

Volume Statistics (Geometric)				A114043.#01
Calculations from 1.433 μm to 44.62 μm				
Volume	2.127e6 μm^3	S.D.:	2.86 μm	
Mean:	2.965 μm	Variance:	7.16 μm^2	
Median:	2.477 μm	C.V.:	90.2%	
Mode:	2.313 μm			
A114043.#01	Particle Diameter			
Volume % >	μm			
5	12.35			
10	8.311			
16	5.049			
20	3.998			
25	3.403			
37	2.837			
50	2.477			
70	2.036			
75	1.832			
84	1.748			
90	1.627			
95	1.531			
100	1.433			

Figura 2. Detalle de un certificado antiguo de polvo de UO_2 .

tros informatizados de estas características de acuerdo a la complejidad de traslado de información a este formato.

La democratización de nuevas tecnologías como la Inteligencia Artificial y las herramientas que no necesitan de elevados conocimientos de programación han permitido realizar de una forma elaborada pero relativamente factible este tipo de tareas.

En el caso de estudio, el funcionamiento del flujo automatizado consiste en el siguiente proceso:

- Se descargan los certificados de polvo en formato PDF de un SharePoint (lugar para la gestión de documentos, hospedado en internet).
- Un código generado gracias al uso iterativo de ChatGPT [7] permite el copiado de los certificados en una dirección determinada en la nube a un determinado ritmo que permite el correcto funcionamiento del flujo de Power Automate [8].
- El flujo automatizado de Power Automate:

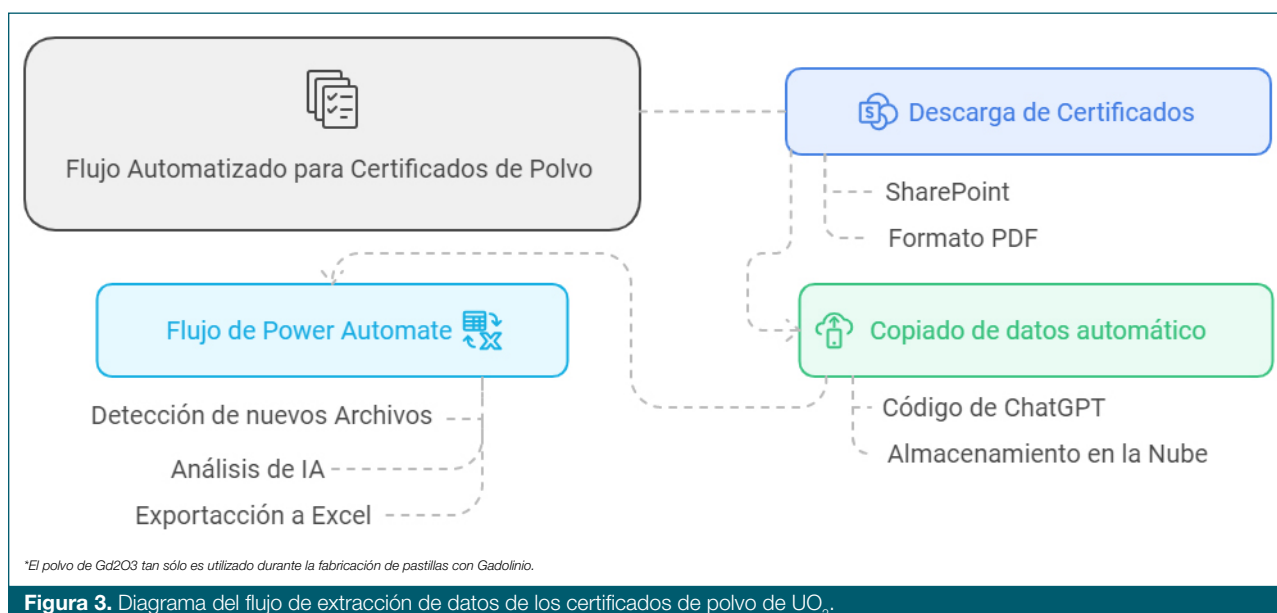


Figura 3. Diagrama del flujo de extracción de datos de los certificados de polvo de UO_2 .

- Detecta un nuevo archivo en la dirección en la nube.
- Analiza mediante sus opciones de Inteligencia Artificial (AiBuilder [9]) el archivo, extrayendo las características de interés. La IA ha sido entrenada con otros certificados de polvo, mediante un proceso de etiquetado de datos.
- Exporta dichos datos a un archivo Excel que se encuentra en la nube.

De esta forma los datos quedan en dicho contenedor de datos, abriendo una amplia gama de posibilidades:

- Análisis de causas raíz.
- Determinación de tendencias en las características y efectos en la fabricación.
- Importante fuente de datos para grupos de mejora de calidad: maximizar rendimientos, cumplimiento de requisitos de calidad.

CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN

Durante la fabricación de un lote de pastillas con Gadolinio, tras el proceso de sinterizado, se procedió a la correspondiente determinación de la densidad geométrica, realizada por cálculos a través del diámetro, longitud y el peso de las pastillas. Es en ese momento cuando se comenzaron a detectar valores de diámetro que se encontraban por debajo del límite inferior del plano (8.180 mm).

El diámetro de las pastillas es crucial para garantizar una transferencia de calor eficiente y la integridad estructural del combustible durante su operación, evitando puntos calientes y fallos en el revestimiento [10].

Se analizó el proceso de fabricación que dicho lote había seguido sin obtener ningún tipo de condición anómala. Los datos de control de proceso indicaban que la mezcla se había homogeneizado correctamente, no existían indicaciones que mostrasen problemas de fabricación, ni se observaron variaciones en los parámetros de fabricación.

El único apunte se dió durante la etapa de pre-prensado. La mezcla requería de modificaciones en esta etapa (pre-

sión de prensado) para obtener las densidades que marcaba el plan de mezcla. Es importante destacar que, debido a las distintas características de la materia prima, este no es un proceso que se pueda considerar insólito.

Como posibles hipótesis para la determinación de la causa se planteó la posibilidad de que alguno de los 16 punzones de la prensa mostrase un comportamiento errático. Se comprobó el diámetro y la densidad geométrica de pastillas trazadas de cada punzón, descartándose así la hipótesis.

Se analizaron los componentes utilizados durante la fabricación del lote. Todos habían sido correctamente aceptados de acuerdo con los requisitos.

Se procedió a analizar más en detalle las características de los componentes, detectándose dos características en el polvo de UO_2 , que podrían haber provocado la obtención inesperada de pastillas de diámetro más bajo de lo habitual y una densidad con variabilidad elevada. Para ello fue utilizado el registro de datos generado y explicado en apartados anteriores.

Se comprobó que ese lote de polvo de UO_2 tenía una densidad aparente baja. Esta característica se apreció en dos parámetros denominados: “*tap density*” y “*pour density*”.

- *Tap density* es la densidad aparente determinada después de dar un golpeteo para “compactar” el sólido.
- *Pour density* es la densidad aparente determinada cuando el polvo es inicialmente depositado en un contenedor.

Ambos valores se incluyen en los certificados de polvo y son únicamente informativos.

A continuación, se incluyen dos gráficas en la que se muestran los resultados para ambas características obtenidas para más de 1400 lotes de polvo de UO_2 de un determinado proveedor, ordenadas cronológicamente (desde el año 2010) a los más actuales, en la **Figura 4** y **Figura 5**, mostrado desde 0 en orden creciente.

Además, se marca en color rojo el valor obtenido para el lote de polvo en cuestión.

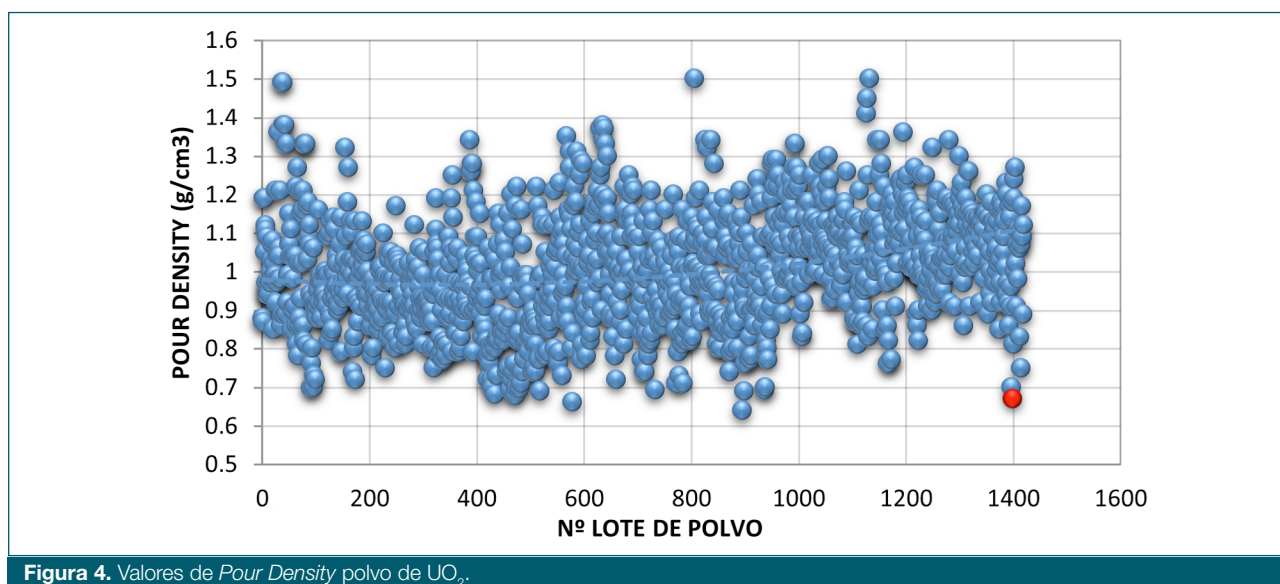


Figura 4. Valores de *Pour Density* polvo de UO_2 .

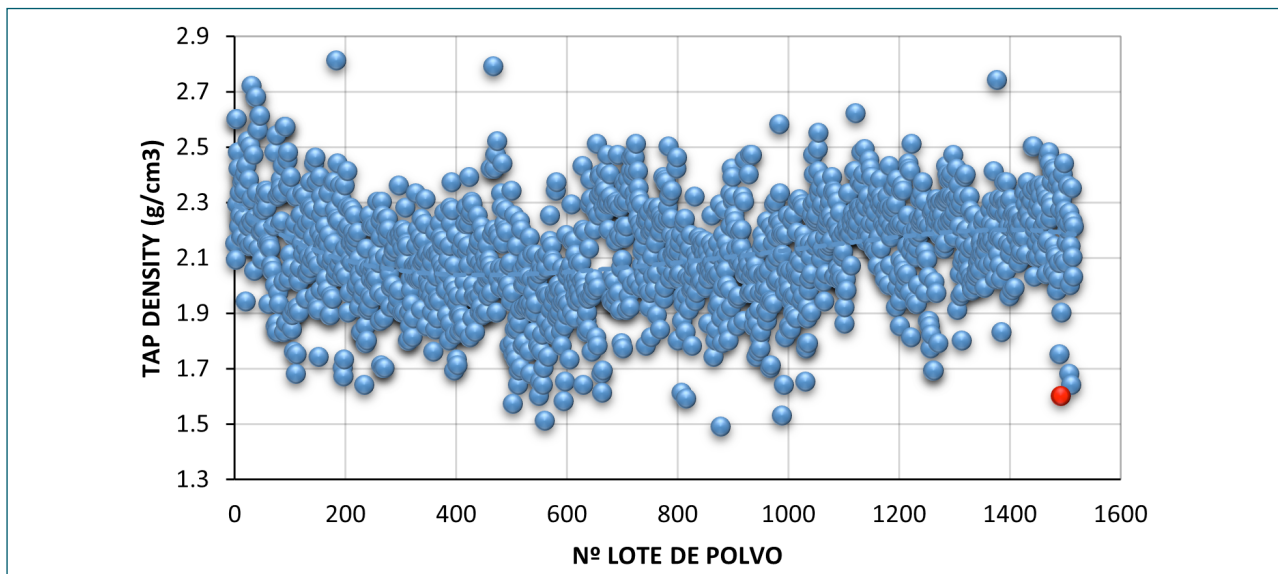


Figura 5. Valores de *Tap Density* polvo UO_2 .

El valor de *Pour density* fue de 0.67 g/cm^3 , siendo el tercer valor más bajo de todos los lotes analizados.

El valor obtenido de *Tap density* para este lote fue de 1.6 g/cm^3 , siendo el octavo valor más bajo de todos los lotes analizados.

Aún no tratándose del valor históricamente más bajo, era reseñable que para ambas características, era uno de los más reducidos. Es importante reseñar que el lote se diseñó con un 3% de polvo de Gadolinio, cuya adición implica una reducción de la densidad del polvo inicial. En la **Figura 6** se muestra una correlación que indica la reducción de densidad de acuerdo con el porcentaje de Gadolinio utilizado y el proceso de fabricación.

Como se indicaba anteriormente, durante el preensado del primer sublote ya se percibió que se debieron de realizar ajustes con el fin de obtener las densidades objetivo que marca el plan de mezcla.

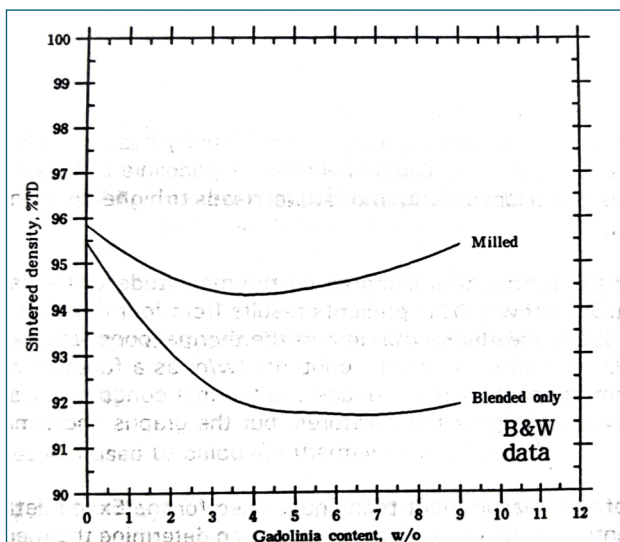


Figura 6. Efecto del contenido de Gadolinio en la densidad de las pastillas sinterizadas [11].

Posteriormente, no hay observaciones durante el prensado, puesto que la partícula idealmente ya está homogeneizada en tamaño. Se procede a sinterizar y aunque las densidades no son anómalas, se obtiene unos diámetros muy bajos, consecuencia de que las pastillas se han contraído tras el sinterizado más de lo esperable; provocado por la densidad inicial inesperadamente baja.

Esto se debe a que una menor densidad aparente significa que hay más espacio vacío (porosidad) entre las partículas de polvo. Durante el sinterizado, el material se densifica a medida que las partículas se acercan y los poros se reducen. Como resultado, un polvo con menor densidad aparente inicial tiene más espacio para densificarse, lo que lleva a una mayor contracción total durante el proceso.

La ecuación de Coble y Berg (1) describe la relación entre la tasa de contracción y el tiempo, la temperatura, y otros factores como el mecanismo de difusión dominante (superficial, de contorno de grano o volumen). La densidad aparente influye en el grado de contracción porque afecta la cantidad inicial de porosidad que debe eliminarse para alcanzar la densificación final. [12]

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{27}{2} \frac{\gamma \Omega D_b}{KTd^3} \cdot (1 - \rho)^n$$

(1) $d\rho/dt$: tasa de densificación, γ : energía superficial, Ω : volumen atómico, D_b : coeficiente de difusión a través de los bordes de grano, K : constante de Boltzman, T : temperatura absoluta, d : diámetro medio de las partículas, ρ : densidad relativa del material y n : exponente que depende del mecanismo de densificación.

Gracias a la base de datos de características del polvo de UO_2 se identificó como causa raíz principal que la baja densidad aparente del polvo fue la causa de las variaciones en el diámetro, permitiendo establecer acciones de mejora con el fin de evitar casos repetitivos futuros.

CONCLUSIONES

El desarrollo de un sistema automatizado para la extracción y análisis de los datos fisicoquímicos del polvo de óxido de Uranio ha demostrado ser una herramienta fundamental

para mejorar la calidad y eficiencia en la fabricación de pastillas de Uranio en ENUSA. La automatización del proceso, mediante el uso de herramientas No-Code como Power Automate e inteligencia artificial como AiBuilder y ChatGPT, ha permitido optimizar la identificación de parámetros significativos, facilitando la detección de anomalías y mejorando significativamente la toma de decisiones en la resolución de desviaciones de calidad.

El caso práctico del lote de pastillas con Gadolinio ha sido una clara demostración del impacto positivo de este desarrollo, permitiendo identificar rápidamente la causa raíz de una contracción dimensional inesperada y aplicar medidas correctivas eficaces.

Este enfoque no solo ha mejorado el control de calidad durante la fabricación, sino que también ha abierto nuevas oportunidades para el análisis de tendencias y la mejora continua de los procesos productivos. La capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos de manera eficiente refuerza la fiabilidad del proceso, garantizando un producto de mayor calidad y permitiendo a ENUSA posicionarse a la vanguardia en la producción de combustible nuclear.

REFERENCIAS

- [1] Luyckx, S., Tlotleng, M. Advanced Powder Metallurgy Technologies, 2020.
- [2] Assman, H., Robin J.P, «Process and product control of Gadolinium bearing oxide powder and pellets for LWR fuels» 1991.
- [3] Assmann, H. et al., Processing and Properties of Uranium Oxide (UO₂) Fuel Pellets, 2014.
- [4] Corman, G. S., Effects of UO₂ Powder Physical Characteristics on Powder Fabricability and Fuel Pellet Quality, Mayo 1986.
- [5] Griffiths, G., Keegan, E., Youg, E. et al, Physical characterization of uranium oxide pellets and powder applied in the Nuclear Forensics International Technical Working Group Collaborative Materials, 2018.
- [6] Papynov, E.K., Shichalin, O.O., Minonenko, A.Y. et al, Synthesis of Hight-Density Pellets of Uranium Dioxide by Spark Plasma Sintering in Dies of Different Types. 2018.
- [7] «www.chatgpt.com», ChatGPT, Open AI ChatGPT, 2024. Página web (accedida: noviembre 2023).
- [8] «www.microsoft.com/es-es/power-platform/products/power-automate», Microsoft, Microsoft Power Automate, 2018. Página web (accedida: noviembre 2023).
- [9] «www.microsoft.com/es-es/ai-builder/overview», Microsoft, Información general de AI Builder, 2024. Página web (accedida: septiembre 2024).
- [10] Duderstadt, J.J. , Hamilton; L. J., Nuclear Reactor Analysis, 2013
- [11] Characteristics and use of Urania-gadolinia fuels. IAEA International Atomic Energy Agency, 1995. IAEA-TEC-DOC-844
- [12] German, R. M., Sintering Theory and Practice, 1996.
- [13] Rahaman, M. N., Sintering of Ceramics, 2007. ■