

Obtención de Polvos de Aluminio por Métodos de Atomización

Raymundo Montiel-Olivares¹, Pedro Quinto-Diez², Raymundo Ruiz-Infante³, Fernando Aguirre-Sanchez⁴

¹SEPI, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: rmontielo2300@alumno.ipn.mx

²SEPI, ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México. Email: pquintod@ipn.mx

³METAPOL S.A. de C.V., México. Email: rayruiz@metapol.com.mx

⁴METAPOL S.A. de C.V., México. Email: faguirre@metapol.com.mx

Resumen

Los polvos de aluminio se pueden obtener a través de diversos métodos, siendo algunos de los más comunes la atomización, la molienda mecánica y por reducción, sin embargo, en los últimos años han se han realizado investigaciones y desarrollado nuevos métodos para la obtención de polvos de aluminio, como es el proceso de atomización con plasma, el método PREP (Plasma Rotating Electrode Process), EIGA (Electrode Induction Gas Atomization).

En el proceso de atomización con gas inerte, el aluminio se funde para posteriormente pasar a través de la cámara de atomización y por medio de un choque entre el metal fundido y el gas inerte (Nitrógeno o Argón) a alta presión, esto provoca que se fragmente y se solidifique el polvo. Este proceso dependiendo lo parámetros que se utilicen se obtendrá la morfología y DTP.

El método de atomización con plasma es una técnica más avanzada utilizada en la metalurgia de polvos para producir partículas finas y de alta pureza de diversos materiales metálicos, en este proceso la materia prima puede ser en forma de alambre, el principio de funcionamiento es similar al del proceso de atomización con gas. El resultado es un polvo de alta pureza y con una morfología esférica.

El proceso de PREP es una técnica de fabricación avanzada que utiliza un arco de plasma para fundir un electrodo metálico giratorio. El electrodo gira a alta velocidad dentro de una cámara de vacío mientras se somete a un arco de plasma generado por un gas ionizado, como argón. El calor extremo del arco de plasma funde la superficie del electrodo metálico, creando una capa fundida que es proyectada hacia un sustrato, generalmente en forma de polvo fino o partículas.

El método de EIGA un electrodo de metal se introduce en una cámara de vacío y se calienta mediante inducción eléctrica. Al mismo tiempo se introduce gas a alta presión en la cámara, el cual interactúa con el electrodo calentado. El choque entre el metal fundido y el gas provoca la fragmentación y atomización del metal fundido, produciendo gotas finas que solidifican rápidamente en polvo, este proceso es eficiente y permita la producción de polvos metálicos de alta pureza y tamaño de partícula controlado para aplicaciones industriales y tecnológicas exigentes.

Estos procesos de atomización, como el EIGA, PREP, y otros mencionados anteriormente, ofrecen beneficios significativos para la producción de polvos metálicos, no solo de aluminio, sino también de otros metales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada proceso tiene sus propias características y parámetros específicos, lo que resulta en productos finales diferentes que se adaptan a diversas necesidades industriales.

Posterior a la investigación de los métodos de obtención de polvos de aluminio, se diseña un sistema basado en el proceso de atomización con gas inerte utilizando nitrógeno como energía pulverizante, este proceso se adecua a las necesidades de la empresa a la que se realiza este proyecto.

Palabras clave: aluminio; gas inerte; polvo de aluminio; atomización.

Abstract

Aluminum powders can be obtained through various methods, with some of the most common being atomization, mechanical milling, and reduction. However, in recent years, research has been conducted and new methods developed for obtaining aluminum powders, such as plasma atomization, the PREP (Plasma Rotating Electrode Process) method, EIGA (Electrode Induction Gas Atomization) process.

In the inert gas atomization process, aluminum is melted and then passed through the atomization chamber. By means of a collision between the molten metal and the inert gas (Nitrogen or Argon) at high pressure, the metal

fragments and solidifies into powder. Depending on the parameters used, this process yields different morphologies and particle size distributions.

Plasma atomization is a more advanced technique used in powder metallurgy to produce fine and high-purity particles of various metallic materials. In this process, the raw material can be in the form of wire, and the operating principle is similar to that of gas atomization. The result is a high-purity powder with a spherical morphology.

The PREP process is an advanced manufacturing technique that uses a plasma arc to melt a rotating metal electrode. The electrode rotates at high speed within a vacuum chamber while being subjected to a plasma arc generated by an ionized gas, such as argon. The extreme heat of the plasma arc melts the surface of the metal electrode, creating a molten layer that is projected onto a substrate, usually in the form of fine powder or particles. In the EIGA method, a metal electrode is introduced into a vacuum chamber and heated by electrical induction. At the same time, high-pressure gas is introduced into the chamber, which interacts with the heated electrode. The collision between the molten metal and the gas causes the fragmentation and atomization of the molten metal, producing fine droplets that rapidly solidify into powder. This process is efficient and allows for the production of high-purity metallic powders with controlled particle size for demanding industrial and technological applications. These atomization processes, such as EIGA, PREP, and others mentioned above, offer significant benefits for the production of metallic powders, not only aluminum but also other metals. However, it is important to note that each process has its own characteristics and specific parameters, resulting in different final products that cater to various industrial needs.

Following the investigation of methods for obtaining aluminum powders, a system is designed based on the gas atomization process using nitrogen as the atomizing energy. This process is tailored to the needs of the company for which this project is being conducted.

Keywords: aluminum; inert gas; aluminum powder; atomization.

1. Introducción

El aluminio es el metal más abundante en la tierra. Es un material muy versátil y tiene una gran variedad de aplicaciones industriales ya sea en las áreas automotriz, piezas metal mecánica, pinturas, pirotécnica y aeroespacial.

Los polvos de aluminio de alta calidad son requeridos para los diferentes procesos industriales mencionados anteriormente y es por ello que se han desarrollado investigaciones sobre la obtención de dichos polvos.

Dentro de estas investigaciones entra el proceso de atomización [1].

El proceso de atomización consiste en descomponer el metal fundido en pequeñas gotas por medio de un choque con otro fluido frío a alta presión o por alguna acción mecánica. Este proceso también se puede ver en los líquidos fríos como por ejemplo en los aerosoles.

El proceso de atomización ha tomado gran relevancia durante los últimos años ya que los polvos obtenidos por medio de este proceso se pueden utilizar dentro del proceso de impresión 3D, combustibles, recubrimientos, etcétera, ya que cumplen con sus requerimientos.

Hay varios procesos de atomización los cuales se exponen en este trabajo. Algunos de ellos son la atomización con agua (WA, por sus siglas en inglés), atomización con gas (GA), electrode induction gas atomization (EIGA), atomización con plasma (PA), plasma rotating electrode process (PREP), y finalmente la atomización centrifuga.

De acuerdo a los procesos antes mencionados un punto importante a observar es el tamaño de partícula, cuando el tamaño de la partícula es menor a 1000 μm este ya

se puede considerar como un polvo. Sin embargo, los procesos industriales no ocupan ese tamaño de partícula, estos procesos necesitan polvos más finos, mínimo un tamaño de partícula de 500 μm .

Otro punto a destacar es la morfología de la partícula. En cada proceso de atomización se obtiene una morfología diferente, que puede ser una forma, esférica, dendrítica, escamosa, irregular, entre otras formas, estas formas y otras se identifican en la Figura 1. (Tomada de A. J. Yule y J. J. Dunkley, *Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition*, Nueva York: Oxford Series on Advanced Manufacturing, 1994).

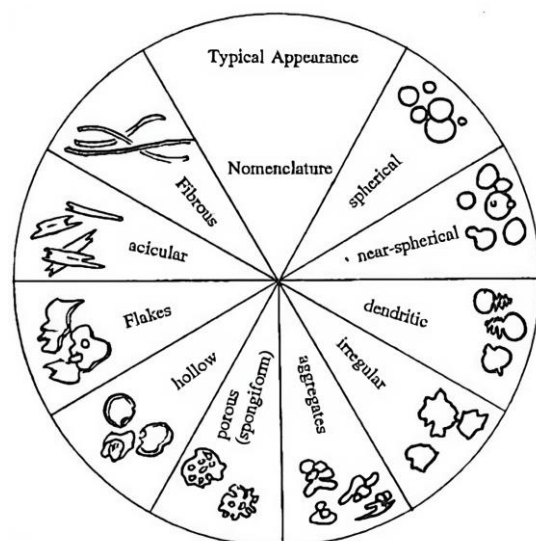


Figura 1. Nomenclatura para la forma de las partículas. Fuente: [1].

Dentro del proceso de atomización se tienen dos parámetros adimensionales los cuales son el número de Reynolds y el número de Weber. Estos números describen la fase líquida en el proceso a partir de las propiedades del líquido.

El número de Reynolds (Re_i , ecuación 1) representa la relación entre la inercia y las fuerzas viscosas, mientras que el número de Weber (We_i , ecuación 2) representa la relación entre la inercia y las fuerzas de tensión superficial [2].

$$Re_i = \frac{\rho_i V_i D}{\mu_i} \quad (1)$$

$$We_i = \frac{\rho_i V_i^2 d}{\sigma} \quad (2)$$

Donde:

- i : indica el componente a analizar
- ρ : densidad
- V : velocidad
- μ : viscosidad
- σ : tensión superficial
- D : diámetro de tubería
- d : diámetro de gota

Para la medición de los polvos obtenidos, la distribución del tamaño de las partículas es uno de los parámetros más importantes. La distribución de tamaño de partículas (DTP) de los polvos obtenidos en el proceso de atomización tienden a seguir la ley lognormal. Esto quiere decir que las distribuciones forman líneas casi rectas en el plano de probabilidad logarítmica.

A continuación, se describen los procesos de atomización: Atomización con gas (GA) dentro de este proceso se presentan sus dos arreglos (confinado y caída libre), atomización con plasma (PA), Plasma rotating electrode process (PREP), electrode induction gas atomization (EIGA).

2. Atomización con Gas (GA)

Este proceso consiste en la fragmentación del chorro líquido mediante un flujo de gas a alta velocidad de aire, nitrógeno, argón o helio. Los tres gases son inertes. Como se sabe que el aluminio es altamente explosivo se necesita un ambiente libre de oxígeno o con la menor concentración de oxígeno posible para minimizar las probabilidades de que pueda reaccionar el polvo de aluminio [3].

El proceso de atomización con gas es el más utilizado para la obtención de polvos de aluminio. El proceso tiene tres etapas, fusión, atomización y solidificación. Cada atomizador de gas contiene un horno para fundir metal bajo atmósfera o en condiciones de vacío.

Cuando el metal está en fase líquida se hace fluir hacia las antorchas de gas a alta presión. El impacto del chorro de gas a alta velocidad provoca la deformación y posteriormente la desintegración del metal líquido en pequeñas gotas. Durante la caída, las partículas se

enfían y se solidifican antes de llegar al final de la cámara de atomización para su posterior recolección.

Normalmente dentro del proceso de GA se utilizan presiones entre 0.1 hasta los 5 MPa, sin embargo, hay estudios que recomiendan presiones más altas para obtener tamaños de partículas mucho más finos [4].

Algunas ventajas que se tienen al usar el proceso de GA se enlistan a continuación:

1. Partículas esféricas
2. Alta producción
3. Solidificación rápida

Dentro del proceso de atomización con gas se tienen dos tipos de arreglos para el proceso [5] los cuales son:

- Free fall atomization
- Close-coupled gas atomization

2.1. Free Fall Atomization

Este proceso consiste en que el flujo de metal fundido desciende desde el crisol hasta una cierta distancia antes de encontrarse con los dos chorros de gas inerte a alta presión en una cierta distancia, provocando que el metal fundido se disperse formando partículas esféricas de diferentes diámetros y se solidifican durante su trayectoria en la cámara de atomización. El esquema de este proceso se muestra en la Figura 2.

Este tipo de atomizador se aplica principalmente en las industrias; el diámetro de las partículas suele estar entre 80 y 200 μm , y tiene una alta producción.

En este proceso los dos gases que normalmente son más usados son, el aire y el nitrógeno, sin embargo, si se requieren polvos más esféricos se recomienda utilizar el nitrógeno, ya que con el aire se obtienen partículas menos esféricas [3].

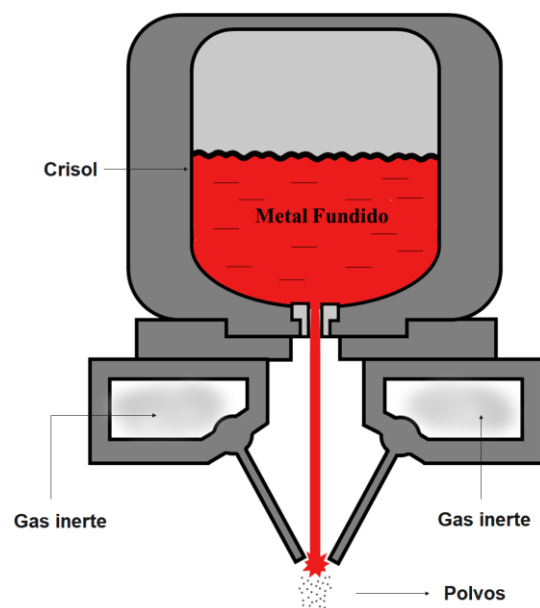


Figura 2. Esquema de atomización por caída libre. Fuente: elaboración propia.

2.2. Close-Coupled Gas Atomization (CCA)

Este tipo de arreglo de boquilla hace posible aumentar el rendimiento del proceso al maximizar la velocidad y la densidad del gas en el choque térmico entre el chorro de metal líquido y el gas inerte [4].

En el proceso de CCA se minimiza la pérdida de energía cinética y la velocidad del gas que se produce cuando el chorro de gas se aleja de la boquilla, por lo tanto, en CCA proporciona una mayor velocidad de gas en la zona de fragmentación y tienden a obtener polvos más finos.

Sin embargo, en este tipo de equipos existe un riesgo latente, la solidificación del metal, una complicación que se puede presentar por la transferencia de calor del metal líquido con el ambiente durante el recorrido del metal hasta llegar al choque entre el gas inerte [1].

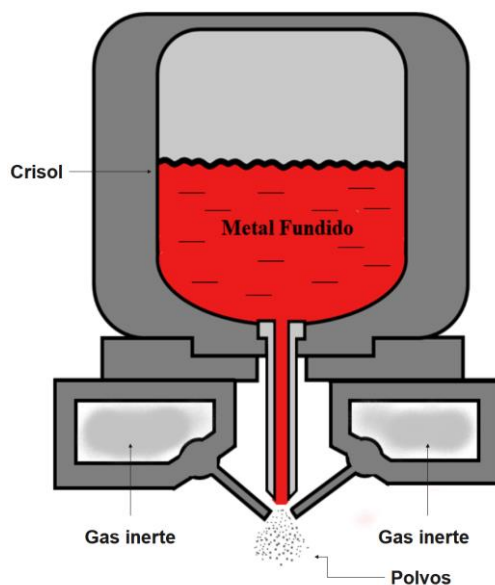


Figura 3. Esquema de atomización tipo CCA.
Fuente: elaboración propia.

3. Atomización con Plasma (PA)

La atomización con plasma es un proceso relativamente avanzado. Este proceso puede producir polvos altamente esféricos y con una alta pureza debido al bajo contenido de oxígeno durante el proceso.

La materia prima a utilizar es en forma de alambre el cual entra directamente a la cámara de atomización. Esta es una diferencia con los otros procesos ya que utilizan como materia prima el lingote de aluminio como se aprecia en la Figura 4 y este se fundirá en un crisol y caerá para producir los polvos metálicos.

En el proceso de PA una vez alimentado el alambre de aluminio (Figura 5) hacia las antorchas de plasma, el alambre se transforma directamente en atomizado, utilizando el calor y la energía cinética del plasma. De

este proceso se obtienen partículas de 5 a 250 μm con una forma particularmente esféricas [6].



Figura 4. Lingote de aluminio. Fuente: Recraft AI



Figura 5. Alambre de aluminio. Fuente: Recraft AI

Como se mencionó, este proceso tiene ventajas sin embargo un problema que se presenta se relaciona con la materia prima, ya que este proceso no se puede llevar a cabo si no está la materia prima en forma de alambre. El proceso se lleva a cabo en una atmósfera inerte debido a la reactividad del aluminio, lo que exige que se tenga una estructura superficial de los polvos con un nivel muy bajo de impurezas [3]. El proceso de atomización con plasma se muestra en la Figura 6.

4. Plasma Rotating Electrode Process (PREP)

Este proceso es una técnica avanzada para la producción de polvos metálicos de alta calidad. En este proceso, una barra metálica se hace girar a alta velocidad mientras su extremo es calentado por un arco de plasma.

El calor que produce el plasma funde el extremo de la barra, y la fuerza centrífuga que se genera a partir de un motor que sujeta la barra de aluminio, debido a la acción de rotación lanza el metal fundido en forma de

pequeñas gotas que se solidificaran en el trayecto de caída, formando partículas pequeñas, sin embargo, no se obtiene una partícula muy esférica [3].

El proceso de PREP tiene varios parámetros críticos, los cuales influyen directamente en los polvos finales. La materia prima en este proceso es una barra de aluminio como se muestra en la Figura 7. La barra de aluminio gira típicamente entre 10,000 y 40,000 rpm, generando la fuerza centrífuga necesaria para expulsar el metal fundido en forma de gotas. El proceso se muestra en la Figura 8.

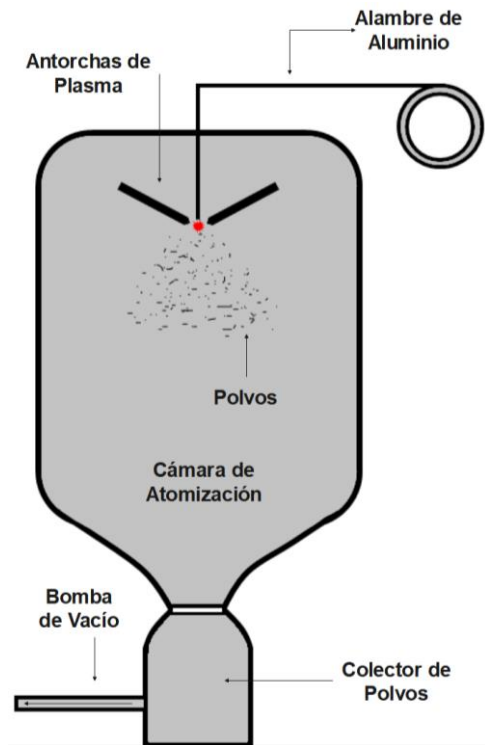


Figura 6. Esquema de atomización con plasma. Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Barra de aluminio. Fuente: Recraft AI.

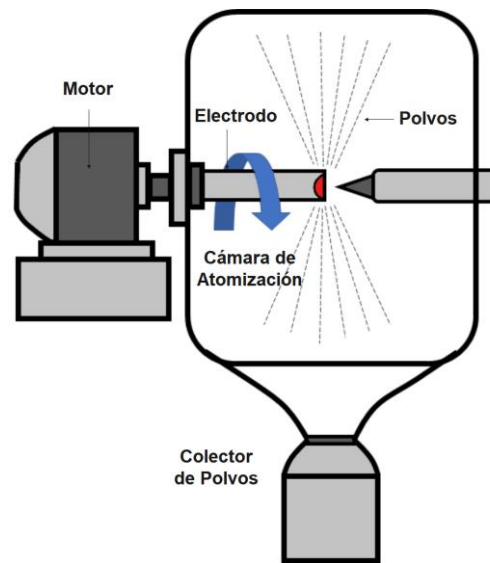


Figura 8. Esquema de atomización con PREP. Fuente: elaboración propia.

5. Electrode Induction Gas Atomization

En el proceso de EIGA se producen polvos metálicos de alta pureza a partir de una barra metálica como el que se muestra en la Figura 7, que la cual se funde por inducción sin crisol. Este proceso utiliza una corriente de alta frecuencia para calentar y fundir el extremo de la barra metálica.

El metal líquido cae en la boquilla de atomización sin ningún contacto con las partes circundantes.

Posteriormente el flujo de metal fundido chocará con un chorro de gas inerte (argón, nitrógeno, helio), a alta presión. Este chorro de gas atomiza el metal fundido en pequeñas gotas que se enfrían y solidifican rápidamente en forma de pequeñas partículas.

El proceso EIGA se utiliza para la producción de polvos no ferrosos entre ellos, el aluminio, titanio, y también puede aplicarse a sus aleaciones. Este proceso se puede llevar a cabo sin la necesidad de un crisol y sin cerámica [6].

En el proceso Electrode Induction Gas Atomization y en el proceso de atomización con plasma, el material no se funde en un crisol y, por lo tanto, no hay contaminaciones por material cerámico, otro punto es la contaminación por el lote anterior en estos procesos mencionados anteriormente no existe esta problemática por su tipo de funcionamiento. El esquema de este proceso se observa en la Figura 9.

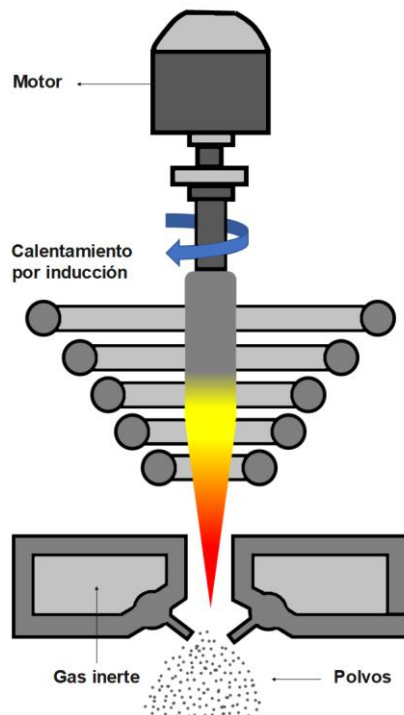


Figura 9. Esquema de atomización con EIGA. Fuente: elaboración propia.

6. Resultados

En el ámbito de la producción de polvos metálicos, la investigación de los procesos de atomización ha revelado diversas técnicas con características y resultados específicos. Entre estas técnicas se encuentran la atomización con gas dentro de la GA se encuentran dos tipos de arreglos, caída libre y confinado, la atomización con plasma, el proceso EIGA (Electrode Induction Melting Gas Atomization), y el PREP (Plasma Rotating Electrode Process). Cada uno de estos métodos ofrece ventajas particulares en cuanto al tamaño de partícula, morfología y otros aspectos críticos del polvo producido.

Después de estudiar los diferentes procesos de atomización se eligió el proceso de atomización con gas inerte utilizando nitrógeno como energía pulverizante y con el arreglo confinado (CCA) para obtener polvos de aluminio.

La atomización con gas inerte, específicamente nitrógeno, es económicamente más viable, ya que el costo del gas es considerablemente menor que el de los gases utilizados en los otros procesos. Además, este método permite obtener polvos metálicos con tamaños de partícula más uniformes y esféricos, que van desde 20 a 150 micrones [6], adaptándose perfectamente a las necesidades para la empresa a la que se realiza la investigación.

Para esta investigación se realizan 3 fases. La primera fase es la investigación de los diferentes procesos de atomización, la segunda fase es el diseño y

construcción de un equipo prototipo para realizar las primeras pruebas y modificar las variables del proceso si es necesario y finalmente la fase 3 es el diseño y construcción de una planta que pueda producir 1 tonelada de atomizado de aluminio por día, con tres turnos en el día de 8 horas cada uno.

El diseño del prototipo que corresponde a la segunda fase de la investigación se realizó en el software de AUTODESK INVENTOR. El diseño se muestra en las Figura 10, 11, y 12.

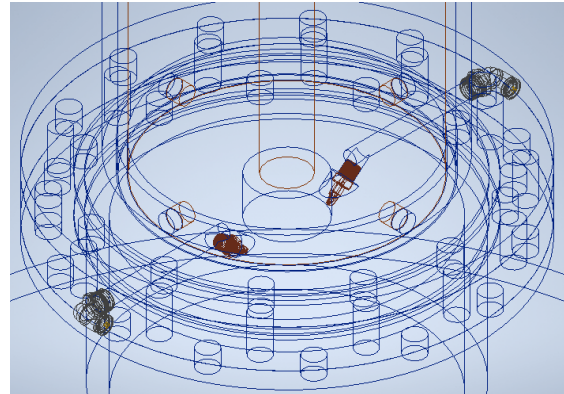


Figura 10. Diseño de boquillas de atomización. Fuente: elaboración propia

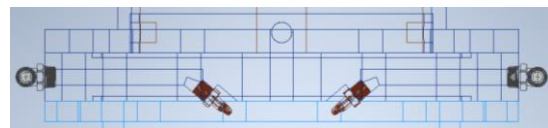


Figura 11. Diseño de boquillas y ángulo de incidencia. Fuente: elaboración propia.

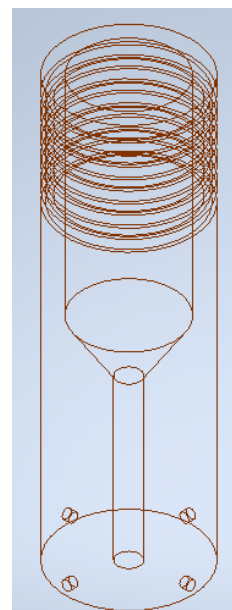


Figura 12. Diseño de crisol y longitud de caída. Fuente: elaboración propia

Finalmente posterior al diseño de los tres componentes que se mencionan anteriormente, se diseña la cámara de atomización como se muestra en la Figura 13. Sin embargo, en esta etapa se presenta un problema que se requiere analizar el cual es la longitud de caída requerida para una correcta solidificación, ya que si el polvo sigue muy caliente al momento de llegar al final de la cámara de atomización las partículas tienden a adherirse entre sí. Después del análisis para el cálculo de la longitud de caída y validación del prototipo se continuará con la construcción del equipo piloto en las instalaciones de la empresa.



Figura 13. Diseño de cámara de atomización.
Fuente: elaboración propia.

7. Conclusión

Después de una larga investigación realizada sobre los diferentes procesos de atomización, se encuentra el proceso de atomización con gas y con un arreglo confinado como el proceso que más se adapta para satisfacer las necesidades de la empresa.

Con la construcción del piloto se podrá realizar las pruebas necesarias y con ello obtener información del producto para poder determinar si es funcional a la empresa o se requiere hacer alguna modificación dentro del proceso.

8. Referencias

- [1] A. J. Yule y J. J. Dunkley, *Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition*, Nueva York: Oxford Series on Advanced Manufacturing, 1994.
- [2] A. N., *Handbook of Atomization and Sprays*, Toronto, Ontario: Springer, 2011.
- [3] O. Neikov, S. Naboychenko y N. V. Yefimov, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders Technologies and Applications*, Segunda ed., Elsevier, 2019.
- [4] S. Mandal, A. Sadeghianjahromi y C.-C. Wang, «Experimental and Numerical Investigations on Molten Metal Atomization Techniques - A Critical Review,» *Advanced Powder Technology*, 2022.
- [5] X.-g. Li, Q. Zhu, S. Shu, J.-z. Fan y S.-m. Zhang, «Fine spherical powder production during gas atomization of pressurized melts through melt nozzles with a small inner diameter,» *POWDER TECHNOLOGY*, vol. 356, pp. 759-768, 2019.
- [6] K. Kassym y A. Perveen, «Atomization Processes of Metal Powders for 3D Printing,» *Materialstoday: PROCEEDINGS*, 2019.
- [7] G. Chen, S. Zhao, P. Tan, J. Wang, C. Xiang y H. Tang, «A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization,» *POWDER TECHNOLOGY*, vol. 333, pp. 38-46, 2018.