



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Diseño de una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio

Erika Burckhardt Hernández

David Mauricio Suárez Rada

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia

2024

Diseño de una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio

Erika Burckhardt Hernández
David Mauricio Suárez Rada

Director:

Ph.D Mario Fernando Muñoz Vélez

Línea de Investigación:

Ciencias de los materiales

Grupo de Investigación:

Ingeniería Sísmica y Materiales (SIGMA)

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana

Santiago de Cali, Colombia

2024

Declaración de obra original

Nosotros declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa nuestro trabajo original, excepto donde hemos reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Erika Burckhardt Hernández



David Mauricio Suárez

Fecha 28 de junio del 2024

Agradecimientos

Este trabajo se lo dedico a mi familia, en especial a mi gato Mostacho, por acompañarme por tantos años y todas las noches trasnochando a mi lado. Te amo gordo, gracias. Igualmente, a todas las personas que nos ayudaron en este proceso como profesores, estudiantes y amigos.

- **Erika Burckhardt Hernández**

Le dedico a mis padres este trabajo, al brindarme la posibilidad del estudio para cambiar el mundo desde la Ingeniería Mecánica; hago menciones honoríficas a los profesores que nos asesoraron durante nuestro proceso de diseño. Finalmente, este trabajo se lo dedico a mi primo Santiago Millán que me cuida desde el cielo. A ellos y a Dios, doy infinitas gracias.

- **David Mauricio Suárez Rada**

Resumen

Diseño de una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio

Con la llegada de nuevas aplicaciones para el uso de polvos metálicos (impresión 3D, electrodos de soldadura, engranajes de transmisión, etc.), la exploración de métodos de pulverización se convierte en una necesidad en el ámbito académico. Por lo tanto, se presenta el diseño de una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio, la cual busca implementarse en docencia e investigación, en universidades e institutos. Esto con la intención de fomentar la búsqueda y experimentación de manera que se analicen y desarrollen diferentes métodos de obtención de partículas como también diversos tipos de metales a pulverizar.

En este trabajo se realizaron estudios mediante matrices AHP para determinar el método de producción de partículas óptimo para los requerimientos y restricciones dadas. Igualmente, se evaluó la viabilidad de producir polvos metálicos para diferentes elementos no ferrosos con puntos de fusión inferiores al hierro.

Como resultado de este estudio, el método de atomización por agua fue elegido y se efectuó un proceso de diseño, en el cual se comenzó con las necesidades de los clientes, la casa de calidad, análisis funcional y diseño en detalle.

El resultado de esta investigación es validado mediante la implementación de una matriz de cumplimiento de requerimientos y un análisis de costos propuesto por Ullman.

Palabras clave: atomización por agua, metales no ferrosos, estaño, diseño mecánico, inertización.

Abstract

Design of a prototype machine to produce metal particles as a proof of concept at laboratory scale

As new applications for the use of metal powders emerge (3D printing, welding electrodes, transmission gears, etc.), the exploration of powder spraying methods becomes a necessity in the academic environment. Therefore, the design of a prototype machine to produce metal particles is presented as a proof of concept at laboratory scale, which seeks to be implemented in teaching and research, in universities and institutes. This is intended to encourage research and experimentation to analyze and develop different methods of obtaining particles as well as different types of metals to be pulverized.

In this paper, studies were carried out using AHP matrices to determine the optimal particle production method for the given requirements and restrictions. Likewise, the feasibility of producing metal powders for different non-ferrous elements with melting points lower than iron was also evaluated.

As a result of this study, the water atomization method was chosen and a design process was carried out, starting with customer needs, quality function deployment, functional analysis and detailed design.

The result of this research is validated through the implementation of a requirements compliance matrix and a cost analysis proposed by Ullman.

Keywords: water atomization, non-ferrous metals, tin, mechanical design, inerting.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Agradecimientos | VI |
| Resumen | VII |
| Lista de figuras | XII |
| Lista de tablas | XVI |
| Introducción | 1 |
| 1. Marco teórico | 3 |
| 1.1 Métodos de pulverización | 3 |
| 1.1.1 Atomización..... | 3 |
| 1.1.2 Reducción química | 5 |
| 1.1.3 Electrólisis | 6 |
| 1.2 Características de las partículas de polvo metálicas | 6 |
| 1.2.1 Tamaño de las partículas y su distribución | 7 |
| 1.2.2 Forma y estructura interna de las partículas | 8 |
| 1.2.3 Área superficial | 9 |
| 1.2.4 Fricción interparticular y características de flujo..... | 9 |
| 1.3 Normativas | 10 |
| 1.4 Materiales que se pulverizan de manera convencional..... | 12 |
| 2. Estado del arte | 13 |
| 2.1 Materiales novedosos | 13 |
| 2.1.1 Uso de materiales reciclados..... | 13 |
| 2.2 Alternativas a métodos convencionales..... | 14 |
| 2.2.1 Diseño y desarrollo de un mecanismo-cepillo en el método de atomización ... | 14 |
| 2.2.2 Método de atomización a baja presión para aluminio | 15 |
| 2.2.3 Método alterno para la producción de aluminuro de hierro | 16 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.4 | Método de atomización ultrasónico con refrigeración..... | 18 |
| 2.2.5 | Esferificación por plasma por radiofrecuencia | 19 |
| 3. | Planteamiento del problema | 21 |
| 4. | Justificación..... | 23 |
| 5. | Objetivos | 25 |
| 5.1 | Objetivo general..... | 25 |
| 5.2 | Objetivos específicos | 25 |
| 6. | Metodología..... | 26 |
| 6.1 | Determinación de requerimientos para la máquina | 26 |
| 6.1.1 | Elección y especificación del espacio | 26 |
| 6.1.2 | Establecimiento de material a pulverizar, método de obtención..... | 27 |
| 6.1.3 | Definición de criterios para la máquina | 28 |
| 6.2 | Elaboración del diseño conceptual..... | 28 |
| 6.2.1 | Casa de la calidad (QFD) | 28 |
| 6.2.2 | Análisis funcional | 30 |
| 6.3 | Diseño en detalle..... | 31 |
| 7. | Restricciones | 32 |
| 8. | Resultados y discusión | 33 |
| 8.1 | Determinación del material y el método de obtención..... | 33 |
| 8.1.1 | Elección y especificación del espacio | 33 |
| 8.1.2 | Selección del metal..... | 34 |
| 8.1.3 | Selección del método de obtención..... | 40 |
| 8.1.4 | Selección criterios para el diseño de la máquina | 43 |
| 8.2 | Elaboración del diseño conceptual..... | 44 |
| 8.2.1 | Casa de la calidad (QFD) | 45 |
| 8.2.2 | Análisis funcional de la máquina | 47 |
| 8.2.3 | Bosquejos conceptuales de la máquina..... | 49 |
| 8.3 | Desarrollo del diseño de detalle..... | 54 |
| 8.3.1 | Fase I – Cámara de fundición | 56 |
| 8.3.2 | Fase II - Cámara de pulverización y recolección | 69 |
| 8.3.3 | Fase III – Suministro de agua..... | 91 |
| 8.3.4 | Fase IV – Control y automatización | 99 |

| | | |
|------------|-----------------------------|------------|
| 8.4 | Diseño de la máquina | 105 |
| 8.4.1 | Análisis estructural | 107 |
| 8.5 | Evaluación del diseño | 110 |
| 8.6 | Conclusiones..... | 116 |
| 9. | Recomendaciones..... | 117 |
| 10. | Bibliografía | 120 |
| 11. | ANEXOS..... | 132 |
| 11.1 | ANEXO 1 | 133 |
| 11.2 | ANEXO 2 | 138 |
| 11.3 | ANEXO 3 | 145 |
| 11.4 | ANEXO 4 | 148 |
| 11.5 | ANEXO 5 | 149 |
| 11.6 | ANEXO 6 | 153 |
| 11.7 | ANEXO 7 | 156 |
| 11.8 | ANEXO 8 | 157 |
| 11.9 | ANEXO 9 | 159 |
| 11.10 | ANEXO 10 | 160 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Métodos de atomización para la obtención de polvos metálicos: a) y b) dos métodos de atomización empleando gas; c) atomización con agua y d) atomización centrífuga por el método de disco giratorio [3]. | 4 |
| Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de electrólisis. | 6 |
| Figura 3. Esquema de una malla de un tamiz[3]. | 8 |
| Figura 4. Formas ideales de partícula de polvos metálicos [3]...... | 8 |
| Figura 5. Partes de la máquina de atomización con cepillo (modificada de [9])...... | 14 |
| Figura 6. Vista general de la máquina: (a) y (b) detalles del tubo de Venturi (modificada de [10])...... | 16 |
| Figura 7. Pasos ilustrativos del nuevo método de obtención de polvos FeAl (modificada de [11])...... | 17 |
| Figura 8. Morfología de los polvos obtenidos: (a) por el método de ultrasonido y (b) por atomización a gas (modificada de [12]). | 19 |
| Figura 9. Métodos para la síntesis directa e indirecta de polvos esféricos (modificada de [13]). | 20 |
| Figura 10. Diagrama del ciclo de vida de manufactura de metales a través de diferentes métodos [1]. | 23 |
| Figura 11. Esquema general de la caja negra..... | 30 |
| Figura 12. Medidas estimadas del espacio para la máquina diseñar. | 34 |
| Figura 13. Árbol de decisiones para la selección del metal a pulverizar..... | 35 |
| Figura 14. Energía calorífica de metales..... | 38 |
| Figura 15. Árbol de decisiones para la selección del método..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 16. Resultados de la encuesta a la comunidad de ingeniería mecánica de la Javeriana Cali. | 44 |
| Figura 17. Caja negra de la máquina..... | 48 |
| Figura 18. Caja transparente para la máquina..... | 48 |
| Figura 19. Bosquejo conceptual #1..... | 50 |
| Figura 20. Bosquejo conceptual #2..... | 51 |
| Figura 21. Bosquejo conceptual #3..... | 52 |
| Figura 22. Bosquejo conceptual #4..... | 53 |
| Figura 23. Esquema de las fases para el diseño en detalle con los cálculos a obtener y sus respectivas relaciones..... | 55 |
| Figura 24. Esquema principal de la máquina a diseñar con Fases I y II y variables principales. Modificado de [34]..... | 56 |
| Figura 25. Horno de la Javeriana de Cali con sistema de vertimiento. | 57 |
| Figura 26. Caída de un chorro de líquido por el grifo [35]. | 58 |
| Figura 27. Componentes de la inestabilidad de Plateau-Rayleigh [36] | 59 |
| Figura 28. Bosquejo esquemático del crisol. | 62 |
| Figura 29. Crisol alúmina comercial [40]..... | 64 |
| Figura 30. Diagrama de dimensiones para el diseño del horno..... | 69 |
| Figura 31. Esquema del método de barrido [48]. | 70 |
| Figura 32. Boquilla de latón cepillado, importada de GrabCAD [50]..... | 71 |
| Figura 33. Pipeta suministro de gas inerte [51] y electroválvula [52]. | 72 |
| Figura 34. Esquema de una boquilla plana en abanico; (a) isométrico, (b) frontal y (c) lateral. Tomado de [34]..... | 73 |
| Figura 35. Flujo de momento total del chorro de agua en función de la presión y de la distancia radial desde la boquilla. Tomado de [34]..... | 76 |
| Figura 36. Relación entre la presión y el tamaño de partícula. Tomado de [34]. | 78 |
| Figura 37. Rangos de tamaño de partícula para usos en la pulvimetalurgia. Tomado de [34] | 79 |
| Figura 38. Diagrama de contorno de la fracción volumétrica del metal líquido y diagrama vectorial de la velocidad del chorro de agua con distintos ángulos de ápex: (a) 15°; (b) 20°; (c) 25°; (d) 35° y (e) 45°. Las regiones resaltadas en rojo están ampliadas del | |

| | |
|--|-----|
| vector de velocidad. Las flechas azules indican los vectores de velocidad del en diferentes casos. Tomado de [54]. | 80 |
| Figura 39. a) Esquema del proceso de atomizado donde se muestran las variables calculadas. b) Esquema lateral de la boquilla y el chorro de agua a presión. | 81 |
| Figura 40. Arreglo de las boquillas. Tomada de [39]. | 82 |
| Figura 41. Flujo de momento efectivo total de una pulverización en función de la presión y del ángulo de rociado. Tomado de [34]. | 83 |
| Figura 42. Boquilla ¼ MEG 15-04. (a) Vista isométrica. (b) Vistas frontal, lateral y superior. Tomada de [55]. | 84 |
| Figura 43. Interacción durante la colisión. a) sin interacción b) interacción sutil c) interacción térmica. Modificado de [57]. | 86 |
| Figura 44. Esquema de la descomposición de la velocidad de la partícula. Modificado de [39]. | 88 |
| Figura 45. Esquema y medidas del subministro de agua. | 92 |
| Figura 46. Esquema de los tramos para el cálculo de perdidas. | 92 |
| Figura 47. Contenedor del agua con sus respectivas medidas [60]. | 93 |
| Figura 48. Esquema del suministro de agua con los puntos de operación y eje coordinado. | 94 |
| Figura 49. Esquema del contenedor con los puntos de operación y ejes coordinados. | 96 |
| Figura 50. Orden lógico de un GRAFCET [79]. | 103 |
| Figura 51. Orden lógico de activaciones o desactivaciones simultáneas [79]. | 103 |
| Figura 52. GRAFCET del proceso de la máquina. | 104 |
| Figura 53. GRAFCET principal. | 105 |
| Figura 54. Diseño de la máquina modelada en SolidWorks. | 106 |
| Figura 55. Vista del capilar, boquillas de agua adentro de la cámara de atomización. | 106 |
| Figura 56. Vista posterior de la máquina. El recuadro en rojo muestra la ventanilla para evacuar el sistema de inertización en la cámara de atomización. | 107 |
| Figura 57. Simulación esfuerzo de Von Mises a estructura de máquina (placa rectangular con chapa de acero al carbono). | 108 |
| Figura 58. Simulación a estructura de máquina (placa rectangular con chapa de acero al carbono) para hallar factor de seguridad. | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 59. Simulación esfuerzo de Von Mises a estructura de máquina (estructura de acero forjado)..... | 109 |
| Figura 60. Simulación a estructura de máquina (estructura de acero forjado) para hallar factor de seguridad..... | 110 |
| Figura 61. Asignación de grados de importancia para criterios y alternativas de matriz AHP de selección del metal..... | 133 |
| Figura 62. Índice aleatorio de AHP de acuerdo con el tamaño de matriz..... | 134 |
| Figura 63. Tablas de ponderación de criterios frente alternativas del método AHP de selección de metal..... | 135 |
| Figura 64. Asignación de grados de importancia para criterios y alternativas de matriz AHP de selección del método de pulverización..... | 136 |
| Figura 65. Tablas de ponderación de criterios frente alternativas del método AHP de selección de método..... | 137 |
| Figura 66. Relaciones entre criterios del cliente y requerimientos de ingeniería en la casa de calidad..... | 145 |
| Figura 67. Techo de la casa de calidad: relaciones entre requerimientos de ingeniería..... | 146 |
| Figura 68. Resultados de la casa de calidad: pesos relativos de los requerimientos de ingeniería..... | 147 |
| Figura 69. Proceso para obtener agua ultrapura tipo I [94]..... | 156 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Normativa general para los procesos de la PM. | 10 |
| Tabla 2. Escala numérica de importancia de la matriz..... | 27 |
| Tabla 3. Ponderación para los requerimientos de diseño. | 29 |
| Tabla 4. Relaciones para los requerimientos de diseño de la matriz..... | 29 |
| Tabla 5. Notación para el propósito de los requerimientos de diseño..... | 30 |
| Tabla 6. Valores característicos de la distribución granulométrica de los polvos metálicos [18]..... | 35 |
| Tabla 7. Disponibilidad de metales en tiendas de Cali..... | 36 |
| Tabla 8. Costo de material dólar por kilogramo. | 38 |
| Tabla 9. Span según la caracterización y fluidez de polvos metálicos [18]..... | 39 |
| Tabla 10. Resultados AHP selección del material. | 40 |
| Tabla 11. Información de los criterios para cada alternativa..... | 41 |
| Tabla 12. AHP de selección del método..... | 43 |
| Tabla 13. Requerimientos de los clientes para QFD..... | 45 |
| Tabla 14. Características que satisfacen los requerimientos de los clientes. | 45 |
| Tabla 15. Peso relativo de las características para el diseño. | 46 |
| Tabla 16. Tabla comparativa para material del crisol [24]. | 63 |
| Tabla 17. Comparación de los materiales utilizados para resistencias térmicas..... | 65 |
| Tabla 18. Ecuaciones empíricas que relacionan d_{50} y P_w [34]..... | 77 |
| Tabla 19. Especificaciones de la boquilla seleccionada [55]..... | 84 |
| Tabla 20. Cálculos de pérdidas por pared y accesorios..... | 97 |
| Tabla 21. Especificaciones de la bomba seleccionada [62]. | 98 |
| Tabla 22. Simbología, y tipo de I/O para desarrollo del GRAFCET. | 100 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 23. Comparación de costos de diferentes PLC que satisfacen I/O. | 101 |
| Tabla 24. Componentes comerciales de las entradas y salidas..... | 101 |
| Tabla 25. Análisis de costos para la producción de la máquina atomizadora de polvos. | 110 |
| Tabla 26. Ponderación de demandas y criterios para la evaluación del diseño. | 113 |
| Tabla 27. Evaluación y justificación del diseño teniendo en cuenta los objetivos de cada criterio. | 113 |
| Tabla 28. Resultados de la ponderación del diseño propuesto. | 115 |
| Tabla 29. Datos iniciales del agua, presión, diámetro de boquilla y caudal. | 149 |
| Tabla 30. Parámetros del chorro de agua. | 150 |
| Tabla 31. Parámetros iniciales del argón..... | 153 |
| Tabla 32. Parámetros iniciales para el tiempo de solidificación. | 154 |
| Tabla 33. Parámetros iniciales para pérdidas por tuberías y accesorios. | 159 |

Introducción

En el ámbito de la metalurgia, la pulvimetalurgia (PM) ha emergido como una técnica de gran relevancia que ha hecho competencia a los métodos tradicionales como la fundición y el forjado, puesto que mitiga de manera significativa las operaciones de manufactura y tratamientos térmicos posteriores [1].

Sin embargo, a pesar de su auge en el mercado, la PM presenta desafíos y limitaciones; en particular, el elevado costo de la producción de los polvos metálicos. Investigaciones han identificado que en un proceso de manufactura aditiva en metales (MAM), el costo del material es responsable del 11% del gasto total [2].

El impacto de estos altos costos se extiende al ámbito académico, donde la falta de asequibilidad de maquinaria para obtención de polvos ha limitado el avance tecnológico e investigativo en el campo de la PM. Este hecho se refleja en la cantidad de investigaciones en repositorios de prestigiosas universidades, como la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad de Sao Paulo, donde los resultados no sobrepasan cinco tesis desde el 2018 hasta la actualidad.

En la metalurgia de polvos, se aprovecha un 97% del material, lo cual impacta positivamente en el ahorro de costo asociado al procesamiento de forma neta en comparación de otros métodos [3]. Adicionalmente, el promover estudios de la PM generaría reconocimiento científico en las instituciones y avances tecnológicos en el sector automotriz, aeroespacial y biomédico. Su aplicabilidad va desde la fabricación de filamentos de lámparas de tungsteno, restauraciones dentales, cojinetes sin aceite, engranajes de transmisión de automóviles, proyectiles perforantes, contactos eléctricos, elementos de combustible de energía nuclear, implantes ortopédicos, piezas de máquinas comerciales, filtros de alta temperatura, pastillas de freno de aviones, baterías recargables y componentes de motores a reacción; hasta pigmentos de pintura, placas de circuitos impresos, harina enriquecida, explosivos, electrodos de soldadura, combustibles para cohetes, tintas de impresión, compuestos de soldadura fuerte y catalizadores [4].

Este proyecto busca ofrecer una solución por medio del diseño de una máquina que obtenga partículas metálicas de bajo punto de fusión para ser usada en el sector educativo. Para esto, en un primer instante, se seleccionó el método de obtención más viable teniendo en cuenta restricciones y criterios tales como costos, producción de partículas, sencillez y tamaño de partícula. Como resultado, se optó por el método de atomización por agua por su versatilidad y sencillez en su construcción. Posteriormente, con base a las necesidades de la comunidad Javeriana de Cali, se elaboró un diseño conceptual empleando métodos como la casa de la calidad, análisis funcional y bosquejos conceptuales; se desarrolló un diseño en detalle en el cual se estudiaron fenómenos físicos que incidieron en el diseño tomando de referencia artículos de vanguardia y conceptos previos de ingeniería mecánica; conceptos como diagramas de Ellingham; fenómeno de goteo; inertización; el comportamiento del chorro de agua a presión; o número de Weber y Froude. Finalmente, para la valoración del diseño, se utilizaron diferentes métodos de evaluación como tablas comparativas entre el diseño versus los requerimientos del cliente. Igualmente, se empleó la teoría de David Ullman sobre The Mechanical Design Process para contrastar la complejidad del diseño y lo que sería necesario para ser ejecutado en temas de economía y manufactura.

1. Marco teórico

Con el fin de comprender cada elemento dentro de este documento, es importante considerar los aspectos presentados a continuación; partiendo de la definición fundamental sobre polvo, el cual se describe como “un sólido dividido en partículas finas” [3], que puede ser obtenido por diferentes métodos de pulverización que deben garantizar unas características geométricas y de calidad específicas según las normativas respectivas y federaciones¹ como la *Metal Powder Industries Federation*. Asimismo, se consideran materiales que se utilizan con frecuencia en transformación de metales a polvos.

1.1 Métodos de pulverización

Existen diversos métodos de pulverización de metales; sin embargo, los tres más comerciales son: (1) atomización, (2) químicos y (3) electrolíticos. Cada uno de estos métodos implica un consumo energético y tamaño de partícula diferentes, lo cual se detalla en las siguientes secciones [3].

1.1.1 Atomización

Este método utiliza “la conversión de un metal fundido en un rocío de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos” [3], es muy conocido por su versatilidad y aplicabilidad para la mayoría de los metales puros y aleaciones. El rocío de metal fundido

¹ Existen federaciones asociadas a la producción de polvos como la “*Metal Powder Industries Federation*”, la cual busca promover esta industria a través de la realización de convenciones, artículos, conferencias, entre otros.

en la atomización puede ser obtenido mediante diversos procesos, como con gas, agua a alta velocidad en lugar de aire o centrífugo, como se observa en la **Figura 1**.

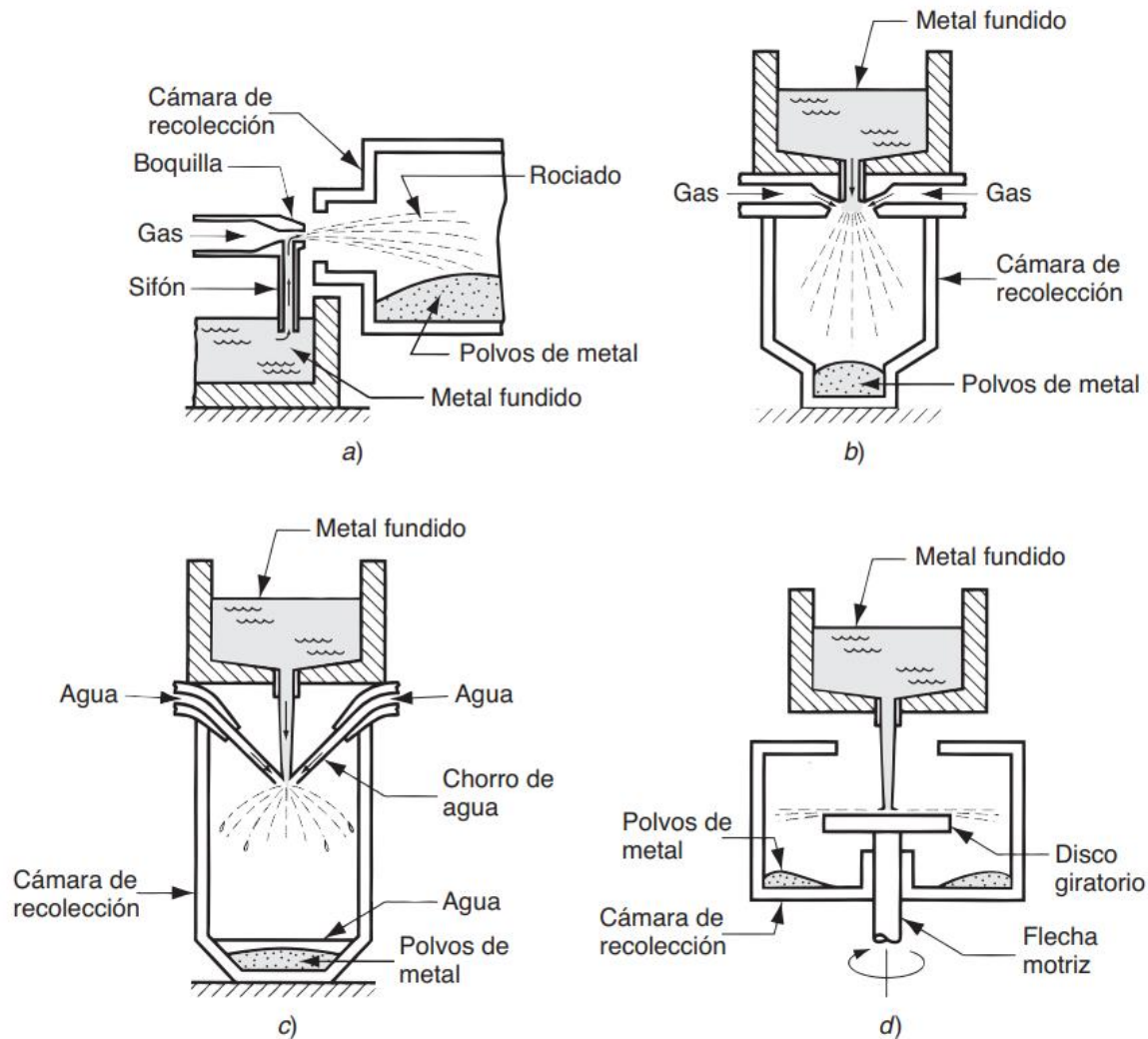


Figura 1. Métodos de atomización para la obtención de polvos metálicos: a) y b) dos métodos de atomización empleando gas; c) atomización con agua y d) atomización centrífuga por el método de disco giratorio [3].

El metal líquido se atomiza a través de una corriente de gas, la cual puede ser aire o gas inerte, a alta velocidad. Usando una boquilla de expansión, a través de la cual fluye el gas, se succiona el metal líquido ubicado en la parte inferior, donde posteriormente es irrigado en un contenedor donde se depositan las gotas convertidas en sólido, formando el polvo metálico (ver **Figura 1-a**). Una variación de esta técnica se presenta en la **Figura**

1-b, en la cual el metal en estado líquido cae por gravedad a través de una boquilla, atomizándose por chorros de aire.

Otro método utilizado en la atomización se muestra en la **Figura 1-c**. Éste, a pesar de ser semejante al de la **Figura 1-b**, se diferencia en que se implementa una corriente de agua en vez de aire. Asimismo, la atomización con agua es adecuada para metales con puntos de fusión debajo de 1600 °C (2900 °F), obteniendo geometrías más irregulares que con otros procesos. Sin embargo, el obstáculo que se presenta al utilizar agua recae en la oxidación de la superficie de las partículas. No obstante, esto podría corregirse con el uso de otro fluido como el aceite sintético.

Respecto a la atomización observada en la **Figura 1-d**, se aprecia un método por centrifugado en el cual, mediante un disco que gira, el metal líquido se rocía en múltiples direcciones permitiendo que sea pulverizado.

Por último, cabe resaltar que, en cualquier proceso de atomizado con aire o agua, "el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula varía en relación inversa con la velocidad" [3].

1.1.2 Reducción química

Este proceso consiste en una "serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales" [3], y suele ser utilizado para la obtención de polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Durante la reducción ocurre la liberación de los metales de sus óxidos empleando hidrógeno o monóxido de carbono como agentes reductores, los cuales, al combinarse con el oxígeno del compuesto, libera el metal.

Igualmente, existen otros procesos químicos que permiten la obtención de polvos esféricos. Por un lado, se encuentra la descomposición térmica de distintas sustancias como el pentacarbonilo de hierro, el cual permite obtener partículas de alta pureza. Asimismo, se tiene la precipitación de una solución (metales y sus sales disueltas en agua), en la cual se emplea la lixiviación de un mineral y, posteriormente, la precipitación de un metal de esta solución generando partículas de cobre, níquel y cobalto [1].

1.1.3 Electrólisis

Se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio [3]. Esto puede ser evidenciado en la **Figura 2**.

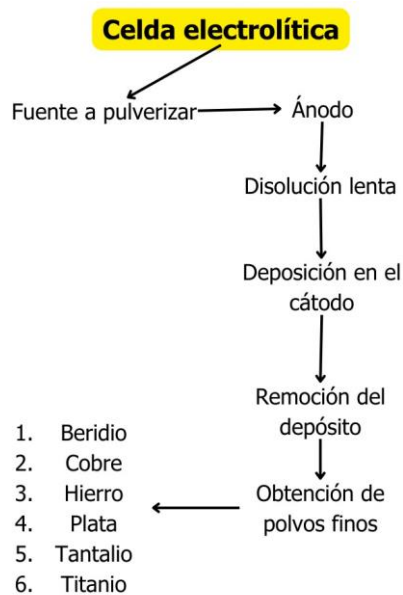


Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de electrólisis.

1.2 Características de las partículas de polvo metálicas

Se pueden considerar diferentes formas de caracterizar y categorizar los polvos individuales, basados en los siguientes atributos: (1) tamaño de la partícula (distribución), (2) forma y estructura interna de las partículas (presencia de poros abiertos o cerrados) y (3) área superficial.

Es valioso mencionar que existen otra gran variedad de caracterización de partículas metálicas como el factor de empaquetamiento (densidad volumétrica sobre densidad real) y la composición química de películas superficiales, que no serán tenidas en cuenta en este trabajo [3].

1.2.1 Tamaño de las partículas y su distribución

El tamaño de las partículas contempla las dimensiones individuales del polvo. Este tamaño varía entre 25 y 300 μm (0,001 y 0,012 in) y suele ser determinado por el método de tamizado, el cual trabaja mediante una malla con un número de abertura específico por pulgada lineal ². Este método de caracterización del tamaño de partícula permite obtener la dispersión al hacer pasar el polvo metálico por mallas de diferente número [3]. La clasificación del tamaño basada en las mallas consistiría en mostrar que un polvo es 230 a 200, indicando que estos fueron testeados pasando por la malla 200 pero no por la 230. Ahora bien, con este proceso de clasificación se tiene la **Ecuación 1** [3].

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

$PS =$ tamaño de partícula, [pulg];

$MC =$ número de malla, [aberturas / pulg lineal];

$t_w =$ grueso del alambre de la malla, [pulg].

A continuación, se muestra un diagrama de la malla de un tamiz para cernir tamaño de partícula (ver **Figura 3**) junto a una explicación de cómo funciona la **Ecuación 1**.

² es decir, un número de malla 100 significa que hay 100 aberturas por pulgada lineal y al ser esta una malla cuadrada, se consideraría un total de número de aperturas de pulgada al cuadrado es $100^2 = 10\ 000$.

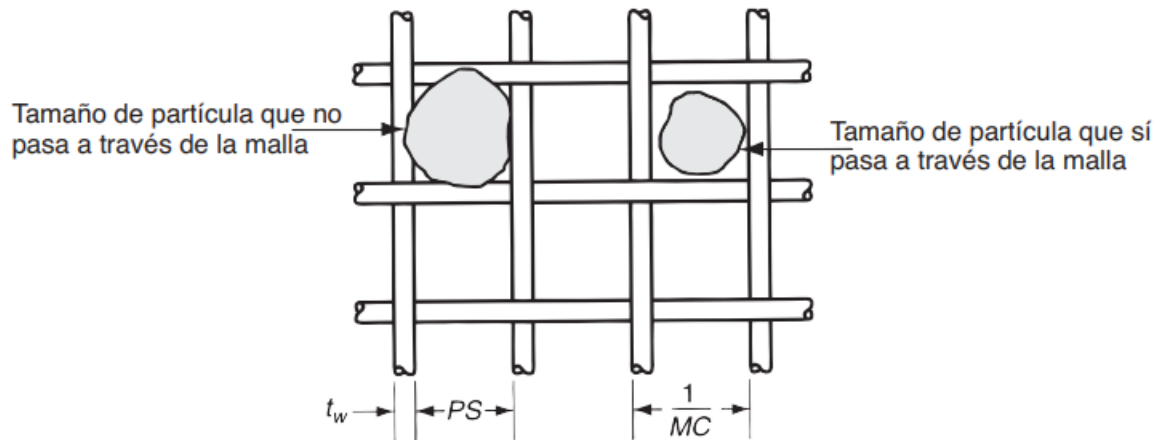


Figura 3. Esquema de una malla de un tamiz[3].

Otro método para determinar el tamaño de partícula con los polvos metálicos es por microscopia y granulometría láser. Estos métodos deben ser aplicados cuando se supera el $MC = 400$ ($13 \mu\text{m}$) en el método de tamizado dado que, a partir de este, se dificulta hacer mallas tan finas y se aglomeran los polvos [3].

1.2.2 Forma y estructura interna de las partículas

La forma de partícula puede clasificarse en ocho tipos principales como se muestra en la **Figura 4**.

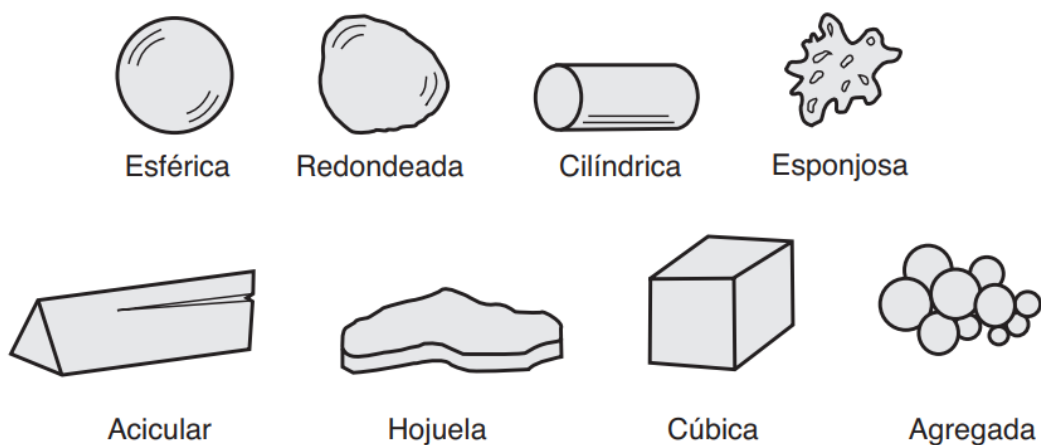


Figura 4. Formas ideales de partícula de polvos metálicos [3].

1.2.3 Área superficial

Evaluando las dimensiones de una partícula, se establece una razón de área a volumen dada por la **Ecuación 2**. En caso de tratarse de una esfera, $K_S = 6$; mientras que para formas diferentes $K_S > 6$.

$$\frac{A}{V} = \frac{K_S}{D} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$K_S =$ factor de forma;

$D =$

diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula no esférica, [in];

$A =$ área superficial [in^2];

$V =$ volumen [in^3].

De lo anterior, se puede inferir que el área superficial será mayor si existe un menor tamaño de partícula o si se presentan factores K_S más altos. Igualmente, el tamaño más pequeño del polvo conduciría a una aglomeración de las partículas, generando una desventaja para la alimentación automática de los polvos. No obstante, usar tamaños más pequeños de partículas permite una "contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la PM" [3].

1.2.4 Fricción interparticular y características de flujo

La fricción entre partículas afecta la facilidad de flujo durante la compactación del polvo. El ángulo de reposo (ángulo resultante al vaciar el polvo a través de un embudo) se usa para medir la fricción interparticular, siendo ángulos más grandes muestras de una mayor fricción (respecto a la horizontal) [3].

Por su geometría, las formas esféricas experimentan menos fricción. Durante el llenado del troquel y el prensado, un flujo constante de polvo es esencial y la resistencia al flujo puede causar variaciones de densidad no deseadas. Se mide el flujo basándose en el tiempo necesario para que el polvo fluya a través de un embudo estándar; tiempos más cortos indican una circulación más fluida. Para reducir la fricción y mejorar el flujo, a menudo se agregan lubricantes en pequeñas cantidades a los polvos [3].

1.3 Normativas

La pulvimetalurgia y todos los procedimientos de control de calidad, producción y aplicación de los polvos metálicos poseen una normativa. Algunas de ellas se encuentran expuestas en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Normativa general para los procesos de la PM.

| Norma | Descripción | Relevancia para el proyecto | Última actualización |
|------------------|---|--|----------------------|
| ASTM B215-20 [5] | Prácticas estándar para el muestreo de polvos metálicos | Aporta prácticas que cubren métodos de muestreo que permiten la recolección de muestras representativas de los polvos metálicos obtenidos para detallar los procedimientos que se recomiendan y para determinar propiedades físicas y mecánicas. | 2020 |
| ASTM B925-15 [6] | Prácticas normalizadas para la producción y preparación de probetas de ensayo | Permite conocer las especificaciones para las probetas de ensayo uniaxialmente compactadas para la PM en las ASTM. | 2022 |

| Norma | Descripción | Relevancia para el proyecto | Última actualización |
|--------------------|--|---|----------------------|
| | de pulvimetalurgia (PM) | Igualmente, el cómo producirlas y prepararlas. Sin embargo, no es aplicable a procesos de prensado isostático en frío (CIP), prensado isostático en caliente (HIP) forja en polvo (PF) o moldeo por inyección de metal (MIM). | |
| ASTM F3049-14 [7] | Guía normalizada para la caracterización de las propiedades de los polvos metálicos utilizados en los procesos de fabricación aditiva. | Contiene las técnicas de caracterización de polvos metálicos para procesos de fabricación aditiva, como el la deposición de energía dirigida y la fusión de lechos de polvo. | 2021 |
| ISO/ASTM 52907 [8] | Fabricación aditiva - Materias primas - Métodos de caracterización de polvos metálicos. | Proporciona especificaciones técnicas para la PM en la fabricación aditiva como muestreo, distribución granulométrica, composición química, densidades características, morfología, entre otros. | 2019 |

Igualmente, la pulvimetalurgia hace parte de La Federación de Industrias del Polvo Metálica (MPIF). Ésta publica normas para proporcionar al ingeniero de diseño y materiales la información necesaria para especificar los materiales pulvimetalúrgicos desarrollados por

los fabricantes de piezas, polvo y equipos de PM y moldeo por inyección de metales. Dicha federación se enfoca en tres criterios simples: (1) especificaciones de materiales para componentes, (2) métodos de ensayo (para polvos y componentes) y (3) normas de seguridad para prensas pulvimetalúrgicas (desarrolladas en colaboración con el Instituto Nacional Americano de Normalización).

1.4 Materiales que se pulverizan de manera convencional

Los materiales que comúnmente se emplean en la producción de polvos metálicos son el acero, el aluminio (punto de fusión: 660,3 °C) y las aleaciones de hierro. No obstante, para usos menos cotidianos, se utiliza cobre, níquel y metales refractarios como el molibdeno y el tungsteno (con punto de fusión respectivos de: 1085 °C, 1455 °C, 2623 °C y 3422 °C) [3]. Por otro lado, al ser la metalurgia de polvos más costosa, dada la energía adicional requerida para reducir el metal a polvo, debe disponer un catálogo de amplios materiales para poder entrar en competencia frente a otros procesos convencionales [3].

2. Estado del arte

Con la intención de abstraer más información acerca de los elementos relevantes en el proceso de transformación de metales a polvos, se presentan a continuación investigaciones y hallazgos modernos e innovadores que se han realizado en los últimos años en el área como la implementación de nuevos métodos de síntesis y el uso de materiales alternos.

2.1 Materiales novedosos

2.1.1 Uso de materiales reciclados

La problemática principal de la comercialización de la impresión 3D de metales es el alto costo de los polvos metálicos, ya que este constituye el 11% del costo de manufactura. El estudio de S. Cacaoe *et al.* [2] se basó en la viabilidad del reciclaje de los metales para la fabricación de polvos. Para ello, se utilizaron tres tipos de materiales: un acero 316L estándar y dos aceros 316L formados a base de viruta con adiciones de silicio y aluminio. Se fabricaron los polvos en una máquina de atomización por gas inducido para, posteriormente, hacer dos piezas en una impresora 3D de fundición a laser (SLM) y de deposición metálica (LMD).

Se determinó que las adiciones de silicio y aluminio no afectaron la procesabilidad del acero, además de que no variaron de manera significativa las propiedades mecánicas; sin embargo, la investigación sugiere que en un futuro estudio se indague a profundidad este tema, dado que se omitieron pruebas mecánicas importantes como las de fatiga. El estudio concluye que es óptimo utilizar material reciclado para la fabricación de polvos, los cuales afectan positivamente en el impacto ambiental de la manufactura aditiva (AM) [2].

2.2 Alternativas a métodos convencionales

2.2.1 Diseño y desarrollo de un mecanismo-cepillo en el método de atomización

Como se planteó en el marco teórico, en la industria de la PM el método más utilizado es el de atomización. Sin embargo, por su alto costo y consumo de energía, es considerado un procedimiento poco rentable. Por consiguiente, en este trabajo diseñaron un mecanismo-cepillo que se incluye dentro del método de atomización para permitir la formación de polvos de una manera simple y asequible.

La máquina está dividida en tres partes fundamentales: (1) el marco, que funciona como estructura del sistema; (2) el horno eléctrico, que permite la fundición del material; y (3) la cámara de atomización, la cual integra un cepillo de alambre redondo (véase **Figura 5**). El funcionamiento del dispositivo comienza con la caída del metal fundido a la cámara de atomización, ahí el metal se adhiere al cepillo, el cual empieza a girar gracias a un motor y choca con un bloque metálico. Cuando se sacuden las cerdas, se producen salpicaduras de masa fundida que se enfrían en el aire; estas salpicaduras son los polvos metálicos los cuales son recolectados en una bandeja de acero de 550 mm x 148 mm x 80 mm [9].

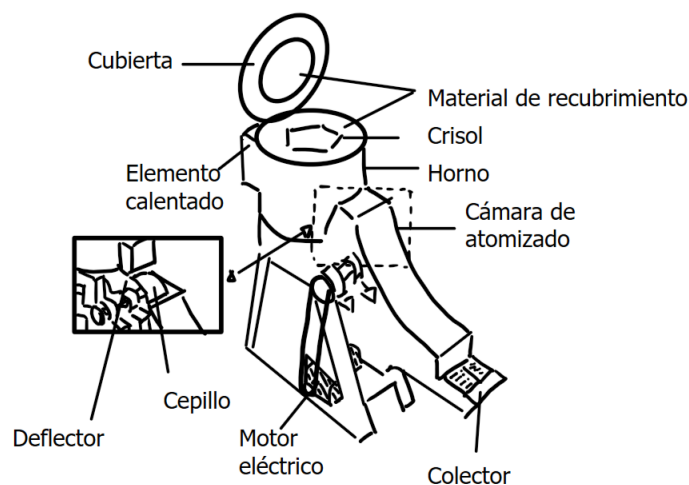


Figura 5. Partes de la máquina de atomización con cepillo (modificada de [9]).

Se demostró que este diseño no presenta homogeneidad en los polvos metálicos, lo que resulta en una disminución de la procesabilidad de los polvos. Además, no existe una diferencia significativa en el tamaño del polvo comparándolo con el método de atomización y atomización centrífuga (200 micras). Se concluyó que las partículas presentan menores tamaños si se disminuye el diámetro de las cerdas del cepillo y si se aumenta la velocidad angular [9].

2.2.2 Método de atomización a baja presión para aluminio

El método de atomización suele utilizar gases (tales como el argón, helio o nitrógeno) para generar una atmósfera inerte; gases que están en un rango de presiones entre 14 y 42 bar. Las elevadas presiones de funcionamiento generan bastantes limitantes a este método de obtención de polvos. Por consiguiente, en el estudio se diseña una boquilla de Venturi (véase **Figura 6-b**) que por medio de la ley de Bernoulli disminuye la presión en la máquina. Además, plantean la utilización de un gas como el dióxido de carbono, que se pretende capturar y reusar, con la finalidad de disminuir la huella del carbono en la industria.

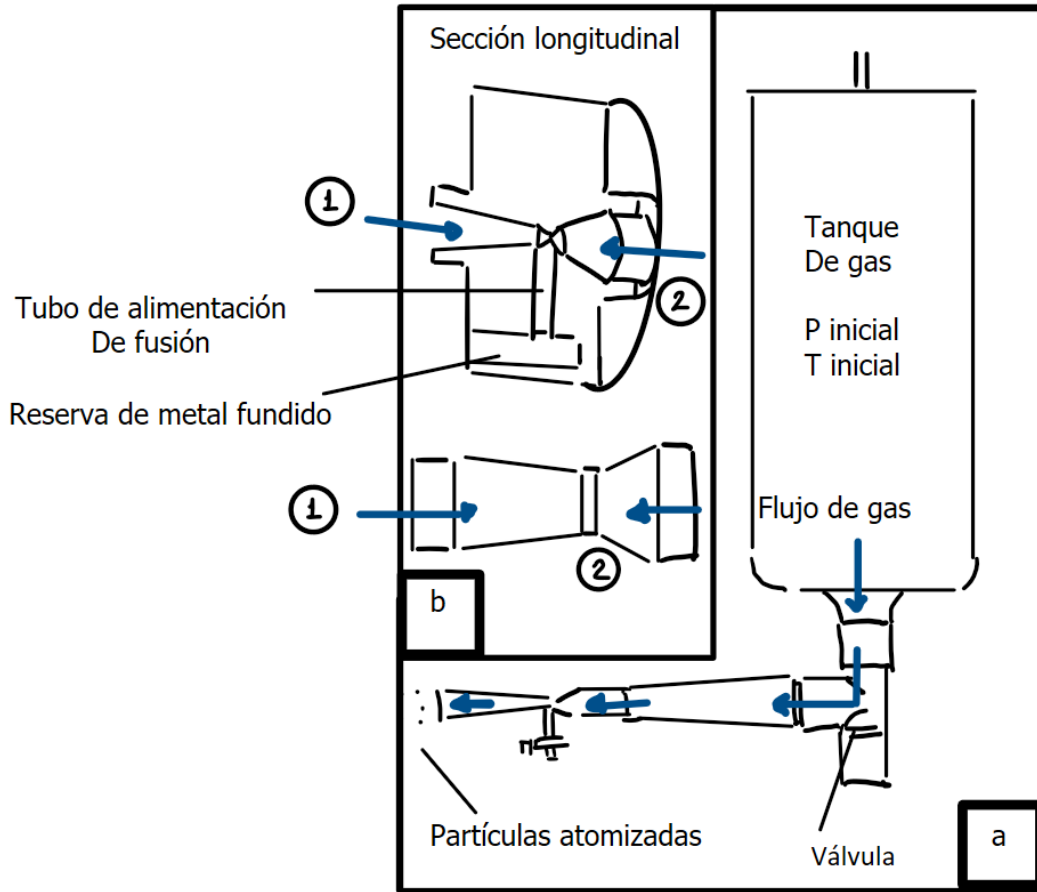


Figura 6. Vista general de la máquina: (a) y (b) detalles del tubo de Venturi (modificada de [10]).

Los investigadores lograron obtener polvos de aluminio a una presión 0,5 bar (diez veces más baja que el método de atomización convencional) y se determinó que el dióxido de carbono funciona como gas inerte puesto que no genera impurezas en la superficie de los polvos. Adicionalmente, se evidenció una densidad de empaquetamiento mayor al 80%. Todos estos factores permiten una aplicabilidad en el sector industrial [10].

2.2.3 Método alternativo para la producción de aluminuro de hierro

El aluminuro de hierro (FeAl) es un material utilizado en el mercado por sus propiedades de oxidación a altas temperaturas, su resistencia a la corrosión, su baja densidad y bajo

costo. Tiene aplicaciones en sistemas de filtración y gasificación; en la producción de discos de freno para molinos de viento y camiones, y sistemas de escape en combustibles automotrices. No obstante, su baja ductilidad a temperatura ambiente ha sido una limitante y objeto de estudio.

La producción convencional de polvos de FeAl es a través de aleación mecánica que consiste en la soldadura, fractura y re-soldadura de una mezcla de partículas de polvo, la cual utiliza un molino de bolas de alta energía para su realización. Este proceso es considerado ineficiente, ruidoso y riesgoso en su funcionamiento. Como consecuencia, en este trabajo se desarrolla una alternativa que utiliza vapor de agua como molienda para producir polvos. El método consiste en producir FeAl por medio de una rápida solidificación (fusión hilatura), las cuales utilizan virutas de aluminio y hierro. Finalmente, se utiliza el vapor de agua para desintegrar las tiras de FeAl y transformarlas en polvos (véase **Figura 7**).

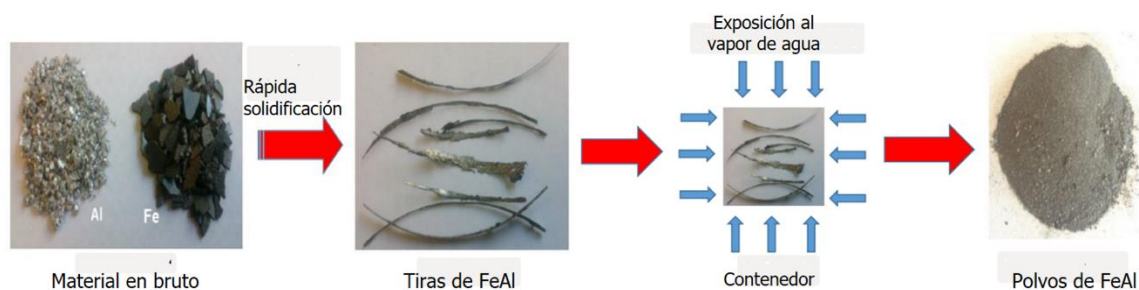


Figura 7. Pasos ilustrativos del nuevo método de obtención de polvos FeAl (modificada de [11]).

Este nuevo proceso tiene como ventaja la ausencia de emisión de partículas al medio ambiente. Esto es un tema para considerar puesto que dichas partículas, con alto carácter pirogénico, generan riesgos para la salud. Asimismo, este método no produce contaminación, ya que cuando el vapor de agua se descompone en hidrógeno y oxígeno, una parte se libera de la reacción y se difunde en el material; mientras que el oxígeno forma alúmina. Además, se demostró una disminución de costos del 99% para procesos de manufactura a comparación del método de aleación mecánica [11].

2.2.4 Método de atomización ultrasónica con refrigeración

Un método de producción de polvos utilizado recientemente en la industria ha sido la atomización ultrasónica, dicho método emplea las vibraciones acústicas para romper las fuerzas internas del metal fundido. No obstante, una de las limitantes es el desplazamiento de las partículas vibratorias calentadas. Para ello se propone una solución a partir de refrigeración, para mantener un flujo térmico constante. Se investigó la viabilidad de este método evaluando las formas y distribuciones de polvos utilizando tres tipos de materiales: comerciales (titanio, aleaciones de oro, acero 304), materiales metálicos a granel y aleaciones de alta entropía (materiales con más de cuatro componentes). Se parametrizó el ultrasonido con una frecuencia de 20 KHz, además de usar gas argón para volver inerte la atmosfera en el contenedor.

Se concluyó que este diseño permite la producción de cualquier polvo, independientemente de su punto de fusión; algo que no se había logrado, puesto que el método del ultrasonido solo funcionaba para materiales como aluminio, estaño y plomo. Sin embargo, los autores recomiendan este método solo para trabajo experimental porque la máquina produce pequeñas cantidades de polvo. Asimismo, se identificó una relación entre la distribución de tamaño de las partículas y las aleaciones de los metales.

Adicionalmente, se comparó con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) la morfología de los polvos obtenidos de un método de atomización convencional y el nuevo método. Se observó que los polvos del método ultrasónico tenían un tamaño de distribución de partículas uniformes; mientras que el convencional tenían formas amorfas, pero más finas (véase **Figura 8**) [12].

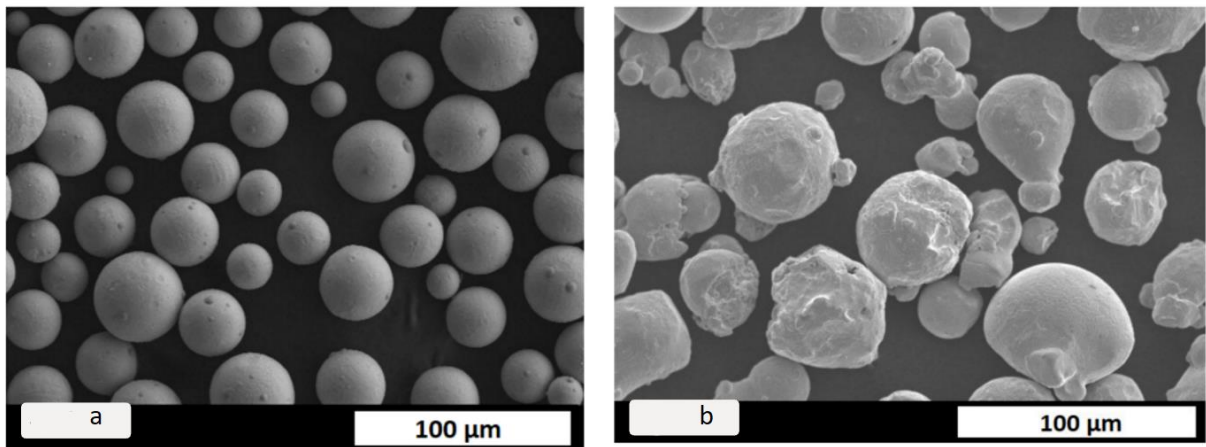


Figura 8. Morfología de los polvos obtenidos: (a) por el método de ultrasonido y (b) por atomización a gas (modificada de [12]).

2.2.5 Esferificación por plasma por radiofrecuencia

La morfología de la partícula afecta tanto la fluidez del proceso de producción de polvos como las propiedades mecánicas del material, es por esto por lo que es un parámetro importante para considerar. Por consiguiente, la tendencia del mercado es crear partículas esféricas, ya que proveen buena fluidez, lo cual las hace favorables para aplicaciones de AM. Como se puede ver en la **Figura 9**, hay dos formas de obtener partículas esféricas: la directa se refiere a la formación de polvos esféricos a partir de los métodos convencionales de producción de polvos, mientras que la síntesis indirecta es un proceso adicional el cual convierte cualquier forma de polvo en uno de morfología esférica. Este último es altamente demandado en el sector industrial de obtención de polvos porque evita a la empresa cambiar toda su configuración de procesado para tener polvos esféricos; proporcionando una extensión a lo ya comprado. Asimismo, la síntesis indirecta ofrece una mayor fluidez, uniformidad y distribución de tamaño a comparación de la síntesis directa; lo cual resulta en una alta calidad de polvo. Uno de los más usados ha sido la esferificación por plasma por radiofrecuencia (RF), el cual consiste en una densificación de polvos a partir de la fusión ocasionada por las altas temperaturas del plasma. Este método ofrece flexibilidad en el uso de gases de plasma, baja potencia de operación y volúmenes de plasma más grandes [13].

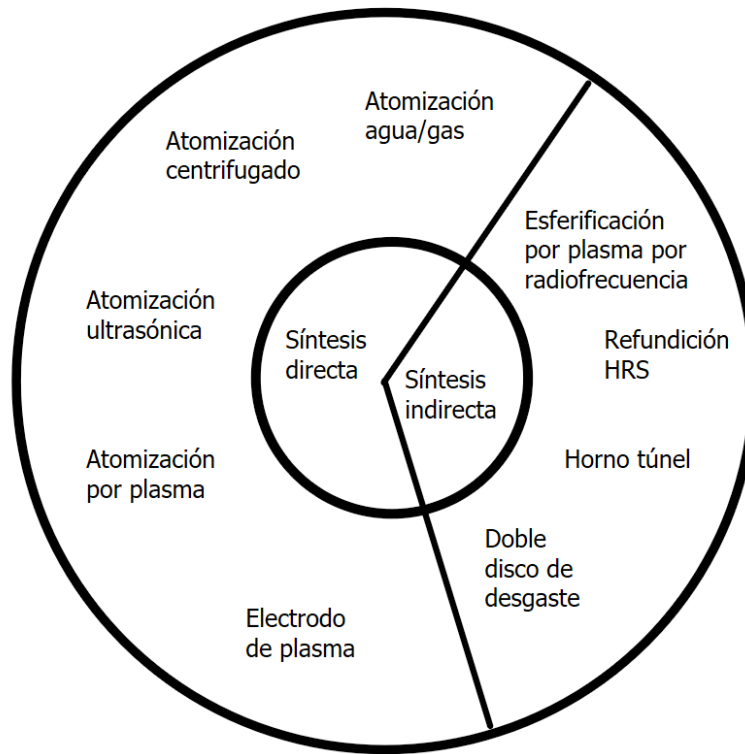


Figura 9. Métodos para la síntesis directa e indirecta de polvos esféricos (modificada de [13]).

3. Planteamiento del problema

En el ámbito de la metalurgia, una técnica que ha ganado relevancia frente a los procedimientos convencionales (como lo son el forjado y la fundición) es la PM. Este proceso consiste en la fabricación y la compactación de polvos metálicos a partir del uso del calor o la presión, de manera que se generen piezas con geometrías complejas a la medida y en serie. El procedimiento de la PM reduce operaciones de manufactura y tratamientos térmicos a posteriori, debido a que se pueden mezclar materia prima y/o agregar aditivos, permitiendo un mejoramiento de las propiedades del material durante la sinterización de los polvos [1].

El procesamiento de la PM tiene aplicación importante en la industria automotriz y biomédica, pero a su vez ha posibilitado el desarrollo de tecnologías emergentes como lo son la manufactura aditiva en metales (MAM). De acuerdo con lo anterior, en el 2020 se determinó que el 80% del mercado de la MAM utiliza procesos que requieren de polvos metálicos para su funcionamiento; entre los cuales se encontró: cama de polvos; deposición directa de energía y extrusión de metales [1]. Estas recientes aplicaciones de la PM coinciden con el aumento de la tasa de crecimiento anual compuesto, los cuales muestran valores mayores al 4% para el 2022 [14]. Por consiguiente, la manufactura aditiva (AM) es una técnica valiosa para el mercado actual de la PM. Sin embargo, la PM presenta algunas limitaciones y desafíos en la actualidad.

En primera instancia, la producción de la metalurgia de polvos suele implicar un elevado costo. Según estudios, se determinó que los gastos económicos en procesos de MAM se dividen en cuatro componentes: (1) tasa de construcción, (2) tasa de uso, (3) costos de polvos e (4) inversión de maquinaria; entre los cuales el 11% provienen del costo de material [2]. Esto ha generado una limitante en la implementación de la AM, ya que por su precio es difícil incluirlas en sectores de la industria. Un ejemplo de esto es una

investigación realizada en 2023, en el que se comparan los costos entre la MAM (a través de un método denominado extrusión de metal, el cual utiliza polvos como materia prima) y el Torno de Control Numérico (CNC). Se concluyó que la MAM solamente es rentable si se optimizan parámetros y se tienen en máxima capacidad de operación; aspectos que se puede mitigar si los costos de producción de polvos disminuyen [15].

Como consecuencia del elevado costo de los polvos, se han limitado los avances tecnológicos e investigativos en el sector académico latinoamericano (algo que se puede comprobar por medio de los resultados de investigación en repositorios tales como en la Universidad de los Andes, La Universidad Nacional Autónoma de México o la Universidad de Sao Paulo, donde los resultados no sobrepasan cinco investigaciones de tesis en un periodo de tiempo de cinco años); dado que las maquinarias para la obtención de polvos tienden a ser de carácter industrial con altos precios. Un ejemplo es la empresa Tekna, la cual comercializa una máquina de atomización por plasma a un costo aproximado de 630000 USD [16].

Con base a lo anterior, surge la pregunta de análisis: ¿Cómo diseñar una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio?

4. Justificación

A pesar de que los metales constituyen uno de los materiales más utilizados en la industria ingenieril, presentan grandes restricciones al momento de su manejo y manipulación, tales como su alto punto de fusión, que implican un alto consumo de energía a la hora del tratamiento y fabricación de piezas. No obstante, a diferencia de otros métodos de fabricación de metales, en la PM se optimiza la cantidad de energía térmica (ver **Figura 10**), lo que permite aumentar los beneficios económicos a la empresa en comparación con otros procesos de manufactura [10].

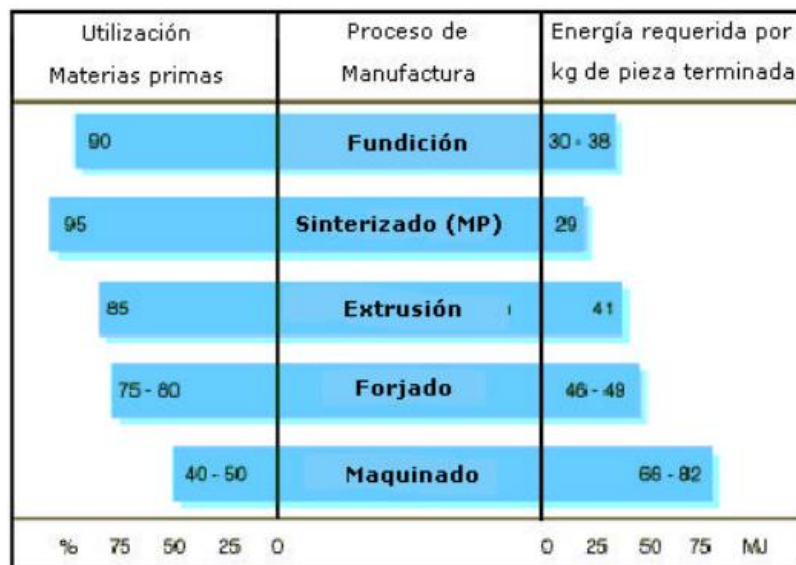


Figura 10. Diagrama del ciclo de vida de manufactura de metales a través de diferentes métodos [1].

La metalurgia de polvos también se convierte en una importante ventaja económica en temas de aprovechamiento de material, es decir, se le atribuye en gran medida al ahorro de costos asociado al procesamiento de forma neta en comparación con otros métodos.

Desde 1996, según Mikell P. Groover, los procesos de la PM implicaban muy poco desperdicio de material: cerca de 97% de los polvos iniciales se convierten en producto. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición, en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas son material de desperdicio en cada ciclo de producción [3].

Por otro lado, investigar acerca de la PM se justifica bajo el conocimiento de que, debido a la naturaleza del material inicial, se pueden hacer piezas con un nivel específico de porosidad. Esta característica es útil para la producción de piezas de metal poroso, como rodamientos y engranes impregnados con aceite, así como filtros. Asimismo, la PM alcanza una excelente tolerancia rutinaria de $\pm 0,13$ mm ($\pm 0,005$ in) [3].

En conclusión, se podría considerar que hay cuatro motivos que refuerzan el estudio de la obtención de polvos metálicos, estos son: (1) globalizar la accesibilidad a conocimiento y práctica al sector académico, (2) economizar costos a través de la materia prima y la energía térmica, (3) versatilidad de uso y (4) la susceptibilidad de que los polvos sean empleados en la AM.

5. Objetivos

5.1 Objetivo general

Diseñar una máquina prototipo para la producción de partículas metálicas como prueba de concepto a escala de laboratorio que permita convertir metales de bajos puntos de fusión a polvos metálicos.

5.2 Objetivos específicos

1. Determinar los requerimientos que debe cumplir el diseño de la máquina de tal forma que convierta metal fundido en polvos metálicos.
2. Elaborar el diseño conceptual priorizando la investigación en el sector educativo.
3. Desarrollar el diseño de detalle teniendo en cuenta las necesidades del cliente.
4. Evaluar el diseño mediante el cumplimiento de los requerimientos.

6. Metodología

Referente a los objetivos planteados anteriormente, se realizaron las siguientes actividades para el desarrollo del proyecto.

6.1 Determinación de requerimientos para la máquina

En esta sección se expone las actividades preliminares del diseño en las que se incluye la elección del espacio; la asignación de materiales y el método de obtención, esto mediante la búsqueda literaria en libros y artículos científicos. Asimismo, se investigó lo que se encuentra comercialmente, como patentes o empresas productoras de máquinas de atomización de polvos metálicos. Posteriormente, se realizaron matrices de selección para la elección del metal a pulverizar y el método por el cual hacerlo. Finalmente, se llevó a cabo una encuesta para considerar la relevancia de parámetros de diseño de la máquina según el criterio de la comunidad de ingeniería mecánica en la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

6.1.1 Elección y especificación del espacio

La máquina fue pensada para implementarse en un laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Por lo tanto, se consultó con la facultad de ingeniería y ciencias qué lugar es el más apropiado para el proyecto y que tenga en su disposición los recursos necesarios tales como electricidad, espacio y fuente de ventilación.

6.1.2 Establecimiento de material a pulverizar, método de obtención

Para delimitar el metal que procesará la máquina pulverizadora, se realizaron dos actividades (1) una búsqueda en bases de datos como ScienceDirect con la finalidad de conocer los materiales comúnmente usados y los parámetros que inciden en la composición de un polvo, y (2) el uso de una matriz de Proceso Jerárquico Analítico (*Analytical Hierarchy Process* - AHP). Asimismo, para seleccionar el método de obtención más adecuado se tuvieron en cuenta tanto métodos de atomización convencionales, como métodos vistos en el estado del arte; posterior a esto, se eligieron criterios para realizar otra AHP, relacionada al material a pulverizar.

El método AHP permite la toma de decisiones desde una aproximación matemática al implementar una escala numérica sin dejarse influenciar por ideas, emociones y sentimientos que suelen afectar en el proceso de decisión. Esta metodología utiliza la evaluación de criterios y alternativas mediante una escala de 1 a 9, siendo 1 una comparación de igual importancia y el 9 una importancia extrema (ver **Tabla 2**). En el proceso de este método, se realiza una matriz en la cual se compara criterios con criterios; de igual forma, se emplean varias matrices contrastando criterios con cada alternativa. Cabe destacar que todas las matrices deben ser cuadradas y cumplen con tres fundamentos matemáticos: la reciprocidad, la homogeneidad y la consistencia.

Tabla 2. Escala numérica de importancia de la matriz.

| ESCALA NUMÉRICA | ESCALA VERBAL | EXPLICACIÓN |
|-----------------|--|---|
| 1 | Igual importancia | Los dos elementos contribuyen igualmente al criterio |
| 3 | Moderadamente más importante un elemento que el otro | El juicio y la experiencia previa favorece a un elemento frente al otro |
| 5 | Fuertemente más importante un elemento que el otro | El juicio y la experiencia previa favorece fuertemente a un elemento frente al otro |
| 7 | Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro | Un elemento domina fuertemente y su dominio está probada en la practica |
| 9 | Importancia extrema de un elemento frente al otro | Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermedios o de compromiso | Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes |

6.1.3 Definición de criterios para la máquina

Dado que la máquina está destinada a instalaciones de laboratorio, se consultó de manera arbitraria a varios profesores sobre las características que consideraban importantes para el proyecto. Con la información recolectada, se definieron criterios cuyos porcentajes de importancia se determinaron a través de una encuesta dirigida a la comunidad académica de ingeniería mecánica de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

6.2 Elaboración del diseño conceptual




En este apartado se consideraron los requerimientos obtenidos para la máquina planteados en la sección **6.1** y se emplearon métodos tales como la casa de la calidad (QFD) para transformar las prioridades de los clientes en términos de ingeniería; elaboraciones de análisis funcional de la máquina a diseñar y bosquejos conceptuales que permitieron ajustar el diseño al resultado final.

6.2.1 Casa de la calidad (QFD)

La casa de la calidad es una matriz que permite la transcripción de los requerimientos de los clientes en términos de ingeniería, a su vez que jerarquiza cada criterio seleccionado, con la finalidad de que el diseño cumpla con lo que pide el cliente.





La matriz se compone por: los criterios de los clientes (filas) y los requerimientos de ingeniería que satisfacen los criterios (columnas). En ella se utiliza la notación mostrada en la **Tabla 3** que pondera la relación entre cada fila y columna con una calificación de 9 a 1. Esto se hace con el propósito de obtener una valoración que refleje las características prioritarias para el diseño, así como los factores menos determinantes para su elaboración.

Tabla 3. Ponderación para los requerimientos de diseño.

| Simbología | Ponderación de relación del diseño (9 a 1) |
|---|---|
|  | Fuerte relación (9) |
|  | Media relación (3) |
|  | No hay relación (1) |

En la parte superior de la matriz (techo de la casa) se encuentran las correlaciones entre cada requerimiento de ingeniería, las cuales están delimitadas en la notación mostrada en la **Tabla 4**. Esto ayuda a identificar si algún requerimiento se interpone en el desarrollo de otro y mitiga futuros errores en el diseño.

Tabla 4. Relaciones para los requerimientos de diseño de la matriz.

| Simbología | Relación de los requerimientos de diseño |
|---|---|
|  | Fuerte correlación positiva |
|  | Correlación positiva |
|  | Correlación negativa |
|  | Fuerte correlación negativa |

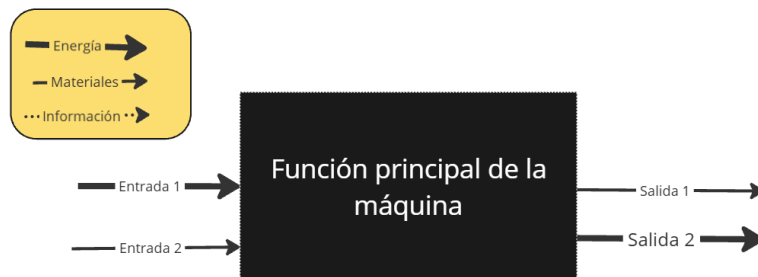
Finalmente, se utiliza la notación de la **Tabla 5** para identificar el propósito de los requerimientos del diseño.

Tabla 5. Notación para el propósito de los requerimientos de diseño.

| Simbología | Propósito |
|------------|--------------------------------------|
| X | El propósito es alcanzar el objetivo |
| ▼ | El propósito es minimizar |
| ▲ | El propósito es maximizar |

6.2.2 Análisis funcional

El análisis funcional propuesto por David Ullman [17] es una estrategia en la cual se realizan dos “cajas”, por un lado, la caja negra que indica las entradas y las salidas del proceso (véase **Figura 11**); mientras que la caja transparente amplía las actividades que debe de seguir la máquina para llegar a las salidas; estas actividades se conocen como subfunciones. Para esquematizar esto, se emplean flechas, las cuales actúan como la representación de transferencia de material, información o energía; y bloques para indicar las actividades secuenciales del proceso.

**Figura 11.** Esquema general de la caja negra.

6.3 Diseño en detalle

En esta sección se emplearon fases para dividir los cálculos de la máquina. En ello se utilizaron conceptos de electricidad, termodinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos y lógica de automatización. Adicionalmente, se seleccionaron materiales óptimos de acuerdo con la aplicación del proyecto (ser viable para su construcción en el sector académico). Finalmente, se modeló la máquina mediante el software CAD SolidWorks (Dassault Systemes, Suresnes, Francia); se le añadieron complementos de piezas del programa, tales como tornillos, roscas, tuercas entre otros, y la inclusión de piezas comerciales; además de evaluar los elementos de máquina más críticos utilizando método de elementos finitos proporcionado por el programa.

7. Restricciones

Con base a lo anterior, se tendrá en cuentas las siguientes restricciones para el diseño:

- Tamaño de la máquina con dimensiones menores a 1,7 x 2,48 m (largo y alto).
- Uso de materiales y procesos de manufactura de bajo costo.
- Implementación de metales de baja fusión (menores al punto de fusión del hierro, 1535 °C).
- Uso de gases nobles para tener una atmosfera controlada (argón, helio o nitrógeno).

8. Resultados y discusión

8.1 Determinación del material y el método de obtención

En este apartado se presenta el espacio seleccionado para la máquina, los procesos de las AHP para el metal y el método de obtención, a su vez que se explican en detalle los criterios seleccionados. Para mayor entendimiento de esta sección se puede observar el **ANEXO 1**.

8.1.1 Elección y especificación del espacio

La Central de Mezclas (Laboratory of Concrete and Asphalt Blends) fue elegida por proveer recursos necesarios para el funcionamiento de la máquina tales como tomas eléctricas, espacio disponible, aislamiento de vibraciones y vía de circulación para emisiones de gases generados por la fundición del metal. En la **Figura 12** se muestran las dimensiones del espacio disponible. Es importante resaltar que la profundidad mostrada (89 cm) en la imagen puede modificarse a conveniencia, considerando que al lado derecho se encuentra un muro.



Figura 12. Medidas estimadas del espacio para la máquina diseñar.

8.1.2 Selección del metal

Con base a la metodología, se estableció una AHP para el metal que utilizará la máquina productora de polvos. Cabe resaltar que esta máquina no generará partículas exclusivamente para este metal, sin embargo, este sí actuará como un punto de referencia el cual garantice la calidad de las partículas con todas especificaciones deseadas.

La AHP que se llevó a cabo fue una matriz 5x5 y evaluó cinco (5) criterios frente a cinco (5) alternativas, vistas en la **Figura 13**.

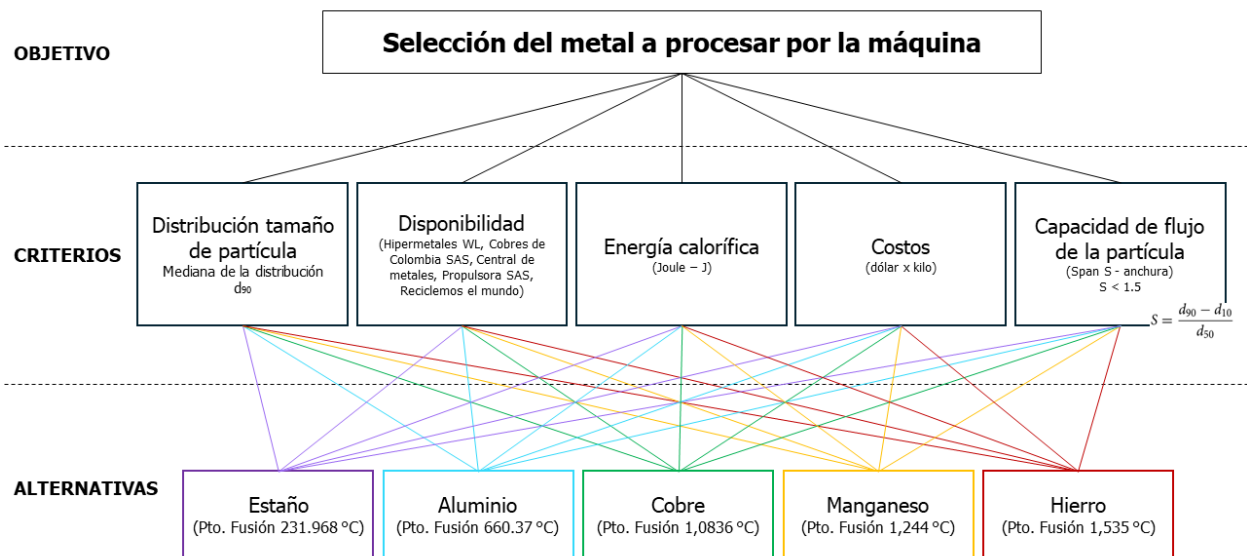


Figura 13. Árbol de decisiones para la selección del metal a pulverizar.

El primer criterio explica cómo diferentes materiales afectan el tamaño de la partícula. Aquí se recolectan diferentes porcentajes (10%, 50% y 90%) de la distribución de los tamaños de los polvos. Para este trabajo, se consideró el 90% (fase acumulativa superior, d_{90}). Esto según el artículo escrito por Jiri Zegzulka y demás autores. (véase

Tabla 6) [18].

Tabla 6. Valores característicos de la distribución granulométrica de los polvos metálicos [18].

| | d10, μm | d50, μm | d90, μm |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Polvo metálico 316 L | 26,7 | 42,6 | 64,0 |
| Zn | 8,3 | 15,8 | 24,8 |
| Sn | 8,5 | 25,9 | 53,6 |
| Al | 29,4 | 79,1 | 187,3 |

| | d10, μm | d50, μm | d90, μm |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Cu | 16,1 | 35,6 | 57,5 |
| Mn | 6,1 | 32,3 | 88,0 |
| Fe | 72,7 | 121,1 | 195,1 |
| Bronce | 12,1 | 29,6 | 57,2 |
| Ti | 80,7 | 295,1 | 452,1 |
| Mo | 6,0 | 18,1 | 44,9 |

Por otra parte, en la disponibilidad se investigó en cinco (5) tiendas distribuidoras de metales en Cali, permitiendo conocer qué materiales se encontraban en cada almacén, obteniendo los siguientes resultados (véase **Tabla 7**):

Tabla 7. Disponibilidad de metales en tiendas de Cali.

| TIENDAS VENTA DE METALES EN CALI | | | | | |
|---|----------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| Metal / Tienda | Hipermetales WL [19] | Cobres de Colombia SAS [20] | Central de metales [21] | Propulsora SAS [22] | Reciclemos el mundo [23] |
| Estaño | X | X | X | ✓ | X |
| Aluminio | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ |
| Cobre | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Manganeso | X | X | X | ✓ | X |
| Hierro | ✓ | X | ✓ | X | ✓ |

En el tercer criterio se evaluó la energía calorífica. Esta es necesaria para la fundición del material y se expresa por medio de la **Ecuación 3**. Este parámetro es importante puesto que influye directamente en la potencia del horno a diseñar; a menor energía calorífica, menor potencia en el horno y por ende menores costos de producción.

$$H = \rho V [C_S(T_m - T_0) + H_f + C_l(T_p - T_m)]$$

Ecuación 3 [3]

Donde,

$H =$ energía calorífica, [J];

$\rho =$ densidad, $\left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right]$;

$C_s =$ calor específico por peso para el metal sólido, $\left[\frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{C}}\right]$;

$T_m =$ temperatura de fusión del metal, [C];

$T_0 =$ temperatura de fusión, [C];

$H_f =$ calor de fusión, $\left[\frac{\text{J}}{\text{g}}\right]$;

$C_l =$ calor específico por peso para el metal líquido, $\left[\frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{C}}\right]$;

$T_p =$ temperatura de vertido, [C, (F)];

$V =$ volumen del metal que se calienta, [cm³].

A partir de esta ecuación se reemplazaron los datos correspondientes utilizando información de MatWeb [24]. Basándose en esto, se concluyó que la energía calorífica es proporcional al punto de fusión, es decir, entre menor punto de fusión, menor energía calorífica, como se muestra en la siguiente gráfica (véase **Figura 14**).

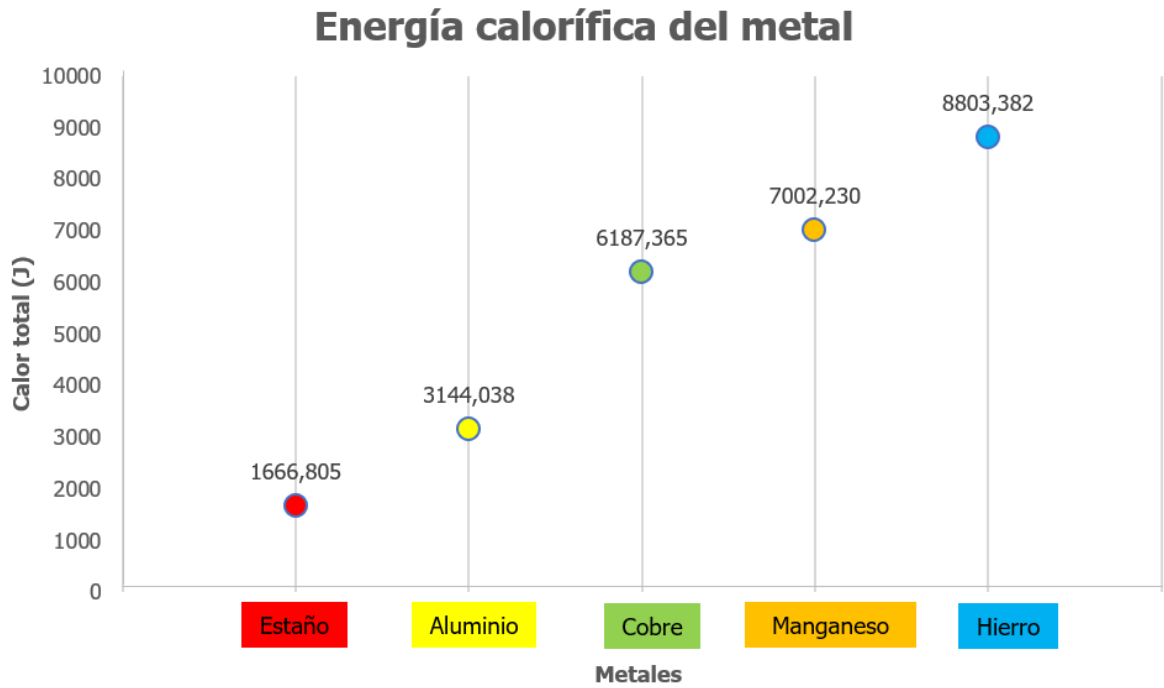


Figura 14. Energía calorífica de metales.

En el criterio, costos, se determinó el valor en dólares por el kilo de metal (ver **Tabla 8**). Cabe resaltar que ese valor se encuentra en cambio constante, porque, dependen del contexto macroeconómico, como la oferta y demanda y valorización del dólar.

Tabla 8. Costo de material dólar por kilogramo.

| MATERIAL | COSTO (USD/kg) |
|-----------------|---------------------------|
| Estaño [25] | 26,170 |
| Aluminio [26] | 2,451 |
| Cobre [27] | 10,340 |
| Manganeso [28] | 17,000 |
| Hierro [29] | 1,000 |

El criterio acerca de la capacidad de flujo de partícula es un parámetro que permite estudiar la calidad de los polvos metálicos, ya que indica una fácil sinterización de partículas al momento de generar algún producto. Este criterio se midió por medio del Span (véase la **Ecuación 4**), el cual es el cociente entre los porcentajes de las distribuciones de tamaños de partícula mostrados en la **Tabla 6** [18]. Los resultados del Span se encuentran en la **Tabla 9**.

$$S = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}}$$

Ecuación 4

Tabla 9. Span según la caracterización y fluidez de polvos metálicos [18].

| | Span S, - |
|-------------------------|--------------|
| Polvo metálico 316 L | 0,9 |
| Zn | 1,0 |
| Sn | 1,7 |
| Al | 2,0 |
| Cu | 1,2 |
| Mn | 2,5 |
| Fe | 1,0 |
| Bronce | 1,5 |
| Ti | 1,3 |
| Mo | 2,1 |

Analizando todos los criterios anteriores, se evaluaron las cinco alternativas para el metal. El resultado de la matriz AHP se muestra en la **Tabla 10**. En ella se determinó que el material seleccionado es el estaño con un 36,3% de dominio sobre las demás alternativas frente a los criterios propuestos.

Tabla 10. Resultados AHP selección del material.

| ALTERNATIVAS | VECTOR PROPIO (C1) | VECTOR PROPIO (C2) | VECTOR PROPIO (C3) | VECTOR PROPIO (C4) | VECTOR PROPIO (C5) | VECTOR FINAL DE DECISIÓN |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Estaño | 0,451 | 0,040 | 0,503 | 0,034 | 0,127 | 0,363 |
| Aluminio | 0,050 | 0,267 | 0,260 | 0,314 | 0,065 | 0,173 |
| Cobre | 0,304 | 0,507 | 0,134 | 0,127 | 0,314 | 0,228 |
| Manganeso | 0,160 | 0,040 | 0,068 | 0,065 | 0,034 | 0,086 |
| Hierro | 0,034 | 0,145 | 0,035 | 0,460 | 0,460 | 0,150 |
| VECTOR PROPIO CRITERIOS | 0,273 | 0,042 | 0,425 | 0,084 | 0,177 | |

8.1.3 Selección del método de obtención

En la **Figura 15** se desarrolló otra AHP para establecer el método más adecuado para la máquina.

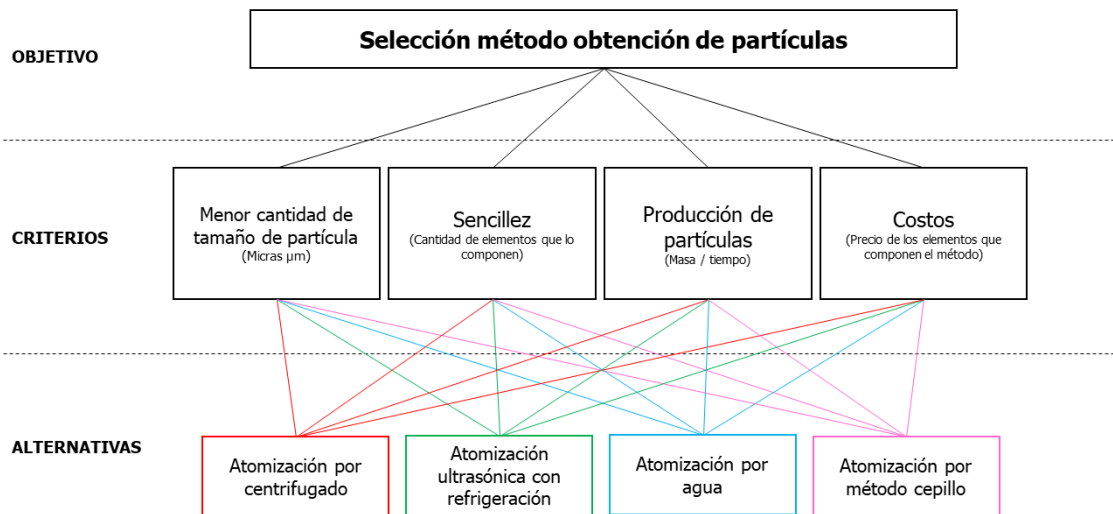


Figura 15. Árbol de decisiones para la selección del método.

Se resalta que, para la selección de alternativas, se utilizaron dos métodos convencionales (atomización por centrifugado y atomización por agua) y dos métodos novedosos vistos en el estado del arte (ultrasonido con refrigeración y mecanismo cepillo).

El primer criterio recopila el menor tamaño de partícula (medido en μm) que puede generar cada método de obtención. Para esto se seleccionaron modelos específicos de máquinas para la obtención de dicha información. Por su parte, la sencillez actúa como un criterio que define la funcionalidad de cada método de obtención; es importante señalar que se no se tendrán en cuenta los componentes particulares de las máquinas que se encuentren en el mercado. Asimismo, la tasa de producción es un parámetro que mide la cantidad de polvo que se genera por unidad de tiempo. Debido a que la máquina se tiene pensada para un ámbito académico, no hay necesidad de que la producción sea de carácter industrial. Se compilaron los datos por medio de especificaciones de la máquina. Finalmente, los costos se tienen en cuenta para que la selección del método sea asequible y viable para la academia. Este se midió en USD y se determinó a partir de cada vendedor de las máquinas. La **Tabla 11** muestra una recopilación de los datos de cada criterio explicados anteriormente.

Tabla 11. Información de los criterios para cada alternativa.

| Alternativas/Criterios | Menor tamaño de partícula (μm) | Sencillez (#) | Tasa de producción (Kg/Min) | Costo (USD) |
|---|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------|
| Centrifugado (CET005, Skyline) [30] | 50 | 4 | 0,69 | 200,000 |
| Atomización por Agua (CDO-PM50, CDOCAST) [31] | 149 | 2 | 0,6 | 60,000 |
| Ultrasonido con Refrigeración | 32 | 6 | 0,017 | 220,000 |

| Alternativas/Criterios | Menor tamaño de partícula (μm) | Sencillez (#) | Tasa de producción (Kg/Min) | Costo (USD) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|
| (ATO,LabPlus) [32] | | | | |
| Mecanismo Cepillo [9] | 147 | 3 | 0,15 | Menor a los métodos convencionales |

Cabe mencionar que, para el criterio de "sencillez" se definieron por medio de los principios vistos en Kazybek Kassym y Asma Perveen [33] para los métodos de obtención convencionales (atomización por agua y centrifugado); mientras para los métodos novedosos se utilizaron los escritos realizados por Łukasz Zrodowski [12] y O. S. Onwuka [9] (ultrasonido y mecanismo cepillo). A continuación, se muestra un listado de los componentes generales para la funcionalidad de cada método:

- **Atomización por centrifugado:** la junta rotatoria, el disco, un motor y el eje que sostiene al disco rotatorio.
- **Atomización por agua:** bomba de agua y mangueras (junto con las boquillas).
- **Ultrasonido con refrigeración:** generador de alta frecuencia, agua de refrigeración, bomba de vacío, filtro, generador ultrasónico y el sistema de fusión por arco [12].
- **Mecanismo cepillo:** el deflector, el motor y el cepillo [9].

Para el caso particular de los datos del mecanismo cepillo (debido a que no se tiene registro de un uso de este método a escala industrial), se tomaron los datos proporcionados por el artículo de O. S. Onwuka [9]. En el criterio de tasa de producción se determinó mediante la **Ecuación 5**:

$$W_{neta} = (q_{entrada} - q_{salida}) * m$$

Ecuación 5

Teniendo en cuenta la potencia del horno de 6,5 kW; un calor de entrada total de 2653,6 KJ y asumiendo que las pérdidas de masa son nulas, se concluyó que la tasa de producción es 0,15 Kg/min [9].

El método elegido tras realizar el proceso de elección fue el de atomización por agua. Este fue más compatible con los criterios que las demás alternativas al obtener un 33,6% (ver **Tabla 12**).

Tabla 12. AHP de selección del método.

| ALTERNATIVAS | VECTOR PROPIO (C1) | VECTOR PROPIO (C2) | VECTOR PROPIO (C3) | VECTOR PROPIO (C4) | VECTOR FINAL DE DECISIÓN |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Centrifugado | 0,300 | 0,133 | 0,055 | 0,082 | 0,174 |
| Atomización por agua | 0,047 | 0,558 | 0,086 | 0,290 | 0,336 |
| Ultrasonido | 0,581 | 0,042 | 0,613 | 0,053 | 0,241 |
| Mecanismo cepillo | 0,072 | 0,268 | 0,245 | 0,575 | 0,249 |
| VECTOR PROPIO CRITERIOS | 0,312 | 0,493 | 0,052 | 0,143 | |

8.1.4 Selección criterios para el diseño de la máquina

Como se mencionó en el apartado **6.1.3**, se consultó a varios profesores de ingeniería mecánica sobre las características que les gustaría ver en la máquina; en el cual, a partir de la información recolectada se determinaron los siguientes criterios:

1. **Criterio 1:** La máquina sea de estructura desmontable para un sencillo mantenimiento y transporte.
2. **Criterio 2:** Visualización del proceso de pulverización (implementación de zonas con vidrio o ventanas para la observación del proceso de transformación a polvo).
3. **Criterio 3:** Funcionamiento automático para el control y la visualización de parámetros (implementación de PLC o elementos de controladores lógicos).

Luego, se realizó la encuesta toda la comunidad de ingeniería mecánica (profesores, estudiantes y laboratoristas) para determinar los grados de importancia. Los hallazgos de este sondeo revelaron que el criterio más importante para la comunidad es el número 3 (véase **Figura 16**). Por esto, al momento del diseño conceptual, este tendrá gran relevancia y peso.

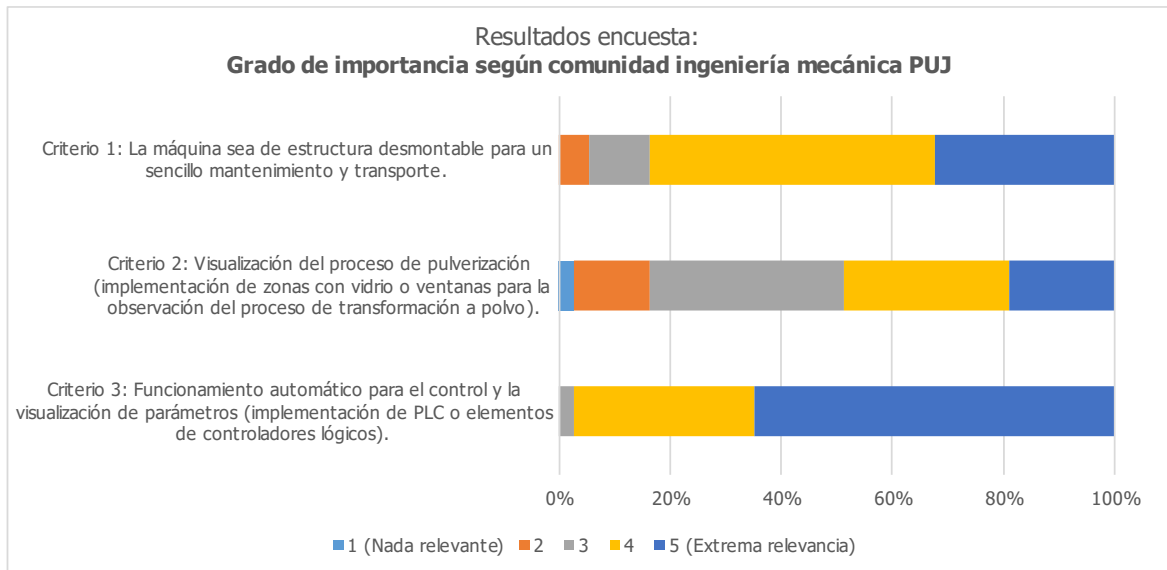


Figura 16. Resultados de la encuesta a la comunidad de ingeniería mecánica de la Javeriana Cali.

La encuesta completa con cada ítem que se realizó a la comunidad se puede encontrar completa en el **ANEXO 2**.

8.2 Elaboración del diseño conceptual

Una vez definido el metal (estaño), el método (atomización por agua) y los criterios más importantes para la construcción de la máquina, se procedió a la realización del diseño conceptual. Para esto se comenzó con una matriz tipo QFD; se continuó con un análisis funcional del método de atomización por agua, en el cual se expusieron las funciones y subfunciones que deberá cumplir la máquina; y, finalmente, se propusieron los primeros bosquejos de la máquina.

8.2.1 Casa de la calidad (QFD)

Para la realización de la casa de la calidad, se tomaron los datos porcentuales de la encuesta vista en la **Figura 16**. A continuación, se muestra en la **Tabla 13** cada criterio con su respectiva prioridad.

Tabla 13. Requerimientos de los clientes para QFD.

| Requerimientos del cliente | Porcentaje de importancia (%) |
|--|-------------------------------|
| Estructura desmontable | 32,4 |
| Visualización del proceso de pulverización | 18,9 |
| Funcionamiento automático | 64,9 |
| Sencillo mantenimiento de la máquina | 32,4 |

Para cumplir con dichas necesidades, en la **Tabla 14** se muestran los requerimientos seleccionados para el diseño. Estos fueron evaluados bajo las siguientes convenciones con la intención de identificar el propósito de cada característica (ver **Tabla 5**):

Tabla 14. Características que satisfacen los requerimientos de los clientes.

| Características en el diseño | Convención (propósito) |
|---|------------------------|
| Materiales de construcción resistentes a la corrosión y a la temperatura de vertido del estaño. | X |
| Cámaras de fundición y de pulverización desmontables entre sí. | X |
| Recipiente de los polvos de fácil acceso para su recolección. | X |

| Características en el diseño | Convención (propósito) |
|--|------------------------|
| Control para el vertimiento del metal fundido. | X |
| Tamaño de la máquina no mayor a 1,70 x 2,48 m. | ▼ |
| Uso de materiales traslucidos para la visualización de los procesos. | X |
| Control de calentamiento del material en bruto. | X |
| Control de las boquillas para la expulsión del agua a presión. | ▲ |
| Control atmosférico en la cámara de atomización | X |
| Control del accionamiento de la bomba para el suministro de agua. | ▲ |

Posterior a esto, se vincularon los requisitos de los clientes con las características de diseño según la ponderación mostrada en la **Tabla 3**. Después de operaciones matemáticas propias de la QFD, se pueden obtener los requerimientos de ingeniería con sus pesos relativos, los cuales representan el grado de importancia en el diseño mecánico.

Según lo observado en la **Tabla 15**, las prioridades para el diseño son; el tamaño de la máquina; el control de las boquillas de agua; así como el control del suministro de agua; porque poseen una calificación de 13,4 (para mayor profundidad en los cálculos véase **ANEXO 3**).

Tabla 15. Peso relativo de las características para el diseño.

| Características en el diseño | Grado de importancia (peso relativo) |
|---|--------------------------------------|
| Materiales de construcción resistentes a la corrosión y a la temperatura de vertido del estaño. | 5,0 |
| Cámaras de fundición y de pulverización desmontables entre sí. | 7,8 |

| Características en el diseño | Grado de importancia (peso relativo) |
|--|---|
| Recipiente de los polvos de fácil acceso para su recolección. | 6,7 |
| Control para el vertimiento del metal fundido. | 11,2 |
| Tamaño de la máquina no mayor a 1,70 x 2,48 m. | 13,4 |
| Uso de materiales traslucidos para la visualización de los procesos. | 4,6 |
| Control de calentamiento del material en bruto. | 12,3 |
| Control de las boquillas para la expulsión del agua a presión. | 13,4 |
| Control atmosférico en la cámara de atomización. | 12,3 |
| Control del accionamiento de la bomba para el suministro de agua. | 13,4 |

8.2.2 Análisis funcional de la máquina

Con el propósito de entender el funcionamiento conceptual del método de atomización por agua, se muestran los esquemas de la caja negra y transparente, los cuales se pueden observar en la **Figura 17** y **Figura 18** respectivamente.

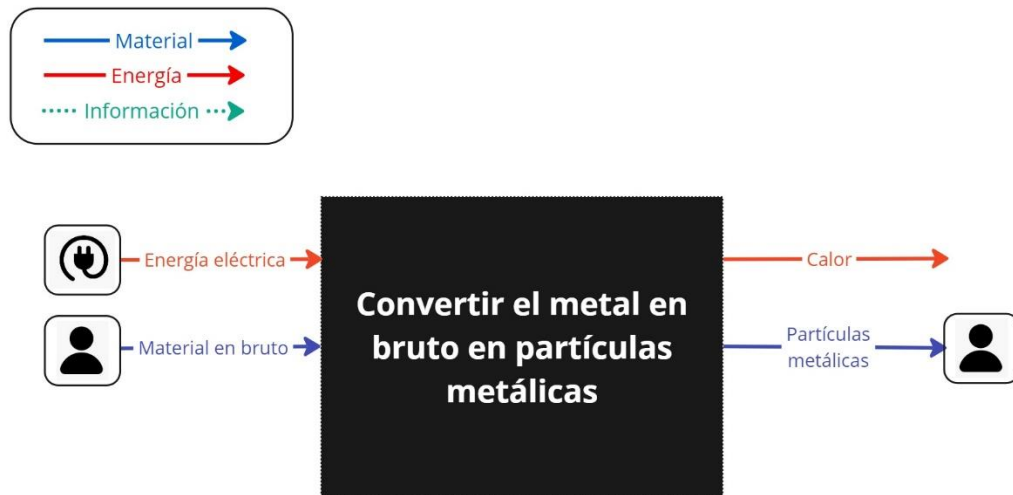


Figura 17. Caja negra de la máquina.

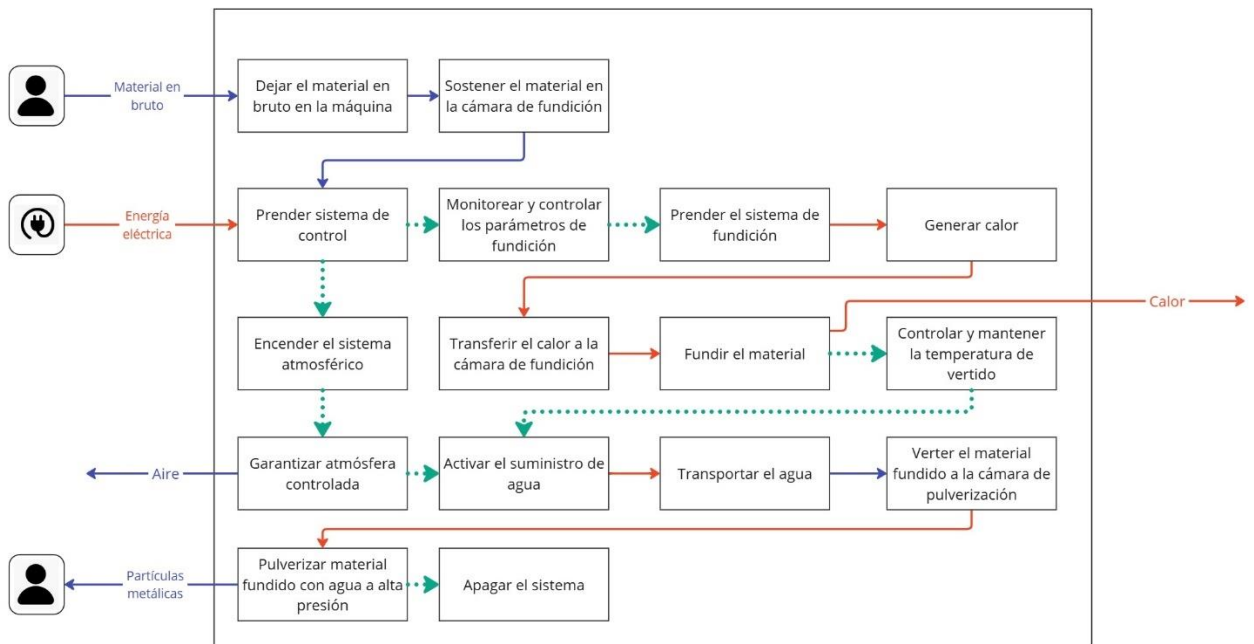


Figura 18. Caja transparente para la máquina.

Con la finalidad de dar orden y comprensión a las subfunciones, se realizaron una serie de clasificaciones denominadas "fases", las cuales se muestran a continuación:

- **Fase I – Cámara de fundición:** dejar el material en bruto compuerta, sostener el material en la cámara, generar calor, transferir el calor a la cámara, fundir el material.
- **Fase II – Cámara de pulverización y recolección:** garantizar atmosfera controlada, verter el material fundido a la cámara, pulverizar el material fundido con agua a alta presión.
- **Fase III – Suministro de agua:** transportar el agua.
- **Fase IV – Control y automatización:** prender el sistema de control, monitorear y controlar parámetros de fundición, prender el sistema de fundición, encender el sistema atmosférico, controlar y mantener la temperatura de vertido, activar el suministro de agua, apagar sistema.

8.2.3 Bosquejos conceptuales de la máquina

A partir de lo recopilado en el apartado **8.2.1** y **8.2.2**, se tuvo en cuenta el método “brainstorming as a source of ideas” de Ullman [17] para esquematizar cuatro aproximaciones de los posibles diseños de la máquina. (véase **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21** y **Figura 22**).

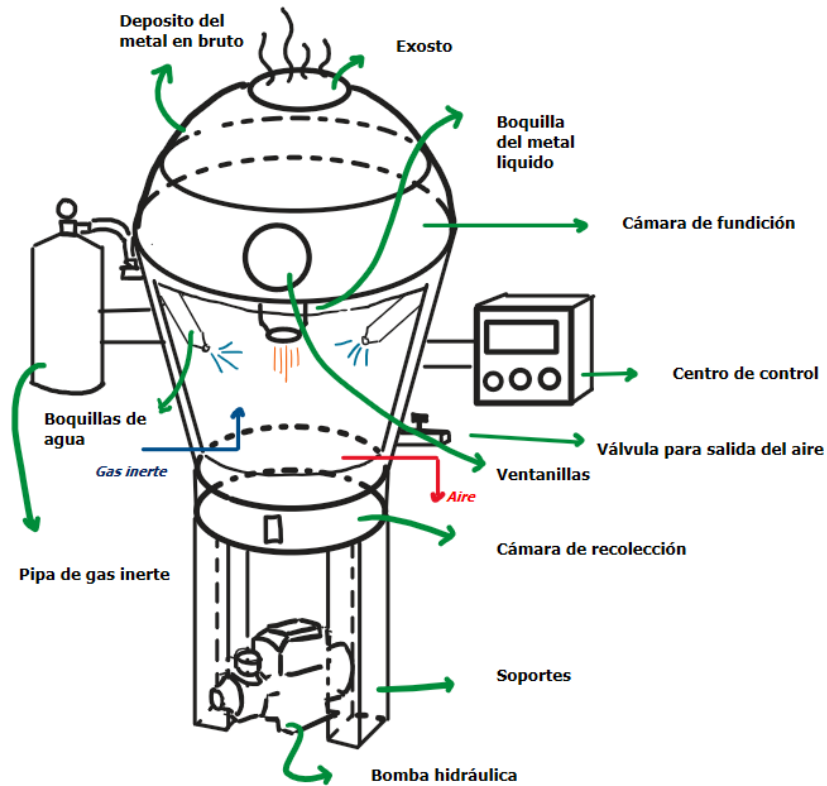


Figura 19. Bosquejo conceptual #1.

El primer bosquejo conceptual se trata de una máquina con dos apoyos que busca innovar con su forma particular que asemeja a un bombillo, ubicando todos los componentes de la máquina en una parte superior, dejando el sistema de suministro de agua, junto a la bomba en una parte inferior. Este diseño posee dos ventanillas de visualización, una para la zona del horno y otra en la cámara de pulverización, permitiendo evidenciar qué ocurre en cada etapa del proceso de atomización. Para el tema del sistema de inertización, este modelo cuenta con una pipeta de gas inerte anexa a la cámara de pulverización y conecta mediante mangueras para que el gas ingrese a la cámara por una válvula y el aire salga por un extractor. Al igual que la pipeta, el sistema de control y atomización, mostrados en este caso por una pantalla, se encuentra adherido a la cámara de pulverización. Por otro lado, la cámara de recolección de polvos es relativamente pequeña y simula la función de un cajón, el cual entra y sale.

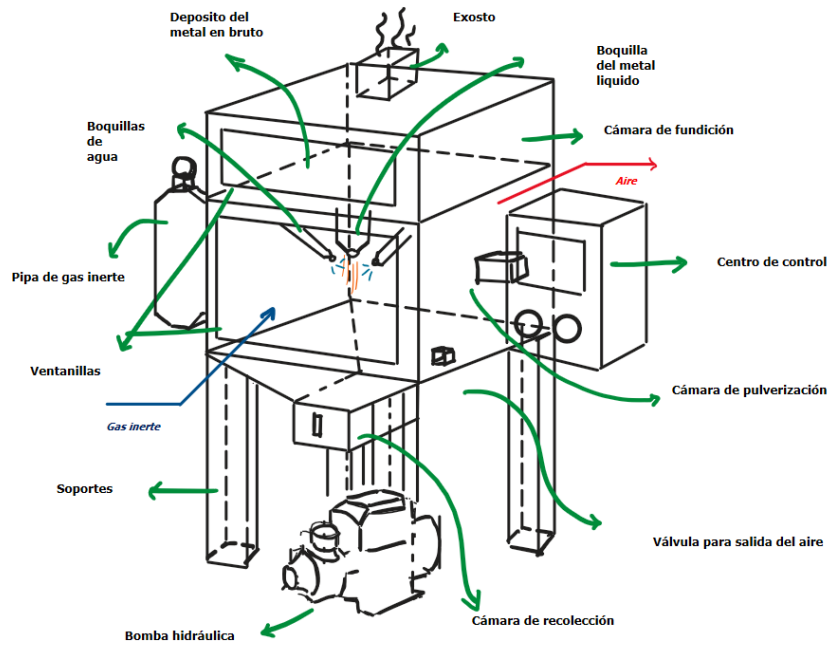


Figura 20. Bosquejo conceptual #2.

El segundo diseño consta de una máquina de forma rectangular de cuatro apoyos, el cual al finalizar la cámara de pulverización se convierte en un embudo y cae a la cámara de recolección. Este diseño, al igual que el anterior, tiene la pipeta de gas inerte y pantalla de control anexos a la cámara de atomización y dos ventanillas para observar el proceso. Asimismo, el sistema de suministro de agua se encuentra en la parte inferior de la máquina.

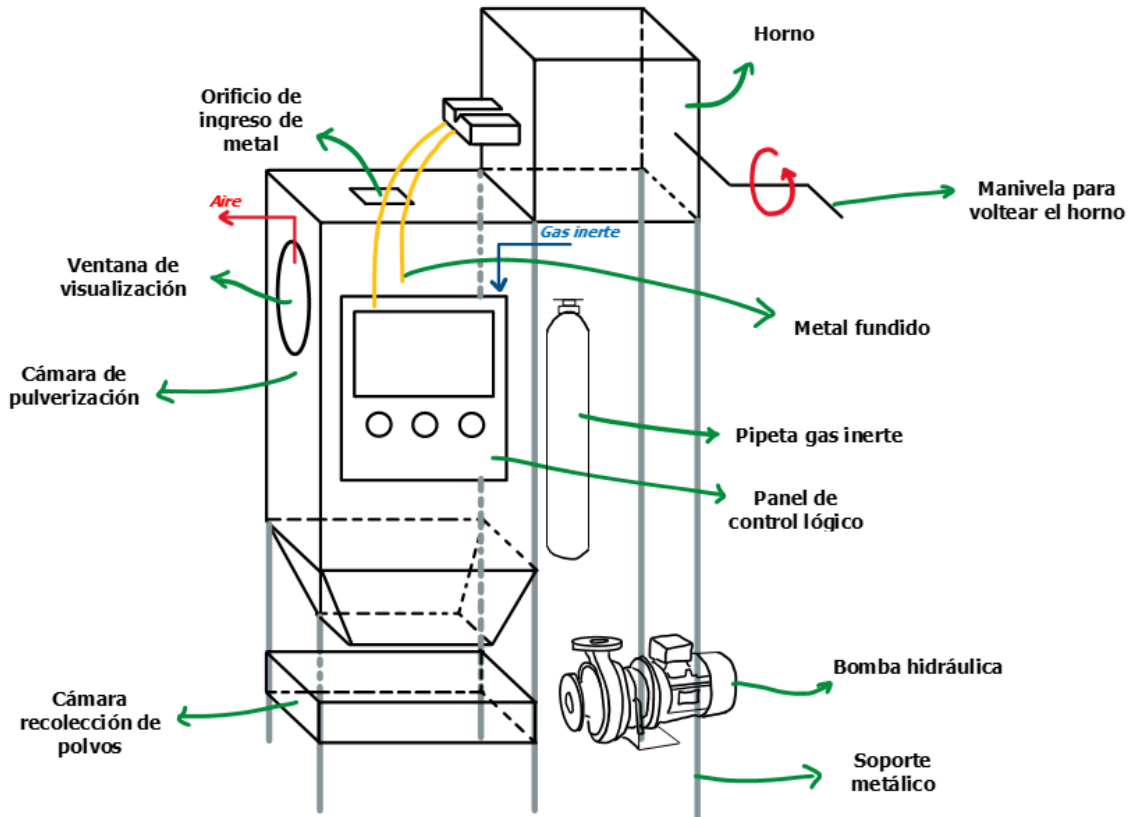


Figura 21. Bosquejo conceptual #3.

El dibujo #3 se trata de una máquina con cuatro apoyos de forma rectangular e involucra dos soportes estructurales; uno que soporta la cámara de fundición y el suministro de agua en la parte de abajo y otro que contiene la cámara de pulverización y la de recolección. A diferencia de los otros diseños, solo tiene una ventanilla para ver la interacción de chorros de agua con el metal. También, utiliza un horno el cual, mediante una manivela, se inclina y permite la salida del metal fundido al crisol a la cámara de atomización. Este metal ingresa por un orificio en la parte superior de la recámara. Su sistema de inertización consta de una pipeta de gas inerte, pegada al costado de la cámara de pulverización, al igual que la pantalla de control.

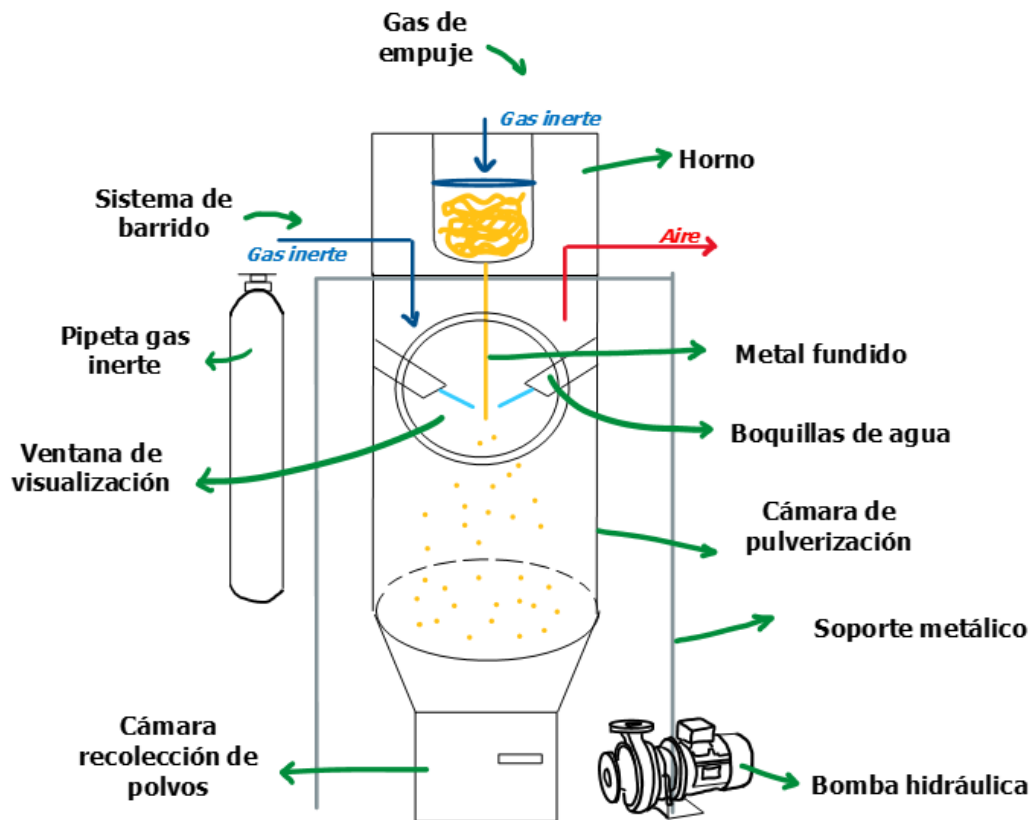


Figura 22. Bosquejo conceptual #4.

El cuarto y último croquis, muestra la vista frontal de una máquina tipo cilíndrica con cuatro apoyos. En esta ocasión, la máquina ocupa todo el espacio que abarca el soporte estructural y deja la bomba y el sistema de suministro de agua a un lado. La pipeta de gas está agarrada a uno de los tubos del soporte.

Después de analizar los cuatro bosquejos, se llegó a la conclusión que se optaría por escoger el bosquejo #4, esto dado que el primer bosquejo (**Figura 19**) presenta inconvenientes en el tema del soporte estructural, ya que únicamente se apoya en dos patas y estas deberían ser capaces de soportar un horno, una cámara de pulverización y recolección, una pipeta de gas y todos los componentes electrónicos. Por otro lado, el segundo dibujo (**Figura 20**) al igual que el tercero (**Figura 21**) poseen complicaciones en

temas de esfuerzos mecánicos al tratarse de figuras rectangulares, las cuales se convierten en concentradores de esfuerzos. Asimismo, el tercer diseño, exhibe una transición al aire libre de la cámara de fundición a la cámara de pulverización. Ese espacio exige que el metal evacue el crisol mediante la inclinación del horno y entre a un orificio en la parte superior de la recámara de atomización, siendo expuesto el metal en estado líquido a partículas de aire sin ninguna protección atmosférica. Con lo anterior, se expone un problema en temas de manufactura y oxidación del metal. Respecto al primer problema, se debe aclarar que diseñar el espacio específico del hueco para que ingrese el metal, varía dependiendo del metal que se utiliza y la densidad de este, puesto que, dependiendo de esto, el ángulo de caída se modificaría y el hueco al cual debería caer, no sería siempre el mismo. Finalmente, el cuarto diseño (**Figura 22**) plantea una estructura que provee una buena estabilidad a la máquina, además de que permite agregar fácilmente dispositivos cruciales para la operación de la máquina como lo son la pipeta del gas inerte y el controlador principal. Igualmente, su forma cilíndrica, mitiga concentradores de esfuerzos y evita que polvos metálicos pudiesen quedar atascados en esquinas o geometrías complejas. Por último, el suministro de agua se encuentra a un lado de la máquina, intentando prevenir que la bomba pueda entrar en contacto con algún elemento que interfiera en su funcionamiento y se dañe.

8.3 Desarrollo del diseño de detalle

Teniendo presente el diseño conceptual, se realizaron cálculos los cuales se clasificaron por las fases vistas en el apartado **8.2.2**; en la **Fase I**, se comenzó con el diseño del horno y el diseño del crisol que contendrá el metal fundido. Posteriormente en la **Fase II**, se explicó el método seleccionado para controlar la atmosfera en la cámara de atomización (véase **Figura 24**). Luego, se analizaron los chorros de agua utilizando la teoría de momentum lineal que, en conjunto con el comportamiento físico de la colisión entre el chorro de agua y el chorro de metal fundido se definió un modelo matemático que determinó el tiempo de solidificación de la partícula metálica (utilizando teoría de transferencia de calor); el cual permitió dimensionar la cámara de pulverización y de

recolección. En la **Fase III**, se emplearon conceptos de mecánica de fluidos como principios y ecuaciones de Bernoulli, Colebrook, para seleccionar la bomba y las pérdidas por fricción. Finalmente, en la **Fase IV** se escogieron los accesorios electrónicos que permitan el control de la máquina; a su vez del desarrollo de un diagrama GRAFCET con el entendimiento de la automatización del sistema.

Con la intención de que este proceso de división de fases sea más entendible para el lector, en la **Figura 23** se presenta un diagrama el cual muestra los cálculos obtenidos de cada fase con sus respectivas relaciones; mientras que en la **Figura 24** se muestra los subprocesos de la fase I y II, las cuales son los apartados de mayor complejidad.

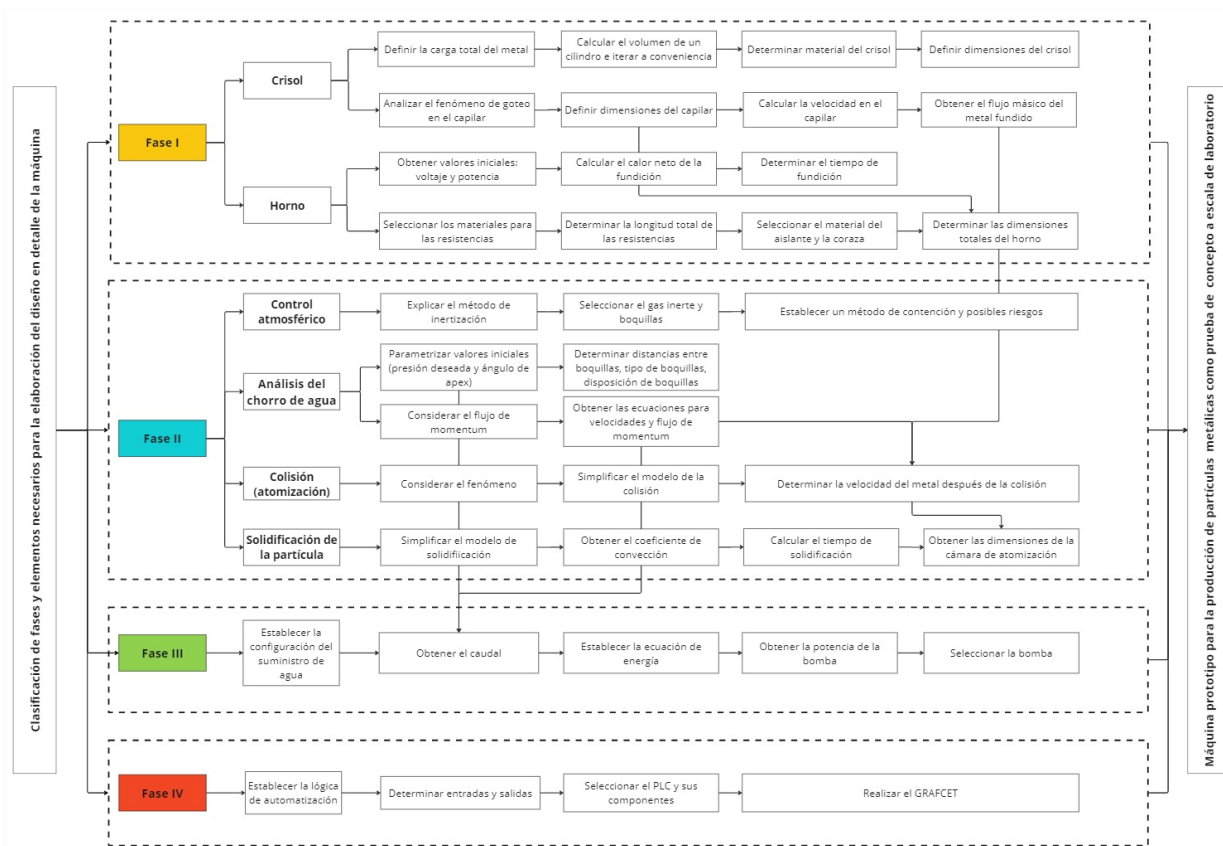


Figura 23. Esquema de las fases para el diseño en detalle con los cálculos a obtener y sus respectivas relaciones.

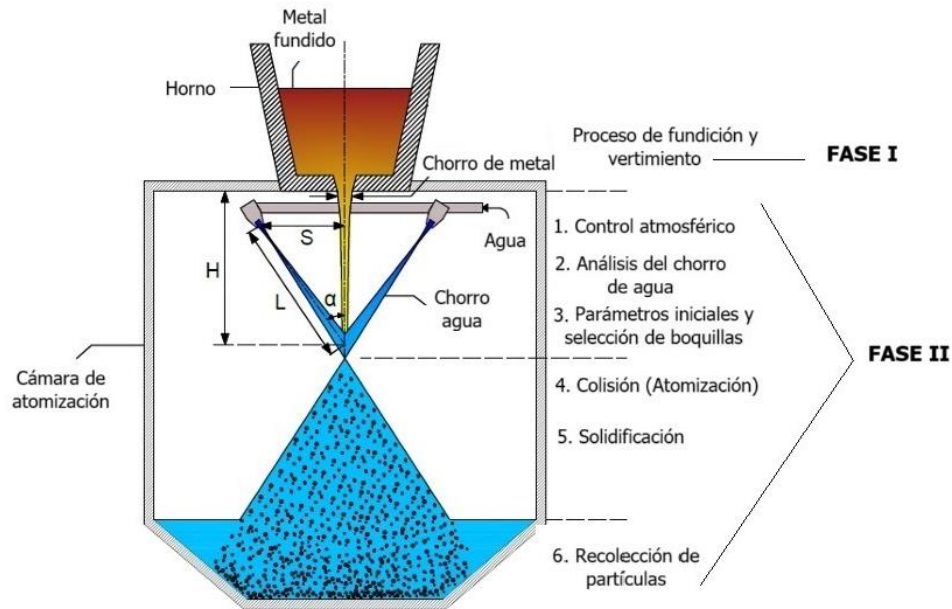


Figura 24. Esquema principal de la máquina a diseñar con Fases I y II y variables principales. Modificado de [34].

8.3.1 Fase I – Cámara de fundición

Según el bosquejo conceptual de la máquina (**Figura 22**), la cámara de fundición debe de estar por encima de la máquina para que, por gravedad, el metal fundido se dirija a la cámara de pulverización. Al investigar hornos y muflas de laboratorio comerciales, se llegó a la conclusión que ninguno es apto para el diseño ya que se necesita de una intervención directa en el proceso de fundición, lo que genera una disminución en la temperatura del metal por el intercambio de calor con el ambiente. Además, los hornos que permiten el vertimiento de la fundición (véase **Figura 25**); son robustos y su mecanismo es complejo. Por consiguiente, se optó por diseñar el crisol y el horno, en el que se incluye el dimensionamiento y la selección de materiales.

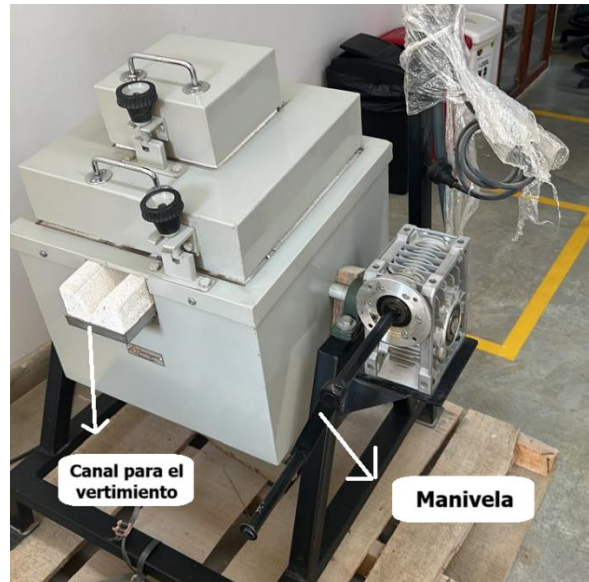


Figura 25. Horno de la Javeriana de Cali con sistema de vertimiento.

8.3.1.1 Crisol

El crisol ubicado en el horno tendrá un orificio que permitirá el paso del metal fundido hacia la cámara de pulverización, sin embargo, el tamaño de este hueco está preestablecido, dado el fenómeno de formación de gotas en una corriente descendente de líquido, el cual explica la degradación de un fluido.

Un fluido al caer de un suministro como un grifo o una boquilla comienza con una velocidad v_0 y un radio inicial r_0 , no obstante, al recorrer cierta altura h , estos parámetros comienzan a variar como se observa en la **Figura 26**.

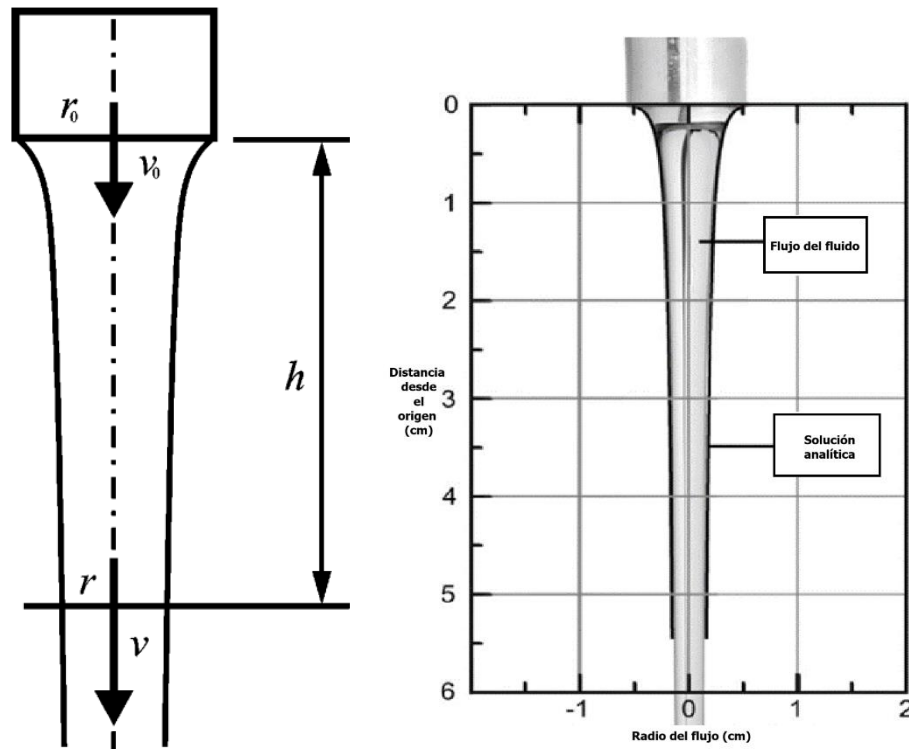


Figura 26. Caída de un chorro de líquido por el grifo [35].

Según la teoría de Plateau-Rayleigh, acerca de la inestabilidad por capilaridad de un hilo de agua que cae bajo la influencia de la gravedad [36], este chorro de fluido proveniente de un orificio de radio a acelera bajo la influencia de la gravedad g . En este supuesto influyen varios elementos como el número de Froude (describe la relación entre las fuerzas inerciales deformadoras y las fuerzas cohesivas estabilizadoras de los líquidos que fluyen a través de un medio fluido) y de Weber (la relación entre la inercia del fluido comparada con su tensión superficial), como se aprecia en la **Figura 27**.

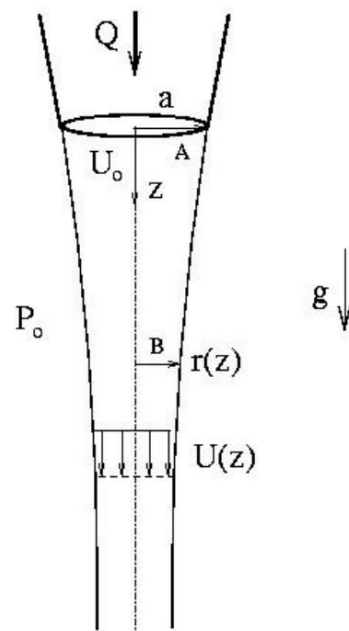


Figura 27. Componentes de la inestabilidad de Plateau-Rayleigh [36] .

De acuerdo con el diagrama, es posible plantear una ecuación que contenga la influencia de la altura en variables como la velocidad y el radio del fluido, como se ve a continuación:

$$\frac{r(z)}{a} = \left(\frac{U_0}{U(z)} \right)^{\frac{1}{2}} = \left[1 + \frac{2z}{Fr a} + \frac{2}{We} \left(1 - \frac{a}{r} \right) \right]^{-\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 6 [36]}$$

Donde,

$r(z)$ = radio del fluido en función de una altura z ;

a = radio inicial del fluido al salir del orificio;

U_0 = velocidad inicial del fluido;

$U(z)$ = velocidad del fluido en función de una altura z ;

$$Fr = \text{Número de Froude} = \frac{U_0^2}{ga} = \frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza gravitacional}} [37];$$

$$We = \text{Número de Weber} = \frac{\rho U_0^2 a}{\sigma_s} = \frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza de tensión superficial}} [37].$$

Con la intención de evitar que este fenómeno se presente y que el flujo de metal fundido que ingresa a la cámara de pulverización sea constante, el diámetro de este orificio deber variar de 2 mm a 12 mm; según la experimentación realizada por Jorge Palma de la Universidad de los Andes [38]. Sin embargo, dado el empirismo de la atomización de agua, no existe una única manera de determinar este valor. No obstante, en este trabajo, con la intención de mitigar este fenómeno, se optó por hallar este diámetro mediante el uso del flujo másico, ya que este influye en las dimensiones de la cámara de pulverización. En este orden de ideas, si se tiene la restricción de altura en la recámara al ser un prototipo de laboratorio (<2,48 m), el flujo debe ser de 0,14 kg/s, dando como resultado un diámetro 4 mm (para observar el cálculo completo, ir al apartado **8.3.2.5**).

Una vez se contemplan los fenómenos que podrían afectar el diseño del crisol, se diseñaron las dimensiones de este. Se asumió que el peso máximo de metal sólido que el crisol recibirá es de 2 kg, esto dada la toma de referencia de la máquina de Fernandez [39].

Utilizando nuevamente la base de datos de materiales MatWeb [24], se obtuvo la densidad del estaño (7,29 g/cc) y se halló el volumen del crisol mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Masa [g]} = \text{densidad} \left[\frac{\text{g}}{\text{cc}} \right] * \text{volumen [cc]} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2000 \text{ g}}{7,29 \frac{\text{g}}{\text{cc}}} = 274,348 \text{ cc}$$

Ahora, una vez obtenido el volumen, es posible iterar las dimensiones óptimas para el crisol, dada la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen de la carga} = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

Ecuación 8

Donde,

$D = \text{diámetro del crisol, [cm]}$.

$h = \text{altura de llenado, [cm]}$.

A partir de esta ecuación, se despejó la altura y se iteró el diámetro hasta hallar un valor que resultara conveniente para el tamaño de la máquina a diseñar. Cabe resaltar que también se tuvo en consideración que, a mayor altura del crisol, la distribución de calor será menor, aumentando su tiempo de calentamiento. Esto fundamentado en los principios de transferencia de calor. Obteniendo como resultado un crisol de 9,00 cm de diámetro por 4,31 cm de altura. Sin embargo, por temas de seguridad, para evitar que el metal fundido se riegue y facilidad de manipulación, se le aumentó 4 cm.

Algunos crisoles presentan un capilar; este permite un flujo uniforme de fluido y que el metal impacte exactamente en el lugar deseado con los chorros de agua. Este capilar dada la investigación de Palma [38], se diseñará con una longitud de 6,2 cm y un diámetro de 0,4 cm.

Dado lo anterior, es posible resumir las dimensiones del crisol en la **Figura 28**:

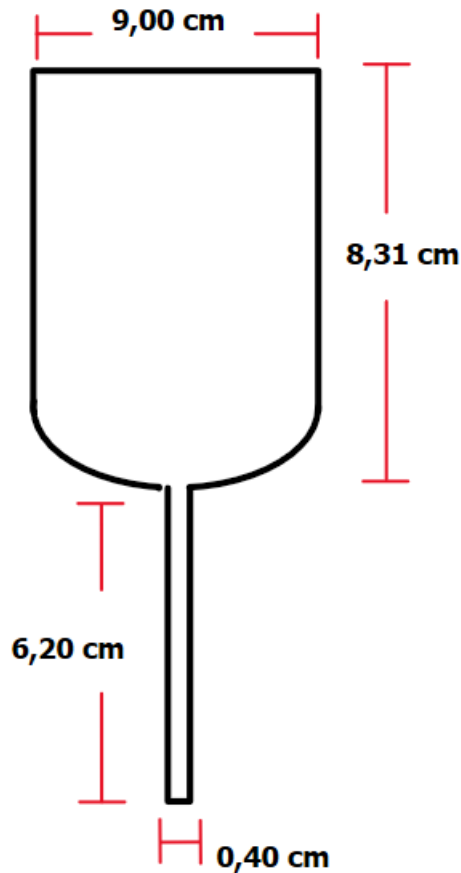


Figura 28. Bosquejo esquemático del crisol.

El siguiente paso fue definir el material del crisol. Para ello se realizó una tabla comparativa (**Tabla 16**). Por un lado, se preseleccionaron dos materiales que se suelen utilizar en hornos que resisten altas temperaturas (en esta ocasión se escogieron la alúmina y el grafito). Por otra parte, se consideraron criterios como la conductividad térmica, la resistencia a la corrosión, el peso y la porosidad.

En la **Tabla 16** se muestra en verde, los valores más adecuados para la fabricación del crisol. En primera instancia, se necesita una conductividad térmica mayor para que el calentamiento del metal a pulverizar sea más uniforme, por lo que la alúmina tiene mayor valor.

La resistencia mecánica, haciendo referencia a la dureza en Mohs, se espera un mayor valor para que el crisol tenga mejor resistencia al desgaste o arañños, e igualmente pueda resistir más a la deformación cuando se someta ante cargas o presión. Ganando nuevamente, la alúmina.

Luego la densidad que está relacionada al peso, en el cual se explica cómo un material más liviano podría ayudar al diseño de esta máquina, la cual al ser de objetivo académico no tiene el propósito de ser muy grande, meramente funcional, entonces el grafito sería una opción más viable.

Luego se encuentra el costo, que por las mismas razones de ser una máquina de carácter académico deberá ser principalmente económico. Asimismo, por temas de seguridad y manipulación de equipos, lo ideal es que los materiales del horno no permitan la conductividad eléctrica en gran medida, sino que sean de carácter aislante.

Por último, que el material del crisol tenga un punto de fusión muy alto, garantiza que hasta el hierro podría ser fundido en esta vasija e igualmente no afectaría la forma ni las propiedades del crisol.

Tabla 16. Tabla comparativa para material del crisol [24].

| Características | Material | |
|----------------------------------|----------|---------|
| | Alúmina | Grafito |
| Conductividad térmica (W/m-K) | 30,0 | 24,0 |
| Resistencia mecánica (Mohs) | 9,0 | 2,0 |
| Densidad (g/cc) | 3,9 | 2,25 |
| Costo (USD/kg) | 0,348 | 1,33 |

| Características | Material | |
|---------------------------------|----------|-----------|
| | Alúmina | Grafito |
| Conductividad eléctrica (W/m-K) | Aislante | Conductor |
| Punto de fusión (°C) | 2054 | 3650 |

Dado los argumentos anteriores, se decidió optar que el material del crisol sería la alúmina, el cual según la referencia comercial de Almath suele tener un espesor de 3.5 mm [40], como se observa en la **Figura 29**. A partir de esto y por fundamentos básicos de transferencia de calor, se asumirá para este trabajo este mismo valor. Para tener una mayor apreciación de este elemento comercial, en el **ANEXO 4** se muestra el plano de este.



Figura 29. Crisol alúmina comercial [40].

8.3.1.2 Diseño del horno

Se diseñó un horno con resistencias eléctricas por su facilidad de construcción. Considerando que los metales deben ser procesados por debajo del punto de fusión del hierro, se seleccionó una temperatura de operación de 1200 °C, debido a que es la temperatura máxima que pueden alcanzar los hornos y muflas de laboratorio [41]. Adicionalmente, se implementará un sistema de presión por gas, el cual se encargará de empujar el metal fundido adentro del crisol, evitando así el taponamiento por tensión superficial.

Resistencias térmicas y tiempo de fundición

Se seleccionó el material para las resistencias térmicas. Para ello, se comparó el Kanthal A1 y el nicromo (puesto que son los que convencionalmente se usan para hornos eléctricos) utilizando los siguientes criterios: (1) costo; (2) conductividad térmica y (3) temperatura máxima de operación (véase **Tabla 17**). Por un lado, se desea una conductividad térmica alta para que la transferencia de calor sea eficiente; mientras que, por otra parte, se requiere de bajos costos para que el proyecto posea una rentabilidad alta. Finalmente, se busca una temperatura de operación igual o superior a 1200 °C. Evaluando el material con mayores casillas verdes, se concluye que la mejor opción es el nicromo.

Tabla 17. Comparación de los materiales utilizados para resistencias térmicas.

| Características | Material | |
|----------------------------------|------------|------------|
| | Kanthal A1 | Nicromo |
| Conductividad térmica (W/m-K) | 11 [42] | 11,3 [43] |
| Costo (USD/kg) | 42 [44] | 23,94 [45] |

| Características | Material | |
|--------------------------------------|------------|-----------|
| | Kanthal A1 | Nicromo |
| Temperatura máxima de operación (°C) | 1400 [42] | 1200 [46] |

Posteriormente, se determinó la potencia requerida con base a catálogos de muflas de laboratorio con temperaturas de operación de 1200 °C y con capacidades de carga bajas (2,9 L). Por lo tanto, se optó por una potencia de operación de 1,4 kW [41].

Luego, se calculó la resistencia teniendo en cuenta la **Ecuación 9**, dado que se tiene en el laboratorio de la universidad un tomacorriente de 110 V. El resultado de la ecuación es de 8,64 Ohms.

$$R = \frac{V^2}{P}$$

Ecuación 9

Donde

$R =$ resistencia del sistema, [Ω],

$V =$ voltaje del sistema, [V],

$P =$ potencia del sistema, [W].

Ulteriormente, se calculó la longitud de resistencia necesaria para todo el horno (véase **Ecuación 10**). Según Onwuka [9], la resistencia del sistema varía con la temperatura, por consiguiente, se utiliza la **Ecuación 11**. Considerando que la resistencia por cada metro del niquel-cromo es de 1,3327 ohm/m, la longitud necesaria para la operación es de 6 m.

$$R' = \frac{R}{F}$$

Ecuación 10

Donde,

R' = resistencia del sistema real, [ohm];

F = factor de resistencia para una temperatura de $1200^{\circ}\text{C} = 1,080$ [46].

$$l = \frac{R'}{r'}$$

Ecuación 11

Donde,

l = longitud de resistencia requerida, [m];

r' = valor de resistencia de niquel cromo por cada metro, $\left[\frac{\text{ohm}}{\text{m}}\right]$.

Finalmente, se determinó el calor teórico consumido Q_{th} el cual es la suma de la cantidad de energía térmica necesaria para fundir un determinado material de carga Q_m , el calor de fusión para convertirlo de sólido a líquido Q_l , y el calor para elevar el metal fundido hasta la temperatura deseada para el vertido Q_{sh} [9].

$$Q_{th} = Q_m + Q_l + Q_{sh}$$

Ecuación 12 [9]

Utilizando la carga máxima de 2 kg; el calor específico del estaño de $228 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ [24]; la temperatura de fusión de 232°C [24] y la temperatura ambiente de 27°C , se tuvo un resultado de 91,020 kJ.

$$Q_m = m * C_p(T_1 - T_0)$$

Ecuación 13

Donde,

m = carga total del metal, [kg];

$C_p = \text{calor específico del metal, } \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right];$

$T_0 = \text{temperatura inicial, } [^\circ C];$

$T_1 = \text{temperatura final, } [^\circ C].$

Para determinar el calor latente, se utilizó la carga máxima y el calor latente específico del estaño de 59,5 kJ/kg [24]. Se obtuvo un calor de 119 kJ.

$$Q_l = m * C_{pl} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde,

$C_{pl} = \text{calor latente específico del metal, } \left[\frac{kJ}{kg} \right].$

Finalmente, se obtuvo un Q_{sh} de 91,2 kJ empleando la carga máxima del estaño, el calor específico del metal y la elevación de temperatura desde la temperatura de fusión de 200 °C. En definitiva, se tiene un calor total de 301,22kJ.

$$Q_{sh} = m * C_p(T_2) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde,

$T_2 = \text{temperatura final, } [^\circ C].$

Este valor es de utilidad para calcular el tiempo de fundición del metal, el cual está regido por la **Ecuación 16**, dando como resultado un tiempo de fundición de aproximadamente 5 minutos.

$$t_{fund} = \frac{Q_{th}}{P} \quad \text{Ecuación 16}$$

Aislante y coraza

Considerando el diseño propuesto por Palma Mercado [38], para sostener las resistencias térmicas en el horno se seleccionaron porta resistencias de cerámica [47]; mientras que una manta refractaria es la encargada de aislar el calor generado, recubriendo todo el horno con un espesor de 9 cm. Finalmente, la coraza está constituida por acero inoxidable fundido.

Dimensiones del horno

Se optó por diseñarse un horno rectangular, el cual está condicionado por: el tamaño del crisol, los porta resistencias (con dimensiones de 12x12cm [47]), el espesor de la manta refractaria y la lámina de acero. Adicionalmente, se diseñó una tapa para introducir el metal en el crisol, el cual es abierto por medio de bisagras. En la **Figura 30**, se muestran las dimensiones verticales y horizontales.

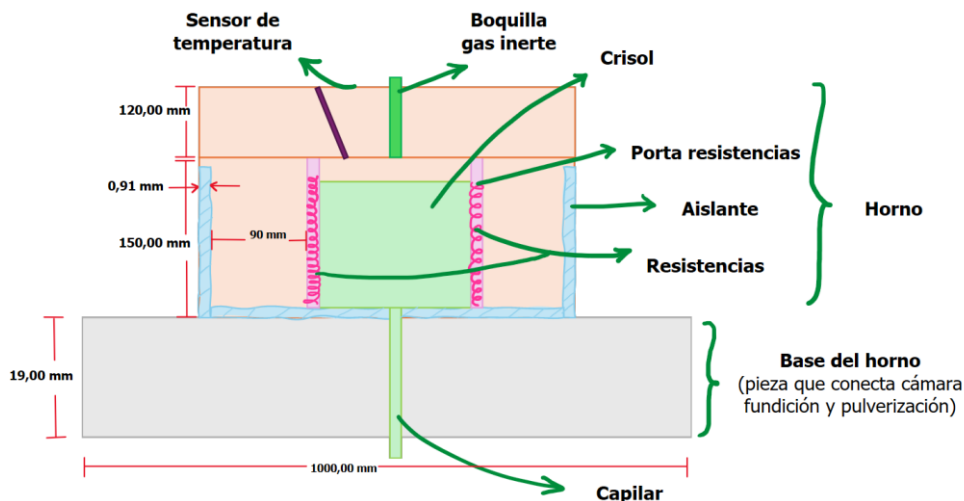


Figura 30. Diagrama de dimensiones para el diseño del horno.

8.3.2 Fase II - Cámara de pulverización y recolección

8.3.2.1 Control atmosférico

Para el diseño de la máquina se implementará un sistema de barrido para garantizar condiciones ambientales más precisas, es decir, sin ingreso de componentes ni elementos externos como aire.

La inertización es el proceso mediante el cual se introduce un gas inerte en un entorno determinado para desplazar o purgar los gases reactivos, como el oxígeno, y así evitar reacciones químicas no deseadas (véase **Figura 31**). Este proceso se utiliza en diversas aplicaciones industriales, entre las que se incluyen la soldadura, el almacenamiento de productos químicos y la protección de materiales sensibles.

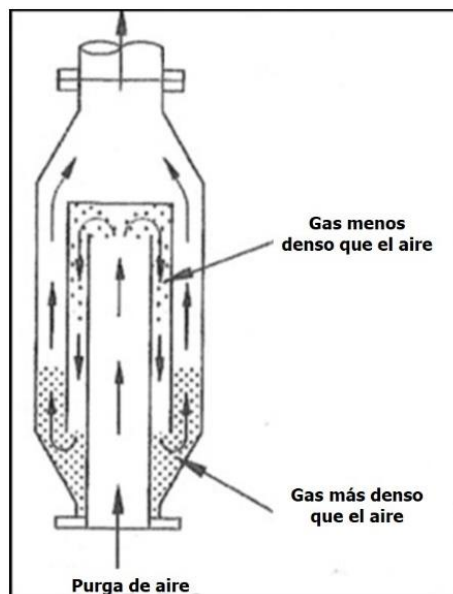


Figura 31. Esquema del método de barrido [48].

De acuerdo con un artículo acerca de la influencia de la adición de gas inerte en los índices de propagación de deflagraciones metano-aire, se demostró que las mezclas inflamables con una atmosfera de gas inerte tuvieron una disminución de la presión de explosión tanto experimental como adiabática [49]. Por lo tanto, se puede reafirmar que una atmosfera controlada por gases inertes ocasiona que los elementos tengan menor reacciones entre ellos y esto es lo que se desea en la cámara de pulverización.

Sistemas como este se mencionaron previamente en los métodos del estado del arte como el de atomización ultrasónica por refrigeración de Ł. Źrodowski, donde se implementó el argón para volver inerte el contenedor [12].

La inertización para este trabajo se dará mediante el argón por su bajo costo a comparación de otros gases inertes, además de su fácil disponibilidad. Es importante resaltar que, para utilizar este tipo de gas y considerando el ambiente en el cual trabaja, requiere una boquilla con propiedades que permitan una alta resistencia a la corrosión y durabilidad. Es por esto que se efectuó una investigación en la web y se tomó de una plataforma de modelos gratuitos, una boquilla de latón cepillado (ver **Figura 32**). Esta misma boquilla es la misma que se colocará para empujar el metal fundido en el horno.

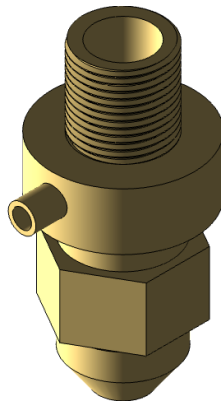


Figura 32. Boquilla de latón cepillado, importada de GrabCAD [50].

Al igual que la boquilla, la pipeta que suministrará el argón y la electroválvula que regula la salida del gas, fueron sacadas de la misma plataforma y se presenta en la **Figura 33**.

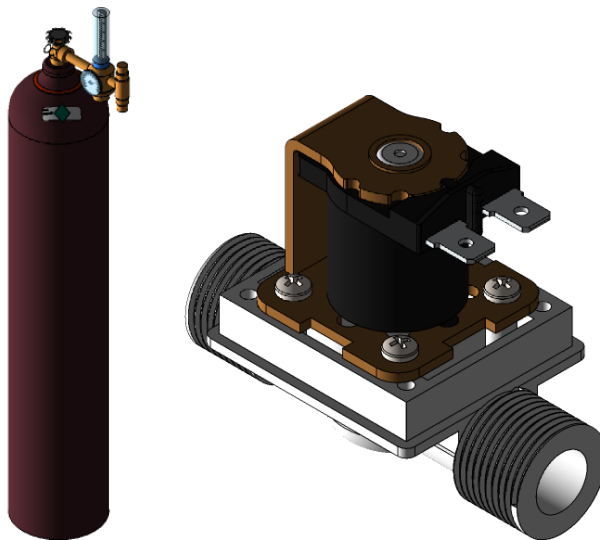


Figura 33. Pipeta suministro de gas inerte [51] y electroválvula [52].

Todo este proceso y método intentará entonces mitigar el impacto del exterior y disminuir cualquier efecto relacionado con la oxidación. Respecto a esto, se estudian los diagramas de Ellingham. Este explica que a mayor temperatura en la que se encuentre un metal, mayor es su reactividad con el oxígeno.

Cabe resaltar que al trabajar con un gas como el argón puede existir el riesgo de la asfixia, ya que al tratarse de un gas no tóxico y en este caso inoloro, reduce la concentración normal de oxígeno en el aire por lo que su exposición o inhalación ocasiona que el cuerpo no absorba concentraciones suficientes de oxígeno sin realmente percibirlo, ocasionando posible muerte por asfixia [53].

En el aire hay 0,93% de argón que a presión atmosférica no es tóxico, sin embargo, si alcanza un valor superior al 33%, podría causar la muerte [53]. Es por esto que en esta máquina se tendrá un espacio con ventilación y se aconsejará ubicar un ventilador al lado de la máquina en dirección hacia la ventana para disminuir cualquier concentración de argón que pueda salir de las diferentes etapas del proceso.

8.3.2.2 Análisis del chorro de agua

Con la finalidad de tener precisión en los modelos matemáticos que regirán el diseño de la máquina, se debe de entender el comportamiento del fluido (el chorro de agua) antes de la colisión con el metal. Según el estudio de la dispersión del chorro de agua de Asgarian [34], el principal fenómeno físico que permite la generación de partículas metálicas es a través de la transferencia de momentum; que se define como la cantidad de movimiento transferido de un fluido a otro.

El autor hace énfasis en que el chorro de agua tiene un comportamiento bifásico (agua y gas) puesto que, cuando el agua emerge de la boquilla a gran velocidad, esta arrastra el gas circundante y provoca la dispersión del agua, formando ligamentos de agua y finalmente gotas, las cuales impactan con el chorro de metal fundido (véase **Figura 34**). Este análisis influye en el flujo de momentum total \dot{M} , puesto que sería la sumatoria del momentum generado por el agua y el gas circundante.

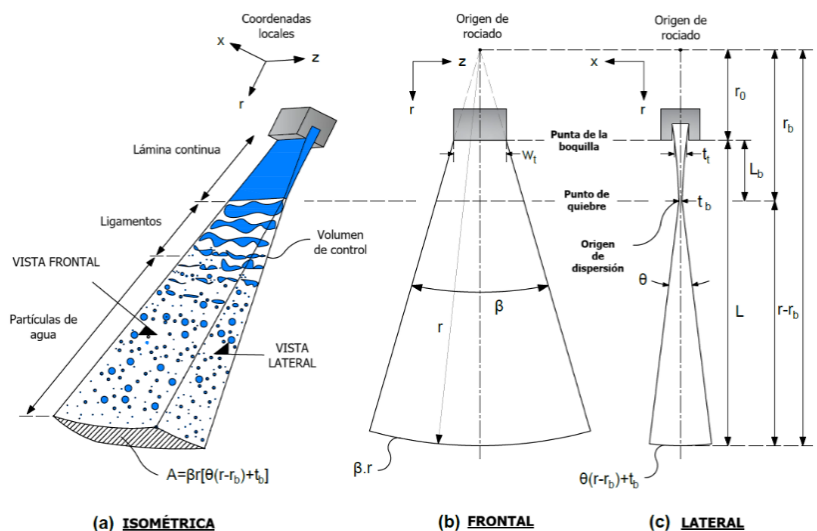


Figura 34. Esquema de una boquilla plana en abanico; (a) isométrico, (b) frontal y (c) lateral. Tomado de [34].

Adicionalmente, en dicha investigación proponen modelos matemáticos que permiten determinar tanto la velocidad del agua y del gas como los momentum generados por el chorro de agua a presión. Estos modelos fueron contrastados con pruebas experimentales para calcular su exactitud, obteniendo un valor del 7% de error respecto a los experimentales.

En la **Figura 34** (b) y (c), se pueden observar las variables utilizadas del chorro de agua para la formulación de las ecuaciones 17-22. La velocidad de la partícula del agua (V_l) se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_l = V_{lb} e^{-\lambda(r-r_b)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,

V_{lb} = velocidad de la partícula de agua en el punto de quiebre, $\left[\frac{m}{s}\right]$;

λ = constante, $[1/m]$;

r = distancia de la pulverización medida desde el origen de la dispersión, $[m]$;

r_b = distancia desde el origen de rociado hasta el punto de quiebre, $[m]$;

Para calcular la velocidad del gas, Asgarian formuló la **Ecuación 18**:

$$V_g^2 = \frac{K_1 V_{gb}^2 - K_2 (V_l - V_{lb})}{r[\theta(r - r_b) + t_b]} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde,

K_1 = constante 1, $[m^2]$;

K_2 = constante 2, $[m^3/s]$;

θ = ángulo de dispersión, $[rad]$;

t_b = espesor en el punto de quiebre, $[m]$;

V_{gb} = velocidad del gas en el punto de quiebre, $[m/s]$.

Debido a que la velocidad no cambia significativamente desde la región de lámina continua hasta el punto de ruptura, V_{lb} puede estimarse mediante la **Ecuación 19**:

$$V_{lb} = 1,3P^{1/2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde,

$P = \text{presión, [kPa]}$.

Finalmente, las magnitudes de momentum (M) y flujo de momentum (\dot{M}) se definen como:

$$M = |\dot{m}V| = \phi\rho VA \quad \text{Ecuación 20}$$

$$\dot{M} = \frac{1}{A}M = \phi\rho V^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde,

$\phi = \text{flujo volumétrico (del agua o del gas)}$;

$A = \text{área de rociado, [m}^2\text{]}$;

$\rho = \text{densidad del fluido (del agua o del gas), } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$;

$V = \text{velocidad del fluido (del agua o del gas), } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$.

Finalmente, por teoría de mecánica de fluidos el momentum efectivo que impacta en un cuerpo siempre será perpendicular a su superficie. La **Ecuación 22** define el flujo de momentum efectivo.

$$M_{eff}^{\dot{}} = \sum \dot{M} * \text{sen } \alpha \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde,

$\alpha = \text{ángulo de ápex, } [^\circ]$.

El uso de estas ecuaciones fue de utilidad para calcular la velocidad promedio de la partícula metálica posterior a la colisión. Estas ecuaciones serán utilizadas para determinar la velocidad promedio de la partícula y el caudal del agua, esto se explica en profundidad en el apartado **8.3.2.4**.

Por último, Asgarian [34] estudió la relación entre la distancia generada por los chorros de agua y el flujo de momentum sometidos a diferentes presiones. En la **Figura 35**, se muestra un comportamiento asintótico en donde a mayor r menor flujo de momentum. También se observa cómo el momentum aumenta con el incremento de la presión. El autor recomienda como parámetro de diseño un $r > 0,06 \text{ m}$ para máquinas destinadas a escala de laboratorio e industriales; esto proporciona la mayor cantidad de momentum posible e influye en la reducción del tamaño de partícula.

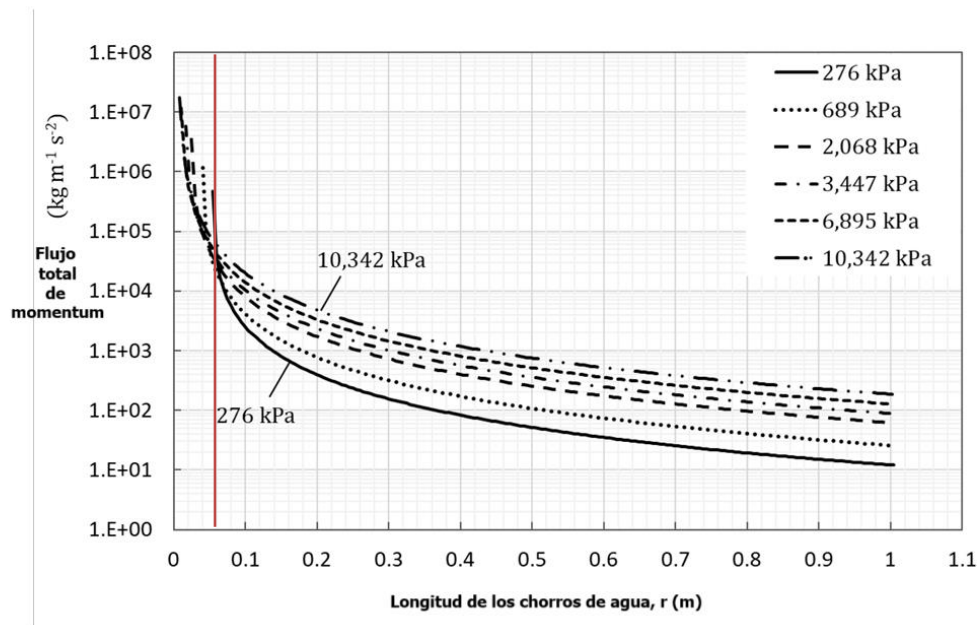


Figura 35. Flujo de momento total del chorro de agua en función de la presión y de la distancia radial desde la boquilla. Tomado de [34].

8.3.2.3 Parámetros iniciales y selección de boquillas

En este apartado se determinó la presión deseada, las distancias entre las boquillas y el chorro de metal fundido (S), longitud del chorro de metal fundido (H) y el ángulo de ápex (α). También se seleccionaron las boquillas para la presión deseada. Esta información fue tomada a partir de diferentes trabajos de grado y artículos científicos.

Presión deseada

La selección de la presión es un factor determinante al momento de diseñar la máquina puesto que, según la literatura hay una estrecha relación entre la presión y el tamaño de partícula. En el artículo Physical and Mathematical modeling of water atomization for metal powder production [34], varios autores presentan ecuaciones empíricas que determinan el percentil 50 de la distribución de tamaño de partícula (d_{50}) en función de la presión del agua (P_w) (véase **Tabla 18**).

Tabla 18. Ecuaciones empíricas que relacionan d_{50} y P_w [34].

| Ecuaciones empíricas para d_{50} | |
|------------------------------------|---|
| Autores | Ecuación |
| Small y Bruce | $d_{50} = \ln \left(\frac{P_w}{k_1} \right)^n$ |
| Dunkley y Palmer | $d_{50} = \frac{k_4}{P_w^n}$ |
| Seki | $d_{50} = 114P_w^{-0,58}$ Chorro anular $d_{50} = 68P_w^{-0,56}$ Chorro en V |
| Bergquist | $d_{50} = k_7 \frac{\sigma_M^{0,8} \mu_M}{P_w^{0,8} \sin \alpha} \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_M} \right)^{-0,043}$ |
| Persson | $d_{50} = k_8 \frac{\sigma_M^{0,8} \mu_M^{0,93} D_M^{0,21}}{P_w^{0,98} \sin \alpha} \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_M} \right)^{-0,04}$ |

| Ecuaciones empíricas para d_{50} | |
|------------------------------------|---------------------------|
| Autores | Ecuación |
| Asgarian | $d_{50} = 893P_w^{-0,94}$ |

Asgarian [34] complementa su teoría empírica sobre la relación entre presión y tamaño de partículas realizando un experimento, en el cual se muestra el comportamiento del bismuto de estaño (Bi-Sn 42%) a tres presiones: 2,07 MPa; 2,76 MPa; 3,45 MPa. El resultado se observa en la **Figura 36**. Aquí se muestra que, a mayor presión del agua, se tendrá menor tamaño de partícula.

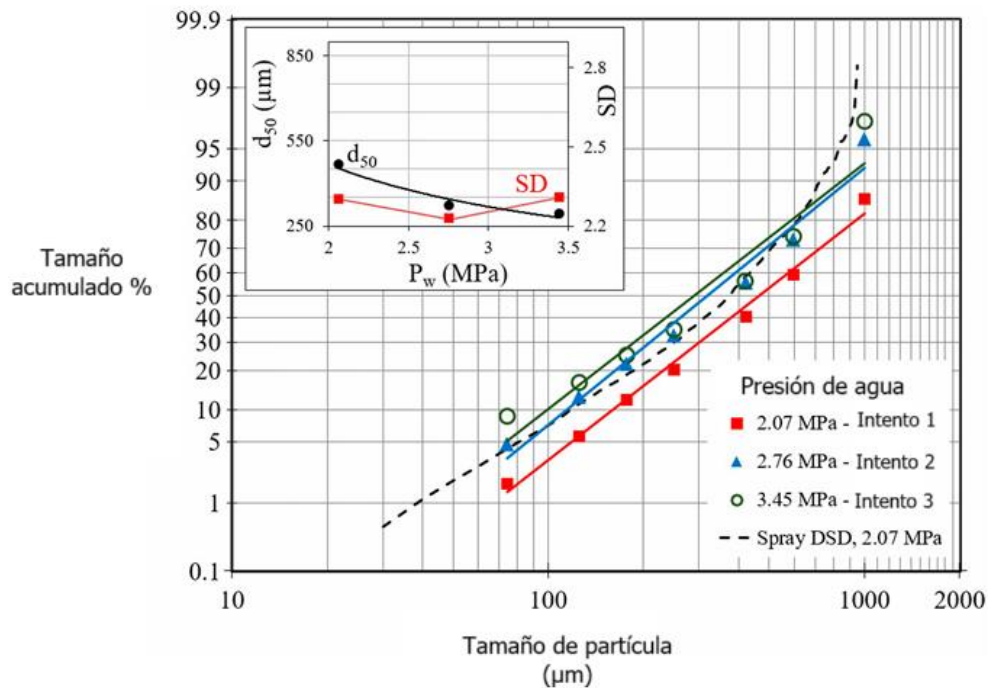


Figura 36. Relación entre la presión y el tamaño de partícula. Tomado de [34].

Por otro lado, según Fernández en su trabajo de grado sobre el diseño y construcción de un atomizador de agua para la obtención de polvos de aluminio [39], en la atomización de agua comercial se manejan presiones de 5 MPa hasta 20 MPa, para un tamaño de partícula promedio de 150 hasta 30 μm respectivamente.

Para la determinación de la presión a la cual se debe operar la máquina a diseñar, también se tuvo en consideración que existe un mayor campo de acción en la industria de

la PM para tamaños de partículas inferiores a 150 μm (véase **Figura 37**); por lo tanto, trabajar con las presiones altas debería ser la opción más viable. No obstante, presiones de 20 MPa son difíciles de generar y de controlar para el propósito de este trabajo, el cual es diseñar a escala de laboratorio, por lo que se optó por reducir la presión y trabajar únicamente con 10 MPa, lo cual daría con un diámetro estimado de 102 μm utilizando la ecuación de Asgarian.

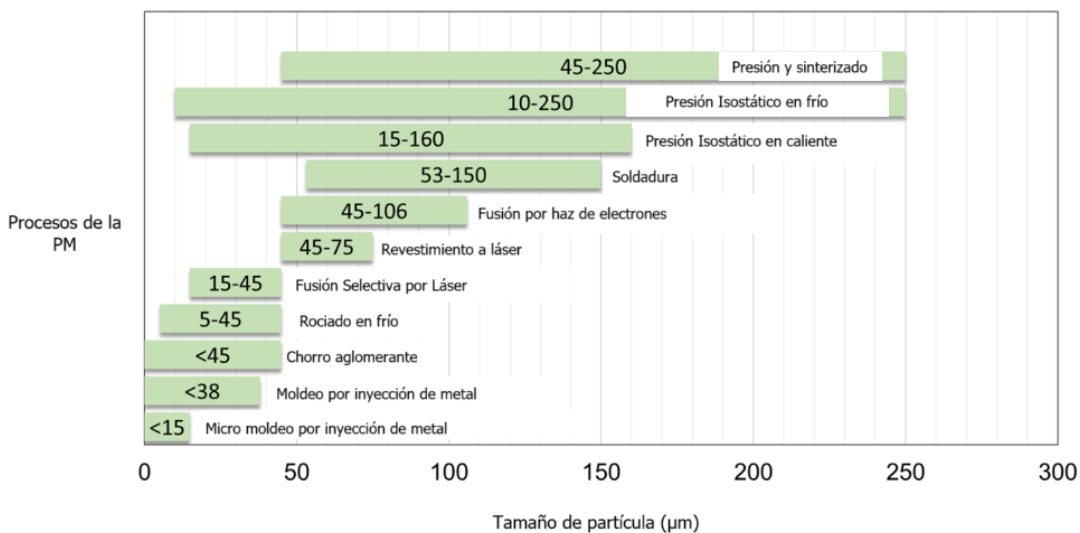


Figura 37. Rangos de tamaño de partícula para usos en la pulvimetalurgia.
Tomado de [34]

Ángulo de ápex

El ángulo de ápex es el canto que se produce entre la longitud del chorro de agua y el chorro de metal fundido (véase **Figura 24**). De acuerdo con la literatura, este ángulo tiene una relación con la transferencia de momentum. Según Asgarian [54], quien realizó un estudio para analizar este comportamiento, concluyó que, a mayor ángulo, se obtendrá una mayor transferencia de momentum; por ende, facilita la generación de partículas pequeñas. No obstante, el autor destaca que puede ser riesgoso asumir en el diseño ángulos con bastante apertura, dado que puede provocar una solidificación prematura en

el chorro de metal fundido. En la **Figura 38** se muestra el comportamiento del chorro de agua a diferentes ángulos de ápex. En ella, se observa que a partir de 35° el chorro de agua hace un retorno hacia la entrada del metal fundido; lo que genera un constreñimiento en el metal líquido por la alta energía que posee el chorro de agua.

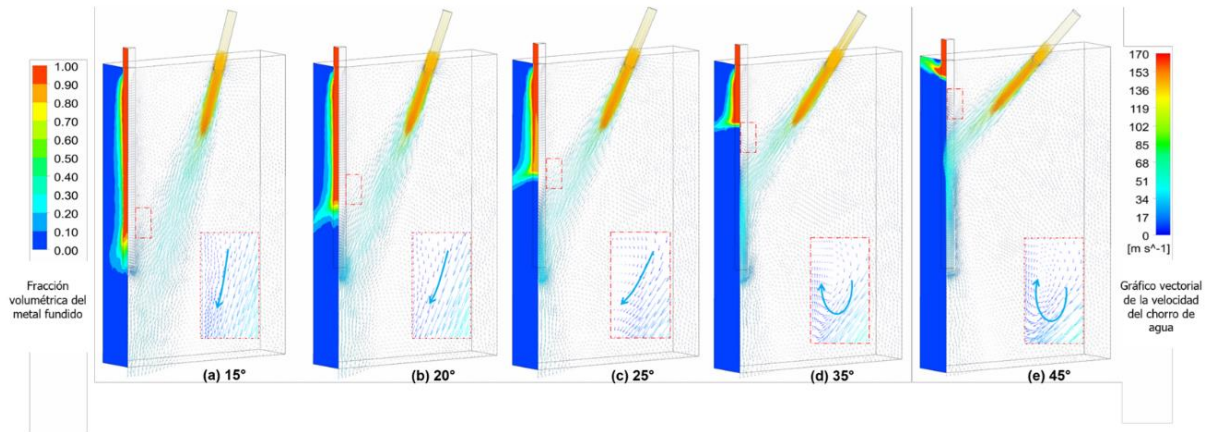


Figura 38. Diagrama de contorno de la fracción volumétrica del metal líquido y diagrama vectorial de la velocidad del chorro de agua con distintos ángulos de ápex: (a) 15° ; (b) 20° ; (c) 25° ; (d) 35° y (e) 45° . Las regiones resaltadas en rojo están ampliadas del vector de velocidad. Las flechas azules indican los vectores de velocidad del en diferentes casos. Tomado de [54].

Teniendo en cuenta el análisis previo, se consideró para el diseño de la máquina un ángulo de ápex de 30° .

Distancias entre las boquillas y el chorro de metal fundido (S) y longitud del chorro de metal fundido (H)

Para la determinación de estas dimensiones se tuvo presente la investigación realizada por Asgarian [34], la cual relaciona la distancia del chorro de agua (r) y las

distancias entre las boquillas y el chorro de metal fundido (s) (véase **Figura 24** y **Ecuación 23**).

$$r = L + r_o = \frac{S}{\sin\alpha} + r_o \quad \text{Ecuación 23}$$

Teniendo de referencia lo mencionado en el apartado **8.3.2.2**, se asume un $r = 0,08 \text{ m}$ y un $r_o = 3,4 \times 10^{-3} \text{ m}$. Puesto que se estableció un ángulo de ápex $\alpha = 30^\circ$, se determinó el valor de S , con un resultado de $0,0383 \text{ m}$.

Para calcular H , utiliza la **Ecuación 24**:

$$H = H_o + H_1 = (r_o \cos \alpha) + (L \cos \alpha) = r \cos \alpha \quad \text{Ecuación 24}$$

El valor de H es de $0,06 \text{ m}$.

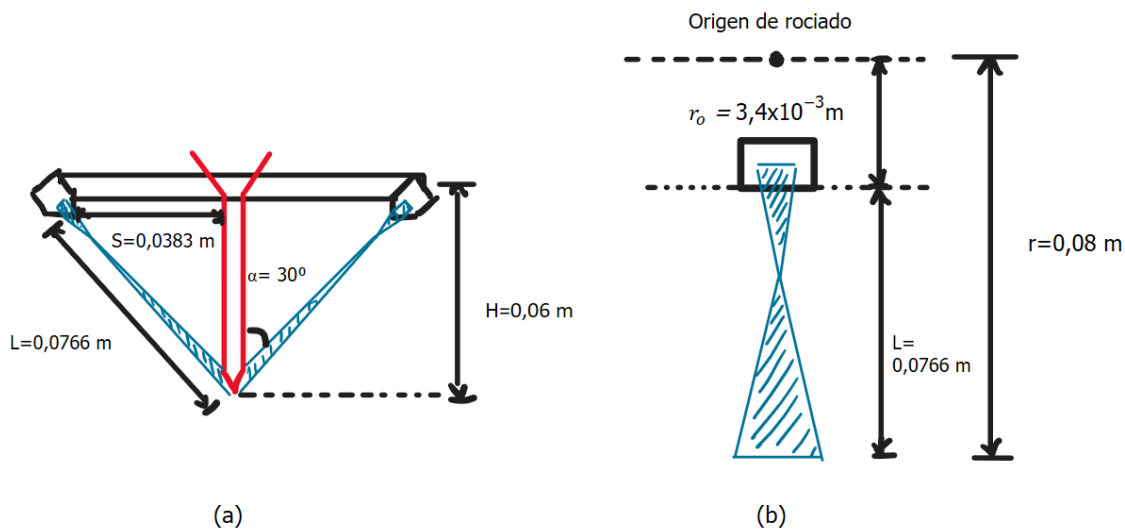


Figura 39. a) Esquema del proceso de atomizado donde se muestran las variables calculadas. b) Esquema lateral de la boquilla y el chorro de agua a presión.

Selección de boquillas

En la literatura autores como Asgarian [34] y Fernandez [39] tienden a escoger boquillas de rociado plano para procesos de atomización con agua; conocidas en inglés como "Flat fan spray" por el contacto directo del chorro en forma de abanico con el metal fundido. Estas presentan distintas configuraciones, conocidas como disposición en V abierta y cerrada (véase **Figura 40**). Con el objetivo de reducir la ocupación de espacio, se eligió una configuración V abierta (dos boquillas equidistantes).

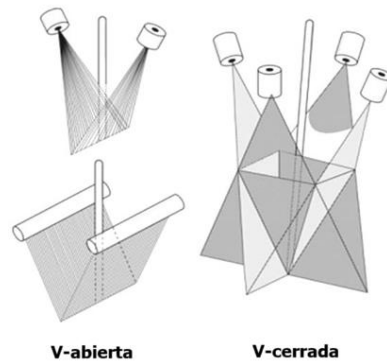


Figura 40. Arreglo de las boquillas. Tomada de [39].

Adicionalmente, otro factor diferencial al momento de la selección de las boquillas es el ángulo que se forma en el chorro. De acuerdo con Asgarian y su investigación que relaciona la transferencia de momentum con dicho canto de esparcimiento β [34] (véase **Figura 34**). En la **Figura 41** se puede interpretar que a menor ángulo se va a tener un aumento en el momentum.

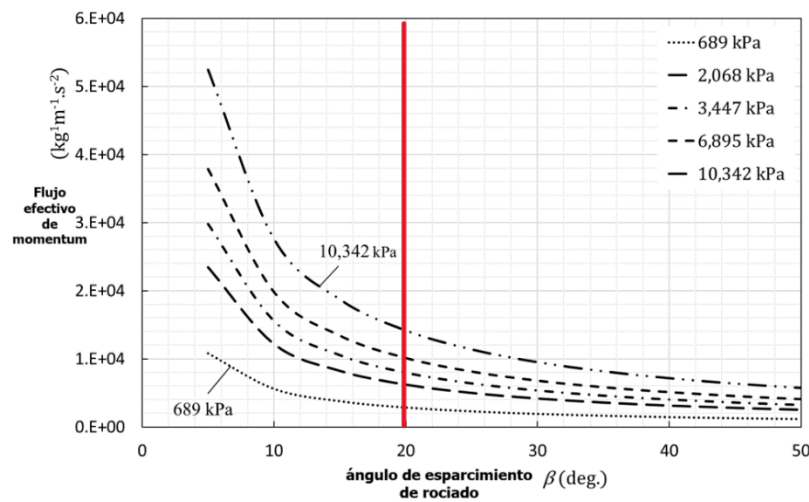


Figura 41. Flujo de momento efectivo total de una pulverización en función de la presión y del ángulo de rociado. Tomado de [34].

Finalmente, cabe destacar que la reducción de diámetro que se tenga en la boquilla influye en la velocidad y la presión a la salida.

Teniendo presente estos aspectos, se realizó una investigación en la web, en donde la marca conocida como *Spraying Systems* se caracteriza por realizar y manufacturar el diseño de boquillas que mecánicamente son capaces de soportar altas presiones [55]. Por consiguiente, se buscó en su catálogo boquillas que cumplan con resistencia de presión superiores a 10 MPa (1450 psi); asimismo con un ángulo de esparcimiento menor a 20° . Como resultado, se seleccionó una boquilla de rociado plano-abanico modelo $\frac{1}{4}$ MEG-1504 (véase **Figura 42**). En la **Tabla 19**, se muestran las respectivas especificaciones. Para el control de la salida de agua, se utilizará una electroválvula, la cual se especificó en el apartado **8.3.4**.

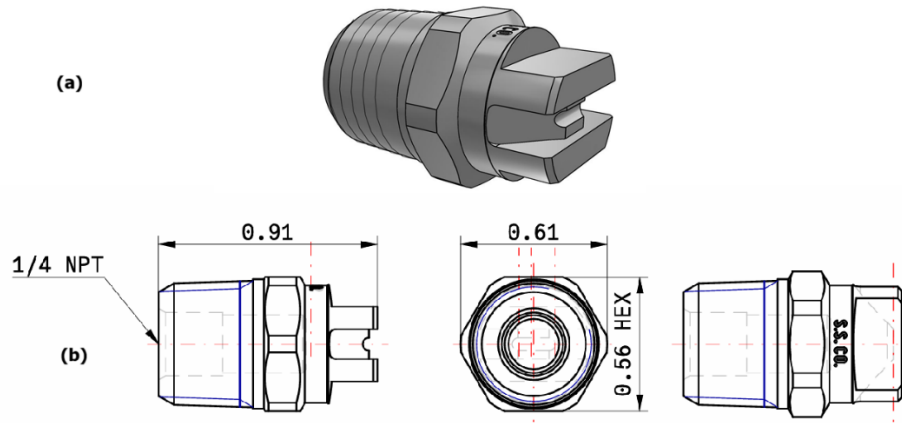


Figura 42. Boquilla ¼ MEG 15-04. (a) Vista isométrica. (b) Vistas frontal, lateral y superior. Tomada de [55]

Tabla 19. Especificaciones de la boquilla seleccionada [55].

| Especificaciones de la boquilla MEG 15-04 | | | | |
|---|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Material | Conexión de entrada (in) | Presiones admitidas (psi) | Ángulo de esparcimiento (°) | Diametro hidráulico D_h (m) |
| Acero inoxidable | 1/4 | 40-3000 | 15 | 0,0021 |

8.3.2.4 Colisión (atomización)

La ciencia detrás de la colisión entre el agua y el metal fundido ha sido un tema de investigación puesto que los fenómenos físicos que interactúan en el proceso suceden en una centésima de segundo. Por consiguiente, se recurrió a un experimento realizado por Hikita, Ichimura y equipo [56]; en donde fotografiaron la pulverización de una aleación de 42Sn-58Bi por medio de un chorro de agua. Los autores hacen énfasis que el principal fenómeno es la transferencia de momentum, algo que concuerda con lo analizado por Asgarian [34]. Además, mencionan un parámetro adimensional que describe la fragmentación de un fluido; conocido como el número de Weber, mencionado

anteriormente (véase la **Ecuación 25**). El número de Weber es admisible con $N > 10$ y menor a 300. Esto quiere decir que, si se extrapola esta fórmula a la atomización por agua y el número queda en este rango, se fragmentará el chorro de metal por las altas velocidades del agua.

$$We = \frac{\rho V^2 d_c}{\sigma}$$

Ecuación 25

Donde,

$\rho =$ densidad del agua $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$;

$V =$ velocidad del agua $\left[\frac{m}{s}\right]$;

$d_c =$ diámetro del capilar del metal fundido [m];

$\sigma =$ tensión superficial del metal $\left[\frac{N}{m}\right]$.

Sobre lo que concierne con los resultados del experimento los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- La distancia del chorro de agua afecta la producción de partículas metálicas puesto que se disminuye la velocidad del agua. Este fenómeno concuerda con los resultados de Asgarian [34].
- Al momento de la colisión (en un tiempo de 1 ms), se forman fragmentos de metal fundido donde alrededor del 90% del volumen del metal fundido fluye dentro del rociado de agua.
- En un tiempo de 0,10 ms; se evidenciaron ligamentos de metal fundido que fluían por encima del chorro de metal fundido. Esto se atribuye a una micro explosión generada por el cambio de fase del agua líquida a vapor sobrecalentado.
- La mayoría de las partículas metálicas son generadas por las altas velocidades del rociado con agua; mientras que solo una pequeña cantidad de partículas son formadas por las micro explosiones.

Estos hallazgos concuerdan con el artículo de Miyasaki et al. [57] acerca del comportamiento térmico de una gota de agua con el estaño fundido. En él, se muestran las interacciones que pueden tener las gotas de agua en la colisión dependiendo de la proximidad con el chorro de metal fundido (véase **Figura 43**). La mayor producción de partículas metálicas se formará por una interacción sutil a altas velocidades.

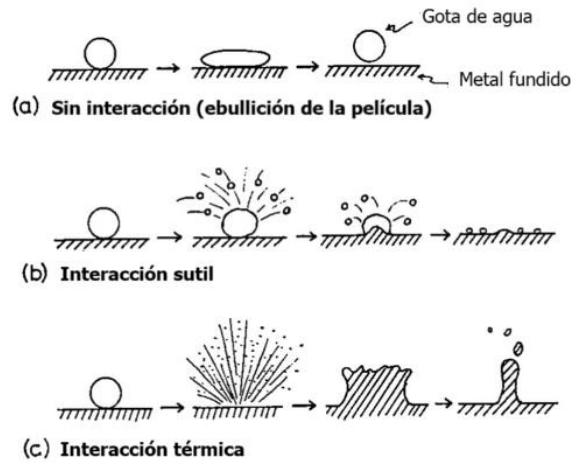


Figura 43. Interacción durante la colisión. a) sin interacción b) interacción sutil c) interacción térmica. Modificado de [57].

Sabiendo esto, es posible determinar la velocidad promedio de la partícula metálica después de la colisión utilizando la transferencia de momentum. El autor Zhonghui y su equipo [54], utilizan la expresión matemática vista en la **Ecuación 26** para relacionar un estado ideal en el cual el momentum del chorro de agua es transferido en su totalidad al momentum del metal.

$$M_w = n * M_m$$

Ecuación 26

Donde,

$$M_w = \text{momentum del chorro de agua}, \left[kg * \frac{m}{s^2} \right];$$

$$M_m = \text{momentum del metal}, \left[kg * \frac{m}{s^2} \right];$$

$n =$ número de partículas de metal generadas por cada gota de agua.

Teniendo en cuenta el apartado **8.3.2.2**, la igualdad se puede reescribir como:

$$M_{eff} \cdot A = n \cdot (m_m V_m) \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\frac{M_{eff} \cdot A}{n \cdot m_m} = V_m \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde,

$M_{eff} =$ transferencia de momentum efectivo del chorro de agua, $\left[\frac{kg}{m \cdot s^2}\right]$;

$A =$ área del chorro de agua, $[m^2]$;

$m_m =$ flujo másico del metal, $\left[\frac{kg}{s}\right]$;

$V_m =$ velocidad de las partículas de metal, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

8.3.2.5 Solidificación de la partícula metálica y dimensionamiento de la máquina

La solidificación de la partícula metálica es un parámetro fundamental para el dimensionamiento de la máquina, puesto que se debe garantizar que las gotas metálicas que se producen posterior a la colisión y a la fragmentación tengan el tiempo suficiente de pasar de una temperatura de sobrecalentamiento a una temperatura admisible. La razón detrás de esto reside en tres aspectos: (1) previene aglomeraciones entre las partículas, dado que, al estar a tan altas temperaturas, las partículas metálicas son más reactivas; (2) protege a los operarios al momento de la recolección; (3) asegura que las partículas se solidifiquen y sean menos propensas a deformarse al chocar con las paredes de la cámara de atomización [38].

En la **Figura 44**, se muestra un esquema para determinar los componentes de la velocidad de la partícula. En la **Ecuación 29** y **Ecuación 30** se muestran algebraicamente la altura y la anchura de la cámara de atomización.

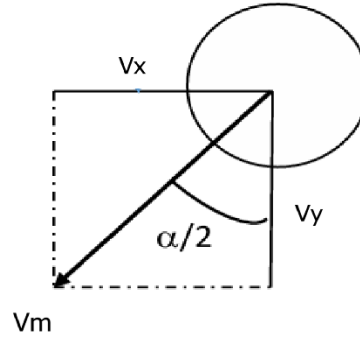


Figura 44. Esquema de la descomposición de la velocidad de la partícula. Modificado de [39].

$$y = V_m * t_{total} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$x = 2 * V_x * t_{total} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde,

y = altura de la cámara de atomización, [m];

x = anchura de la cámara de atomización, [m];

V_m = velocidad media de la partícula metálica, $\left[\frac{m}{s}\right]$;

t_{total} = tiempo de solidificación total, [s];

V_x = componente horizontal de la velocidad de la partícula metálica, $\left[\frac{m}{s}\right]$.

En un comienzo, se determinó el flujo másico del metal que cae por el capilar, el cual está expresado mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_m = \rho * V * A$$

Ecuación 31

Donde:

$\rho =$ densidad del metal, $[kg/m^3]$;

$V =$ velocidad del metal, $[m/s]$;

$A =$ área por donde pasa el metal fundido, $[m^2]$.

Utilizando el teorema de Torricelli [38], se puede calcular la velocidad de un fluido que pasa por un tubo mediante la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{2 * g * h}$$

Ecuación 32

Donde,

$g =$ gravedad, $[m/s^2]$;

$h =$ altura del capilar, $[m]$.

Sabiendo que se tiene una altura del metal liquido de 12,2 cm (altura del capilar + caída libre del metal hasta que hace contacto con el chorro de agua), entonces se tiene una velocidad de 1,55 m/s. Por otro lado, se conoce que el orificio del crisol es de 4 mm, por consiguiente, su área es de $1,2567 \times 10^{-5} m^2$; utilizando estos valores y una densidad del estaño de $7365 kg/m^3$ [24], se obtiene un flujo másico de 0,14 kg/s.

Gracias a este dato, se calculó la velocidad promedio de la partícula utilizando la **Ecuación 28**. Teniendo un área de rociado de $2,98 \times 10^{-5} m^2$, un flujo de momentum de $321606,37 \frac{kg}{m*s^2}$ (para más detalle del proceso véase **ANEXO 5**); y asumiendo que por cada gota de agua se generan 1,3 gotas de metal, entonces se tiene una velocidad promedio de 52,66 m/s.

Luego de esto, se procedió a determinar el tiempo de solidificación de la partícula. Palma Mercado [38], empleó un tiempo de solidificación desde la temperatura de fusión hasta una temperatura admisible de 50 grados Celsius. Este proceso se calculó por medio de transferencia de calor; en ello, se asume que se produce un fenómeno de convección ya que la transferencia de calor por conducción y radiación son despreciables. Dado que el agua y el gas circundante inciden en el proceso de solidificación, se escogió solamente la interacción entre el gas circundante con la partícula puesto que el gas tiene menos capacidad de enfriamiento que el agua, por lo tanto, es un parámetro crítico.

Con base a Cengel [58], se usó el concepto de sistemas concentrados para determinar el tiempo de solidificación de la partícula; el cual, relaciona la transferencia de calor de un cuerpo en un diferencial de tiempo y la energía del cuerpo durante un diferencial de temperatura. La solución de la ecuación diferencial se ve en la **Ecuación 33**.

$$t_{sol} = \frac{\ln \left| \frac{T_{(t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right| * m_m * C_{pm}}{-h * A_{sm}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde,

$T_{(t)}$ = temperatura en un determinado tiempo, [°C];

T_{∞} = temperatura ambiente, [°C].

T_i = temperatura inicial del cuerpo, [°C].

m_m = masa de la partícula metálica, [kg];

C_{pm} = capacidad calorífica del metal, $\left[\frac{J}{kg * ^\circ C} \right]$;

A_{sm} = área superficial de la partícula metálica, [m²];

h = coeficiente de convección, $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$.

Asumiendo que las partículas metálicas son esféricas, entonces se obtiene una masa y un área superficial de $1,01 \times 10^{-8}$ kg y $1,01 \times 10^{-8}$ m² respectivamente. Posteriormente, se

calculó el coeficiente de convección, el cual obtuvo un valor de $3817,75 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$. Finalmente, el tiempo de solidificación de la partícula es de $0,024 s$ (véase **ANEXO 6**).

Como resultado de utilizar la **Ecuación 29** y **Ecuación 30** con los datos correspondientes, la altura y anchura mínimas de la cámara de atomización es de $1,3 m$ y $0,65 m$ respectivamente; sin embargo, se utilizarán $1,4 m$ y $0,7 m$ por ser conservadores. Además, para el material de la cámara de atomización se optó por acero inoxidable AISI 321, siendo esta recomendada por Cristancho y Estupiñan [59]. Para la cámara de recolección, se optó por un recipiente (balde de agua) que recoja las partículas metálicas y el agua utilizada en el proceso.

8.3.3 Fase III – Suministro de agua

En esta etapa del diseño se determinó la bomba hidráulica más adecuada para el proyecto. Esto se realizó por medio de la ecuación de energía y calculando pérdidas por tuberías. En la **Figura 45**, se muestran la configuración del subministro de agua y sus respectivas medidas. En este, se tendrá un contenedor (véase **Figura 47**) donde se almacenará agua tipo 1, (se usa este tipo de agua con la finalidad de reducir la oxidación de los polvos metálicos a producir. Para una explicación general véase **ANEXO 7**); una bomba que succionará el fluido por medio de tuberías de PVC, y distribuirá el flujo a través de dos mangueras las cuales se conectarán con la cámara de atomización a partir de acoples. Para asegurar la distancia necesaria entre las boquillas y el chorro de metal fundido se diseñó un tubo de acero inoxidable. Adicionalmente, en la **Figura 46** se muestran “tramos” los cuales ayudan a comprender la distribución de los cálculos de pérdidas por fricción.

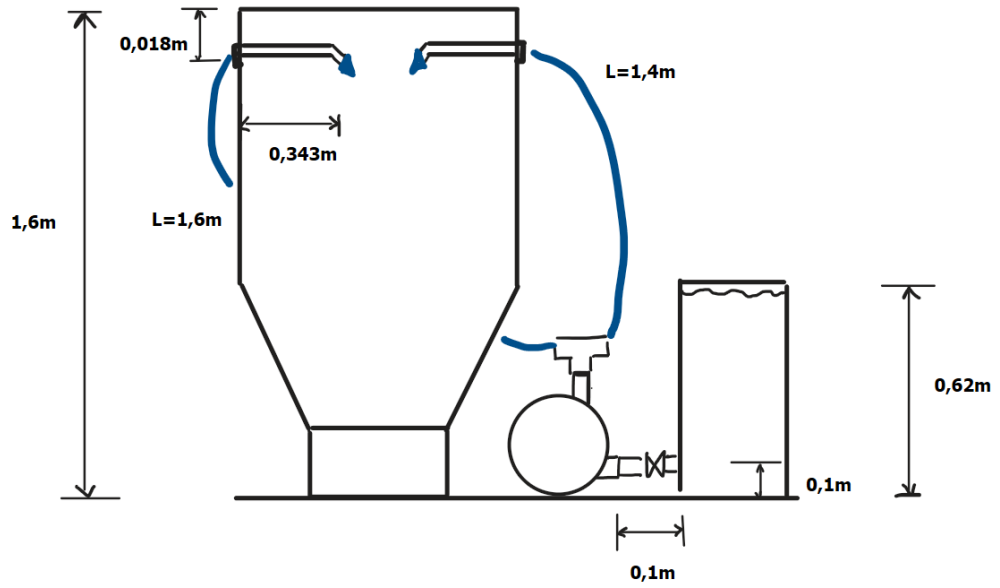


Figura 45. Esquema y medidas del suministro de agua.

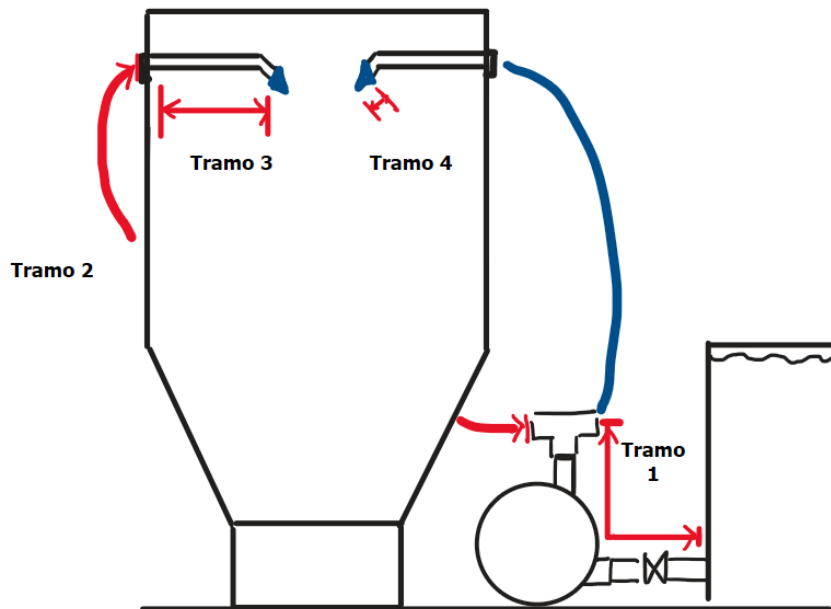


Figura 46. Esquema de los tramos para el cálculo de pérdidas.



Figura 47. Contenedor del agua con sus respectivas medidas [60].

En un principio, se calculó el caudal de operación por medio de la ecuación de continuidad en el tubo de acero inoxidable con la boquilla.

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad \text{Ecuación 34}$$

Debido a que la velocidad 1 se puede reescribir como $V_1 = Q/A_1$, la igualdad se puede reescribir como:

$$Q = A_2 * V_2 \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde,

$Q =$ caudal de operación $\left[\frac{m^3}{s}\right]$;

$A_2 =$ área a la salida del fluido $[m^2]$;

$V_2 = \text{velocidad a la salida de la boquilla} \left[\frac{m}{s} \right]$.

Debido a que se desea una velocidad estimada de 130 m/s a la salida de la boquilla (teniendo en cuenta la presión de 10 MPa y empleando la **Ecuación 19**), y el área a la salida del fluido es de $3,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$; entonces el caudal de operación tiene un valor de $4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Para determinar la potencia necesaria se determinó la cabeza de la bomba utilizando la ecuación de Bernoulli [37]. Para ello, se escogieron dos puntos de operación, el primer punto es en la superficie del tanque lleno; mientras que el segundo es en la salida de la boquilla (véase **Figura 48**).

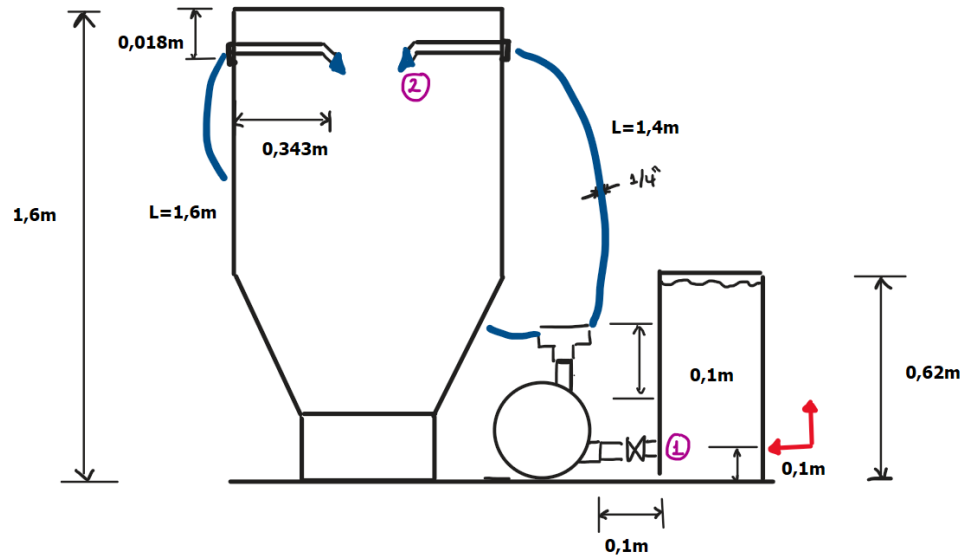


Figura 48. Esquema del suministro de agua con los puntos de operación y eje coordinado.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + w_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum h_L$$

Ecuación 36

Donde,

$P = \text{presión, [Pa]}$;

$\gamma = \text{peso específico, [N/m}^3\text{]} ;$

$g = \text{gravedad}, \left[\frac{m}{s^2}\right];$

$z = \text{altura}, [m];$

$w_b = \text{cabeza de bomba}, [m];$

$h_l = \text{pérdidas por tuberías}, [m].$

Si se despeja la cabeza de bomba y se consideran presiones relativas; la expresión matemática queda de la siguiente manera (véase **Ecuación 37**):

$$w_b = \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum h_L - \frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{Ecuación 37}$$

Cabe resaltar que se anuló la presión de trabajo en 2, puesto que la boquilla está a presión atmosférica. Asimismo, debido a que se tiene el eje coordenado en el punto 1, Z_1 es igual a cero.

Para determinar la presión de trabajo en 1, se realizó un volumen de control en el contenedor de agua, teniendo como de puntos de operación la superficie del tanque y la salida del tanque, las cuales conectan con las tuberías del sistema (véase **Figura 49**). El resultado de la columna de presión de trabajo 1 es de $-0,742 m$ (véase **ANEXO 8**) para más información).

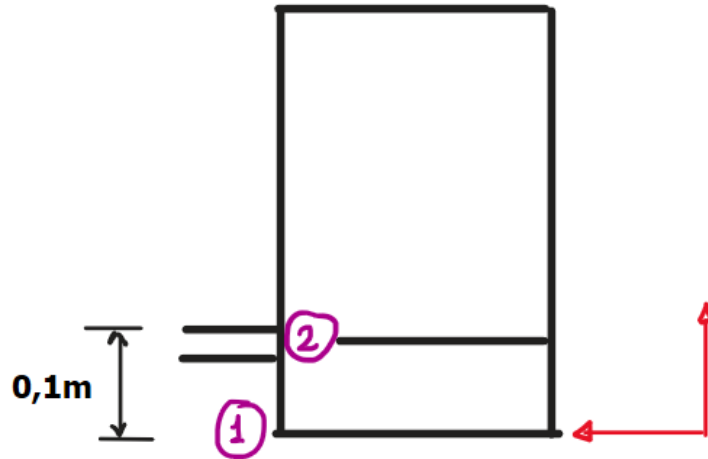


Figura 49. Esquema del contenedor con los puntos de operación y ejes coordenados.

Posteriormente, se calcularon las pérdidas por pared y por accesorios en cada tramo. Para ello se utilizó la **Ecuación 38** y la ecuación de Colebrook para determinar el factor de fricción (véase **Ecuación 39**) [37].

$$h_L = \left(\sum K_L + f * \frac{L}{D} \right) * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde,

K = coeficiente de fricción,

L = longitud de la tubería, [m]

D = diámetro de la tubería, [m]

f = factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde,

ε = rugosidad, [mm];

$Re = Reynolds.$

En la **Tabla 20**, se muestran los factores de fricción de cada tramo y sus respectivas pérdidas. Para el primer tramo se seleccionó un tubo de PVC de 1/2". En él, se presenta un cambio de sección en el tanque, una electroválvula y un accesorio en T. Para el tramo 2, se cambia el material a caucho reforzado debido a que se emplean mangueras de 1/4", por lo que se poseen pérdidas por el cambio de diámetro. Posteriormente, para el tramo 3 se usaron tubos de acero inoxidable de 1/4" los cuales van conectados a las boquillas por medio de roscas. Finalmente, en el tramo 4 se analizan las pérdidas por reducción de diámetro en las boquillas (Los valores de rugosidad y tablas de K_s para cada material se pueden observar en el **ANEXO 9**).

Tabla 20. Cálculos de pérdidas por pared y accesorios

| Cálculos pérdidas por tuberías y accesorios | | | | | | | |
|---|--------------|-----------------|-----------|------------|------------|--------------|-----------|
| Tramo / parámetro | Diámetro (m) | Velocidad (m/s) | Reynolds | $\sum K_L$ | Factor f | Longitud (m) | h_L (m) |
| Tramo 1 (PVC) | 0,0127 | 3,55 | 52674,92 | 2,7 | 0,021 | 0,2 | 1,95 |
| Tramo 2 (Caucho) | 0,00635 | 14,2 | 105349,85 | 0,2 | 0,0239 | 3 | 118,1 |
| Tramo 3 (Acero inoxidable) | | | | 0,8 | 0,0277 | 0,692 | 39,25 |
| Tramo 4 (Acero inoxidable) | 0,0021 | 130 | 318958,73 | 0,55 | 0,027 | 0,046 | 983,19 |

Reemplazando valores se obtiene:

$$w_b = \frac{(130 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} + 1,482 \text{ m} + 1142,49 \text{ m} - (-0,742 \text{ m}) - \frac{(3,55 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

La cabeza de columna de agua de la bomba es de 2005,44 m. Finalmente, se obtuvo una potencia de bomba neta de 12 HP utilizando la **Ecuación 40**:

$$w_b = Q * \gamma * w_b \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde,

$w_b =$ potencia de la bomba, [W];

$Q =$ caudal de operación, $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$;

Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a seleccionar la bomba en referentes comerciales. CatPumps, es una empresa que se dedica a diseñar y manufacturar bombas las cuales abarcan potencias desde 0,24 HP hasta 61,6 HP [61], [62]. Revisando el catálogo, se determinó que el único modelo de bomba que garantiza una potencia de operación igual o superior a 12 HP; a su vez que soporte caudales de 27 litros/min es la bomba de desplazamiento positivo tipo émbolo, modelo 56HSG1. En la **Tabla 21**, se muestran las especificaciones de la bomba.

Tabla 21. Especificaciones de la bomba seleccionada [62].

| Bomba CatPump modelo 56HSG1 | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| Caudal máximo | Potencia de la bomba | NPSH |
| 30,3 L/min | 16,43 HP | 40,91 m |

8.3.4 Fase IV – Control y automatización

Prosa lógica

Mediante el botón de encendido (BE), se prende la máquina. Al momento de encenderse, se activa la pantalla táctil (PNT) y el compresor (C) el cual acciona un cilindro neumático que posee un embolo que impide el paso del metal en el capilar del crisol. Una vez activos, en la pantalla se setea la temperatura para fundir el metal (para el estaño 432°C), se espera que el sensor de cantidad mínima de agua en el tanque se active (S_TAM), el cual alerta si la cantidad de agua es suficiente para utilizar la bomba. Al momento de seleccionar la temperatura, se prende el horno (H) y activa el sensor de temperatura (S_T); este al llegar a 350°C según un sensor comienza dos procesos de manera simultánea, por una parte, se encienden la electroválvula (EV) y la bomba de agua (BA) para que se transporte el fluido a las boquillas. Igualmente, se inicia el proceso de inertización al activarse la válvula ligada a la pipeta de argón que se conecta con la cámara de pulverización (VPAI), llenando esta de un gas inerte más denso que el aire y expulsándolo por el extractor.

Al alcanzar los 432°C seteados en la pantalla y detectados por el sensor, se apaga el compresor (C) lo que genera que se retraiga el embolo del cilindro neumático y se activa la válvula de argón del horno (VPAH), el cual permite que la boquilla de argón ubicada en el crisol genere presión hacia abajo para que todo el metal evacue hacia la cámara de atomización. Aquí, el horno se apaga (H). Ya en la cámara de pulverización se activa el timer por 18 segundos y se asegura que se pulverice todo el material.

Adicionalmente, se tiene un botón de apagado de la máquina (BOFF) y una parada de emergencia (PE).

Entradas y salidas

Teniendo presente la prosa lógica, se determinó el número de entradas y salidas del sistema junto a su respectiva simbología (véase **Tabla 22**).

Tabla 22. Simbología, y tipo de I/O para desarrollo del GRAFCET.

| Traducción de la prosa lógica para GRAFCET | | |
|---|---|-------------------------|
| Símbolo | Descripción | Entradas/salidas |
| BE | Botón de encendido | 5 entradas |
| BOFF | Botón de apagado | |
| PE | Parada de emergencia | |
| S_TAM | Sensor mínimo de agua de tanque | |
| S_T | Sensor de temperatura | |
| C | Compresor | 7 salidas |
| H | Resistencias del horno | |
| EV | Electroválvula de agua | |
| BA | Bomba de agua | |
| VPAH | Válvula pipeta argón horno | |
| VPAI | Válvula pipeta argón sistema inertización | |
| PNT | Pantalla HMI | |

Selección del PLC

La elección de la marca y modelo del PLC se realizó considerando varios factores: el número de entradas y salidas disponibles y los costos. Únicamente se seleccionaron modelos de Allen Bradley y Festo, debido a que la universidad cuenta con software compatible con estas marcas de PLC, como Codesys (3S-Smart, Kempton, Alemania) y Connected Components Workbench (Rockwell Automation, Milwaukee, Estados Unidos). En la **Tabla 23**, se puede observar la comparación entre el modelo Micro 850 de Allen Bradley y el modelo CPX CEC-C1 de Festo con sus respectivos módulos adicionales. Se selecciona el modelo de Allen Bradley por su número de entradas que provee (el cual favorece si se necesita una expansión en el diseño) y su menor costo.


Tabla 23. Comparación de costos de diferentes PLC que satisfacen I/O.

| Marca y modelo | Módulo(s) | I/O totales | Costo neto |
|---|---|--|-----------------------------------|
| Allen Bradley, modelo Micro850 2080-L50E-24AWB [63]. | 2080-IF2 (2 entradas analógicas) [64]. | Inputs: (14 digitales y 2 analógicas) Outputs: (10 digitales) | 816,55 USD [65],[66]. |
| Festo, CPX CEC-C1 [67]. | CPX-8DE-8DA (8 entradas y salidas digitales) [68]; CPX-2AE-U-I (2 entradas analógicas) [69]. | Inputs: (8 digitales y 2 analógicas) Outputs:(8 digitales) | 855,25 USD [67],[70],[71]. |

Componentes comerciales

En la **Tabla 24** se presentan los componentes comerciales que pueden satisfacer la aplicación.

Tabla 24. Componentes comerciales de las entradas y salidas.

| Componentes comerciales | | | | |
|--------------------------------|--|----------|--|------------|
| Nombre | Referencia | Cantidad | Imagen | Referencia |
| Entradas (inputs) | | | | |
| Sensor de nivel | LA36M-40. 125°C | 1 |  | [72] |
| Sensor de temperatura | Sensor infrarrojo FST600-400A 1200°C | 1 |  | [73] |

| Componentes comerciales | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|--|-------------------|
| Nombre | Referencia | Cantidad | Imagen | Referencia |
| Entradas (inputs) | | | | |
| Pulsador de emergencia | Tipo Hongo 22mm. 220V. | 1 |  | [74] |
| Botón pulsador | EBC 18800/18900 22mm. 220V. | 2 |  | [75] |
| Salidas (Outputs) | | | | |
| Electroválvulas | 2W-160-15 | 3 |  | [76] |
| Bomba de agua | Catpump 56HSG1 | 1 |  | [62] |
| Pantalla HMI | 800 HMI Allen Bradley | 1 |  | [77] |
| Compresor | Camel 628 | 1 |  | [78] |

Desarrollo del GRAFCET

Un GRAFCET o por su definición en francés Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition, es decir, diagrama de control con etapas y transiciones, es un modelo de representación gráfica, de los sucesivos comportamientos de un sistema lógico, predefinido

por sus entradas y salidas. Este diagrama describe un orden funcional de un sistema y lo que este puede automatizar mediante el uso de transiciones que se relacionan a receptividades y estados que se asocian a acciones [79]. Un estado con sus transiciones se puede observar en la **Figura 50**.

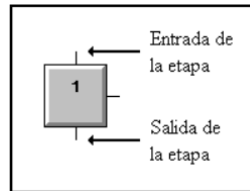


Figura 50. Orden lógico de un GRAFCET [79].

Existen diferentes maneras de abordar un GRAFCET, dado que dependiendo del sistema que se está automatizando, los requerimientos cambian y muchas veces es necesario realizar trabajos de manera simultánea como se observa en la **Figura 51**.

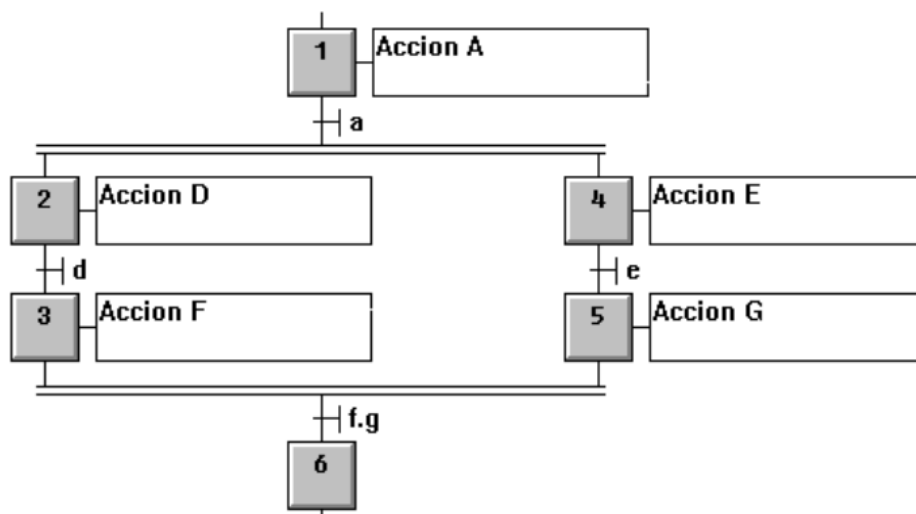


Figura 51. Orden lógico de activaciones o desactivaciones simultáneas [79].

En la **Figura 52**, se puede observar el GRAFCET de la máquina, mientras que en la **Figura 53** se presenta el GRAFCET principal que unifica el subproceso anterior. Cabe mencionar que, la entrada STS es propia del PLC; por lo tanto, no se consideró en la **Tabla 22**.

MACRO ETAPA 10

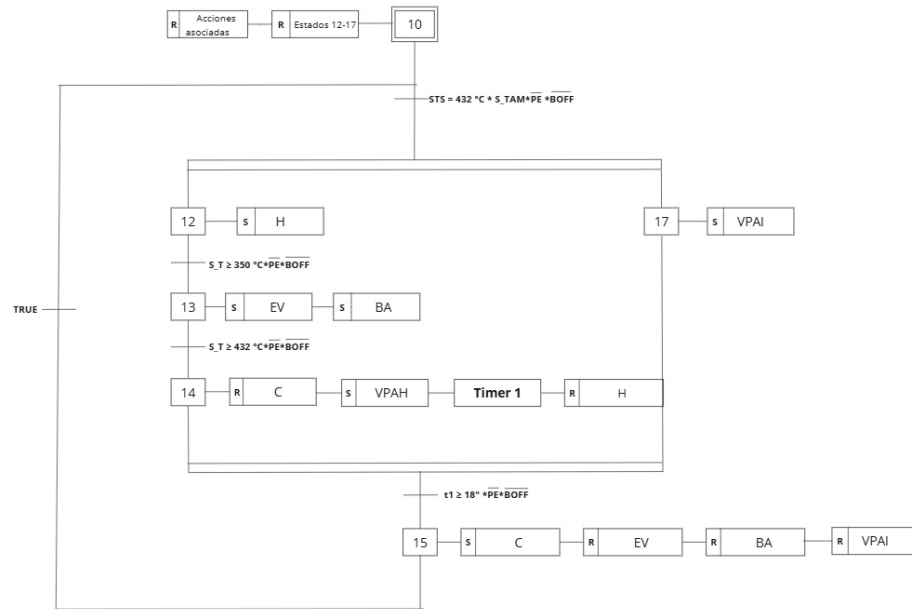


Figura 52. GRAFCET del proceso de la máquina.

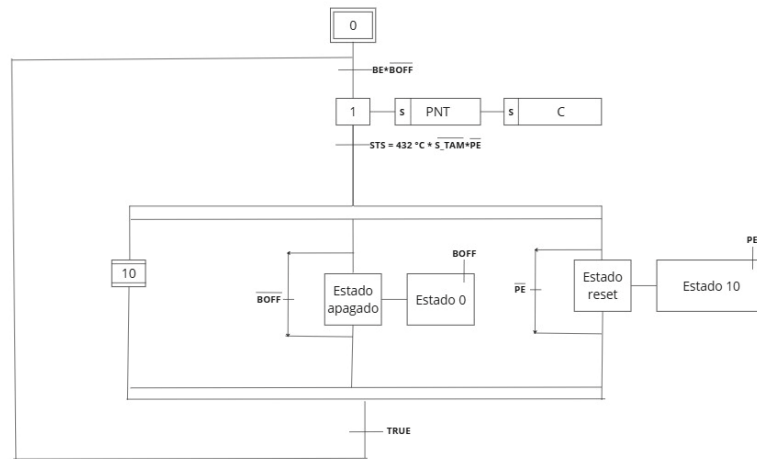


Figura 53. GRAFCET principal.

8.4 Diseño de la máquina

De acuerdo con lo anterior, se dibujó toda la máquina en el programa SolidWorks (Dassault Systemes, Suresnes, Francia). En la **Figura 54**, se pueden observar el modelo del ensamble sin mangueras ni accesorios con sus respectivas medidas. El diseño se compone de un horno, el cual se abre por medio de bisagras para insertar el material. El horno y la cámara de atomización están conectados por medio de un capilar que transporta el metal fundido hacia las boquillas de agua (**Figura 55**). Tanto el horno como la cámara están ensamblados a través de una placa de acero al carbono, la cual está soportada por una estructura metálica de acero forjado. En un lateral de la estructura, está ensamblado la pipeta de argón la cual conduce el gas tanto al horno como a la cámara de pulverización; el aire será expulsado afuera de la máquina mediante una ventanilla ubicada al lado posterior de la cámara de atomización (**Figura 56**). Finalmente, los polvos y el agua utilizada en el proceso serán recogidas utilizando un recolector de Polietileno de alta densidad. Las piezas y los ensambles en detalle se pueden observar en el **ANEXO 10**.

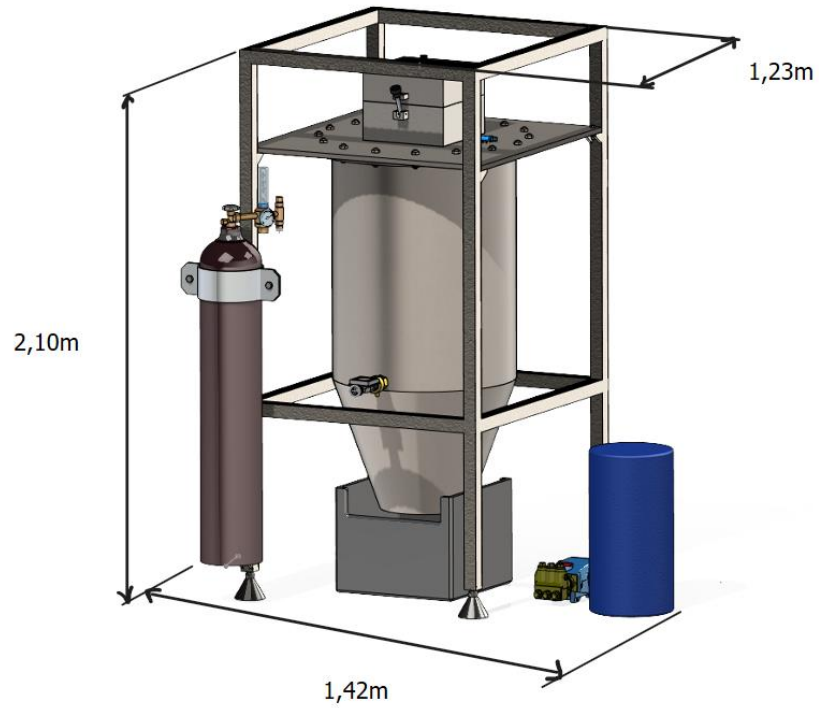


Figura 54. Diseño de la máquina modelada en SolidWorks.

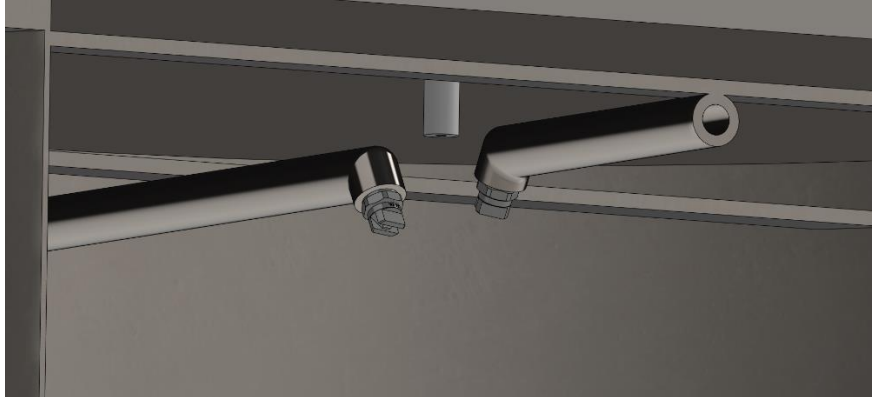


Figura 55. Vista del capilar, boquillas de agua adentro de la cámara de atomización.

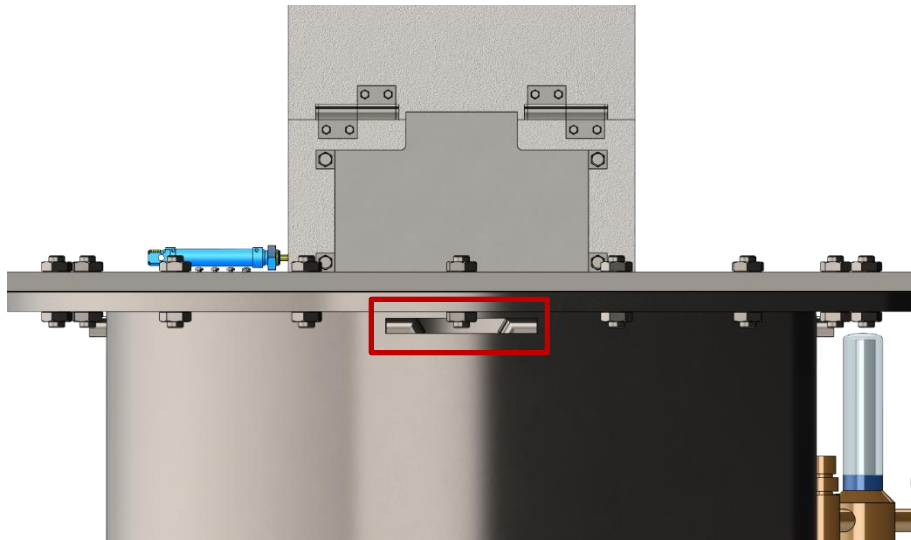


Figura 56. Vista posterior de la máquina. El recuadro en rojo muestra la ventanilla para evacuar el sistema de inertización en la cámara de atomización.

8.4.1 Análisis estructural

En este apartado se presenta el análisis estructural de la máquina, utilizando método de elementos finitos por medio de SolidWorks (Dassault Systemes, Suresnes, Francia). Para ello, se consideraron dos piezas: la placa y la estructura, debido a que son las piezas que sufren mayores esfuerzos al tener contacto directo con el peso del horno y la cámara de atomización. Para el proceso, se usó la herramienta de SolidWorks "propiedades físicas" para determinar la masa teórica del horno y la cámara de atomización, teniendo como resultado $12,23 \text{ kg}$ y $85,67 \text{ kg}$ respectivamente. Adicionalmente, solo se examinó la fluencia ya que la máquina no está sometida a cargas repetitivas significativas, por ende, la fatiga es despreciable.

Rectángulo placa

Para el análisis de la placa se utilizaron geometrías fijas en los extremos de este y se agregaron dos cargas: una carga puntual en el centro equivalente al peso del horno y una masa distribuida alrededor de las perforaciones las cuales conectan con la cámara de atomización. Teniendo en cuenta que la placa es de acero al carbono, el resultado fue un

Von Mises de $3,74 \times 10^4 N/m^2$ (véase **Figura 57**) y un factor de seguridad de 1,9 (véase **Figura 58**). Si bien los datos muestran que no falla a fluencia, es recomendable aumentar el espesor de la placa o cambiar el material con un límite elástico mayor.

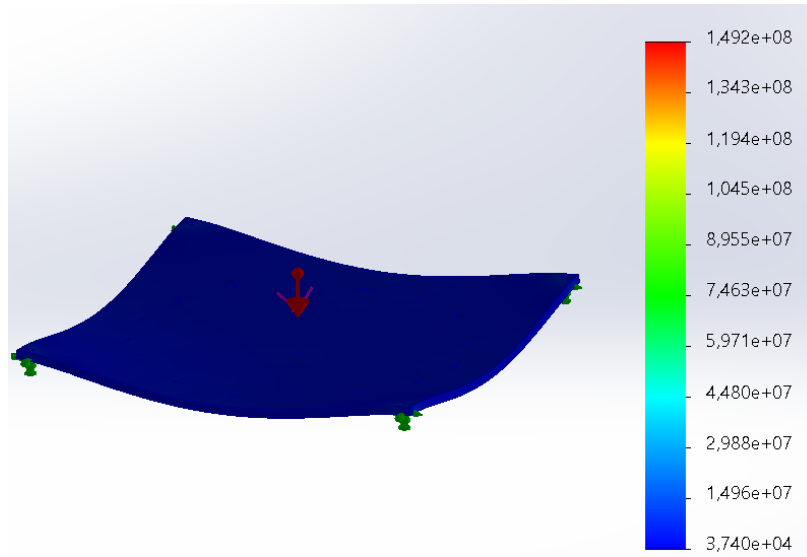


Figura 57. Simulación esfuerzo de Von Mises a estructura de máquina (placa rectangular con chapa de acero al carbono).

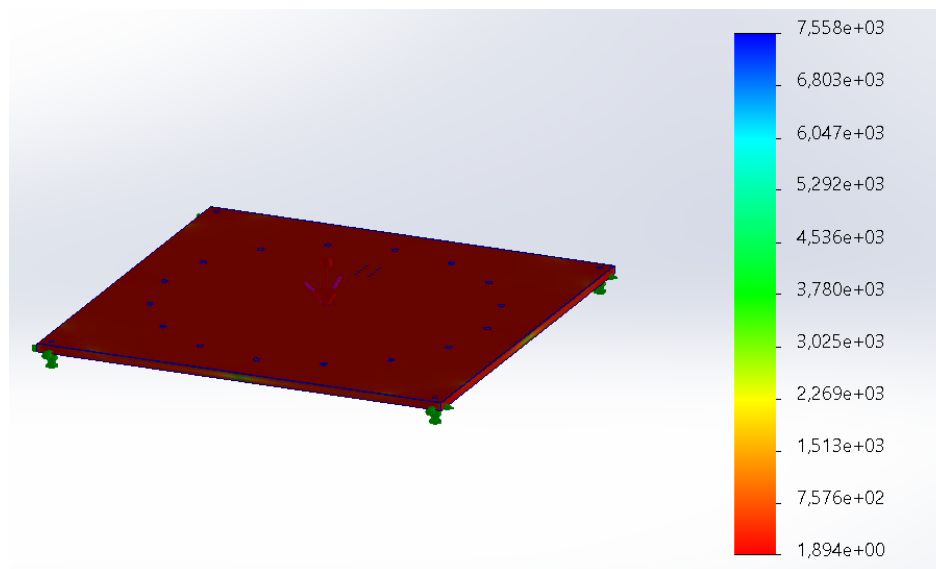


Figura 58. Simulación a estructura de máquina (placa rectangular con chapa de acero al carbono) para hallar factor de seguridad.

Estructura

Para la estructura se utilizó acero inoxidable forjado, ya que posee una mayor resistencia al acero al carbono. Se realizó una geometría fija en las 4 columnas y se aplicó 4 fuerzas equivalentes de 240 N a los soportes de la placa, asumiendo que estas conforman la sumatoria de las cargas del horno y de la cámara de atomización. Como resultado, se presentó un Von Mises de $1,91 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (**Figura 59**) y un factor de seguridad de 65 (**Figura 60**).

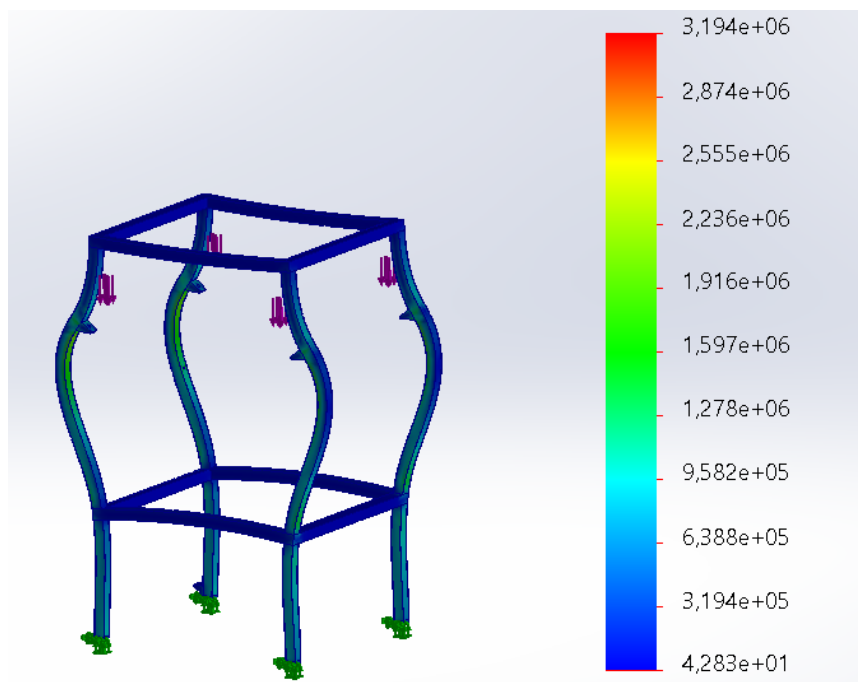


Figura 59. Simulación esfuerzo de Von Mises a estructura de máquina (estructura de acero forjado).

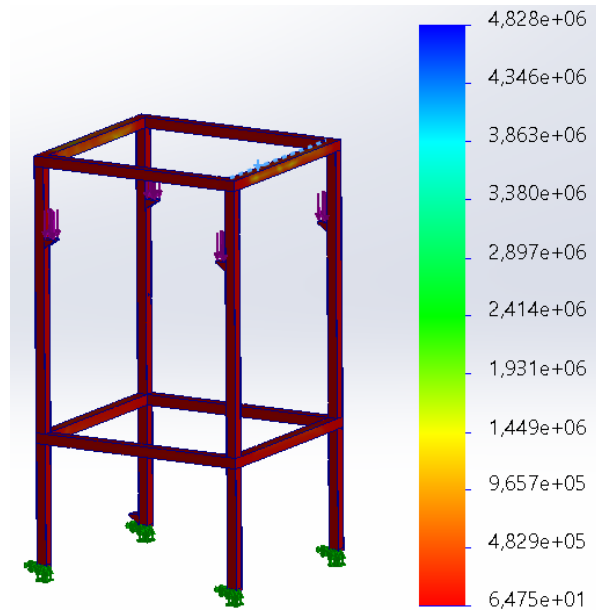


Figura 60. Simulación a estructura de máquina (estructura de acero forjado) para hallar factor de seguridad.

8.5 Evaluación del diseño

Existen diferentes maneras de evaluar un diseño mecánico como afirma David Ullman en su libro "The Mechanical Design Process" [17]. Una de ellas trata acerca del DFC, por sus siglas en inglés Design For Cost. Aquí se desarrolla una de las partes más importantes del proceso de diseño ingenieril al estimar el costo de producción de la maquinaria. En este trabajo, se consideró esta aproximación y se investigaron los costos de los materiales y procesos de manufactura necesarios para la construcción de la máquina. Los hallazgos se presentan en la **Tabla 25**.

Es válido anotar que los valores estimados pueden estar sujetos a cambio, puesto dependen de contextos macroeconómicos como el precio del dólar.

Tabla 25. Análisis de costos para la producción de la máquina atomizadora de polvos.

| Elemento | Cantidad | Precio (USD) | Referencia |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|
| Allen Bradley Micro 850 | 1 | 817,00 | [65] |
| Módulo entrada analógica | 1 | | [66] |
| Sensor de nivel | 1 | 23,00 | [72] |
| Sensor de temperatura infrarrojo | 1 | 161,00 | [73] |
| Pulsador de emergencia | 1 | 5,00 | [74] |
| Botón pulsador | 2 | 5,00 | [75] |
| Electroválvulas | 3 | 196,00 | [76] |
| Bomba de agua CatPump 56HSG1 | 1 | 3556,00 | [80] |
| Pantalla HMI 800 Allen Bradley | 1 | 200,00 | [77] |
| Compresor | 1 | 22,00 | [78] |
| Cilindro Neumático DSN 16-40-PPV | 1 | 109,00 | [81] |
| Pipeta de argón 10L | 1 | 111,00 | [82] |
| Boquilla acero inoxidable 1/4MEG-1504 | 2 | 20,00 | [83] |
| Portaresistencias 12x12 cm | 4 | 213,00 | [47] |
| Resistencias nicromo 20 m | 1 | 17,00 | [84] |

| Elemento | Cantidad | Precio (USD) | Referencia |
|--|-----------|--------------|------------|
| Láminas de acero Inoxidable (1 m x 1,25 m) | 2 | 27,00 | [85] |
| Placa de acero inoxidable (1000 x 1000 x 1,9 mm) | 1 | 13,00 | [85] |
| Lámina de acero calibre 20 | 6 | 300,00 | [86] |
| Manta refractaria | 6 | 300,00 | [87] |
| Crisol alúmina | 1 | 21,00 | [88] |
| Contenedor del suministro de agua | 1 | 13,00 | [60] |
| Agua tipo 1 | 60 litros | 616,00 | [89] |
| Mangueras para agua (3000 psi) | 2 | 100,00 | [90] |
| Mangueras para gas | 2 | 20,00 | [90] |
| Boquillas de gas | 2 | 300,00 | [91] |
| Tornillería y tuercas | 59 | 30,00 | [92] |
| TOTAL (USD) | | 7195,00 | |

A partir de este análisis se estimó que el precio de producción de la máquina es de 7195 USD. Sin tener en cuenta costos de manufactura ni mano de obra.

Siguiendo con los métodos de evaluación de diseño de Ullman, también se encuentra el Design For Value (DFV) [17]. En él se le da una calificación orientada hacia el cliente y sus requerimientos previamente pedidos. Con la intención de estudiar esto, se recopilaron los deseos del cliente traducidos a términos de ingeniería junto con las demandas del diseño. Se calificó de acuerdo con la **Tabla 26**, evaluando si se alcanzó el objetivo o no. Tomando en consideración que hay cinco restricciones y diez requerimientos, la ponderación máxima que puede obtener el diseño es de 10 puntos.

Tabla 26. Ponderación de demandas y criterios para la evaluación del diseño.

| Criterio | Estatus | |
|----------|-----------|--------------|
| | Alcanzado | No alcanzado |
| Demanda | 1 | -1 |
| Deseo | 0,5 | 0 |

A partir de esto, se desarrolló una tabla en la cual se detallan los resultados obtenidos en el diseño propuesto. La **Tabla 27**, no solo justifica el cómo se aplicaron las demandas y los deseos en la máquina, también contrasta los resultados con los objetivos esperados en cada criterio.

Tabla 27. Evaluación y justificación del diseño teniendo en cuenta los objetivos de cada criterio.

| Criterio No. | Objetivo | Resultado alcanzado | Justificación / Comentario |
|--------------|---|---|--------------------------------|
| 1 | 1,70 x 2,48. | 1,42 x 2,10 m. | Figura 54 |
| 2 | Costo total máquina < 30,000 USD. | 10642,63 USD. | Tabla 25. |
| 3 | Metales menores al punto de fusión del hierro (1535 °C). | Implantación de estaño como material que garantiza propiedades del polvo ideal, tales como forma. | Tabla 10. |
| 4 | Implementar sistemas con gases inertes (argón, helio o nitrógeno) para mitigar reacciones con elementos externos. | Sistema de inertización con pipeta de argón para la cámara de pulverización; | Visualizar el apartado 6.3.3.2 |
| 5 | | Sistema de presión para bajar el metal fundido del crisol. | Figura 33. |

| Criterio No. | Objetivo | Resultado alcanzado | Justificación / Comentario |
|---------------------|--|--|--|
| 6 | Recipiente de los polvos de fácil acceso para su recolección. | Cubo retráctil. | Figura 54. |
| 7 | Cámaras de fundición y de pulverización desmontables entre sí. | Cámaras unidas mediante una placa metálica atornillada, con posibilidad de separar si es necesario. | Figura 54. |
| 8 | Ventanillas de visualización en las diferentes cámaras; | No se diseñan ventanillas. | Por temas de seguridad, facilidad de manufactura y evaluando la encuesta Figura 16 , se optó por darle menor relevancia a este deseo. |
| 9 | Uso de materiales traslucidos para la visualización de los procesos. | | |
| 10 | Control para el vertimiento del metal fundido. | Uso de un cilindro hidráulico y un compresor para salida controlada del metal fundido a la cámara de atomización. | Elaboración de GRAFCET Figura 52 y Figura 53 y tablas con el listado de los componentes de control y automatización (Tabla 24). |
| 11 | Control de calentamiento del material en bruto. | Disposición de una pantalla de control para especificar la temperatura a calentar, que activa resistencias térmicas y sensor infrarrojo. | |
| 12 | Control de las boquillas para la expulsión del agua a presión. | Implementación de electroválvula en el suministro de agua. | |

| Criterio No. | Objetivo | Resultado alcanzado | Justificación / Comentario |
|---------------------|---|---|-----------------------------------|
| 13 | Control atmosférico en la cámara de atomización. | Uso de electroválvula para controlar la salida de gas. | Tabla 25. |
| 14 | Control del accionamiento de la bomba para el suministro de agua. | Uso de PLC Allen Bradley Micro 850. | |
| 15 | Materiales de construcción resistentes a la corrosión y a la temperatura de vertido del estaño. | Empleo de acero inoxidable AISI 321 y acero inoxidable fundido. | |

Como resultado de la evaluación, se obtuvo una valoración de 9 puntos, lo que significa que el diseño propuesto alcanza el 87% de los objetivos (**Tabla 28**). En otras palabras, se obtuvieron 13 de los 15 deseos y demandas.

Tabla 28. Resultados de la ponderación del diseño propuesto.

| Demanda/ Deseo | No. | Requerimientos | Estatus | Ponderación |
|-----------------------|------------|---|----------------|--------------------|
| Demanda | 1 | Dimensiones de la máquina | Alcanzado | 1 |
| Demanda | 2 | Uso de materiales y procesos de manufactura de bajo costo | Alcanzado | 1 |
| Demanda | 3 | Implementación de metales de baja fusión | Alcanzado | 1 |
| Demanda | 4 | Uso de gases nobles para atmósfera controlada | Alcanzado | 1 |
| | 5 | | Alcanzado | 1 |
| Deseo | 6 | Estructura desmontable | Alcanzado | 0,5 |

| Demanda/ Deseo | No. | Requerimientos | Estatus | Ponderación |
|---------------------------|------------|--|----------------|--------------------|
| | 7 | | Alcanzado | 0,5 |
| Deseo | 8 | Visualización del proceso de pulverización | No alcanzado | 0 |
| | 9 | | No alcanzado | 0 |
| Deseo | 10 | Funcionamiento automático | Alcanzado | 0,5 |
| | 11 | | Alcanzado | 0,5 |
| | 12 | | Alcanzado | 0,5 |
| | 13 | | Alcanzado | 0,5 |
| | 14 | | Alcanzado | 0,5 |
| Deseo | 15 | Sencillo mantenimiento de la máquina | Alcanzado | 0,5 |
| TOTAL | | | | 9 de 10 |

8.6 Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo principal de diseñar una máquina pulverizadora de metal a escala de laboratorio.
- Fue posible determinar requerimientos que debía cumplir el diseño de la máquina, gracias al uso de matrices y encuestas.
- Se elaboró un diseño conceptual, dando prioridad a un diseño económico y funcional, ideal para implementar en el sector educativo.
- Se efectuó un diseño en detalle el cual recopiló información de vanguardia sobre los fenómenos físicos presentes en la atomización por agua.

- El diseño final fue evaluado por DFC y DFV del The Mechanical Design Process, permitiendo determinar un cumplimiento de requerimientos parcial obteniendo un puntaje de 9 sobre 10.
- La máquina fue construida teniendo en cuenta todo el entendimiento de los principios físicos de la atomización por agua y esto fomenta a la creación de un estándar y una generalización para la fabricación de estas máquinas, ya que en la literatura no se encuentra información exacta y global acerca de su construcción. Únicamente elecciones de carácter arbitrario, no justificado.
- La máquina costaría un estimado de 7195 USD, lo cual en comparación a una máquina de atomización convencional (CDO-PM50, CDOCAST que cuesta 60.000 USD) sería 800% más económica sin tener en cuenta costos por manufactura.

9. Recomendaciones

De acuerdo con el desarrollo de este trabajo y con la intención de que un futuro se continúe con la investigación de temas relacionados, se aconseja:

- Utilizar un análisis de Ansys Fluent (Swanson Analysis Systems, Canonsburg, Estados Unidos) para observar el comportamiento de los fluidos en la cámara de pulverización. Para esto, posiblemente se necesiten de tres ecuaciones diferenciales correspondientes a cada fluido (agua, gas, metal) y condiciones iniciales de operación.
- Elaborar un prototipo funcional para la viabilidad del diseño y la caracterización de partículas obtenidas.

- Investigar a profundidad el comportamiento físico de Plateau-Rayleigh para extrapolar una ecuación general que permita conocer un diámetro mínimo en el que no ocurra el fenómeno de goteo.
- Mejorar el diseño de la estructura, cambiando el material o los apoyos entre columnas, esto con el fin de disminuir el factor de seguridad de 65.
- Hacer un estudio de concentración de gases para determinar el porcentaje de argón en el ambiente durante el funcionamiento de la máquina y al apagarla, con la intención de mitigar riesgos en la salud.
- Utilizar una boquilla real (física) para medir de manera experimental los parámetros del chorro de agua para proporcionar una aproximación más acertada en los cálculos.

10. Bibliografía

- [1] Juan Garcia, "CARACTERIZACION DE POLVOS METALICOS", Bogotá, jun. 2003.
- [2] S. Cacace, V. Furlan, R. Sorci, Q. Semeraro, y M. Boccadoro, "Using recycled material to produce gas-atomized metal powders for additive manufacturing processes", *J Clean Prod*, vol. 268, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122218.
- [3] M. P. Groover, "Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas.", 1996. [En línea]. Disponible en: www.FreeLibros.me
- [4] Randall M. German, *Powder metallurgy science*, 2a ed. 1994.
- [5] ASTM, "Designation: B215 – 20 Standard Practices for Sampling Metal Powders 1", 2020, doi: 10.1520/B0215-20.
- [6] ASTM, "Designation: B925 – 15 Standard Practices for Production and Preparation of Powder Metallurgy (PM) Test Specimens 1", 2022, doi: 10.1520/B0925-15R22.
- [7] ASTM, "Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes 1", 2021, doi: 10.1520/F3049-14R21.
- [8] ASTM y ISO, "Additive manufacturing-Feedstock materials-Methods to characterize metallic powders 1", 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.iso.org>.

- [9] O. S. Onwuka, G. O. Unachukwu, y S. C. Nwanya, "Design and development of a brush atomization machine for metal powder production", el 1 de noviembre de 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00986.
- [10] M. Tsirlis y N. Michailidis, "Optimization of aluminium powder production through a novel ultralow pressure gas-atomization method", *CIRP Annals*, vol. 71, núm. 1, pp. 141–144, ene. 2022, doi: 10.1016/j.cirp.2022.04.031.
- [11] M. Salazar, H. Carreón, y F. A. Lagos, "Novel sustainable metallic powder production process with water used as milling medium", *Clean Technol Environ Policy*, vol. 24, núm. 4, pp. 1013–1020, may 2022, doi: 10.1007/s10098-021-02226-5.
- [12] Ł. Żrodowski *et al.*, "Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3d printing", *Materials*, vol. 14, núm. 10, may 2021, doi: 10.3390/ma14102541.
- [13] K. S. Sista, A. P. Moon, G. R. Sinha, B. M. Pirjade, y S. Dwarapudi, "Spherical metal powders through RF plasma spherodization", el 1 de marzo de 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.powtec.2022.117225.
- [14] Mordor Intelligence, "Tamaño del mercado de pulvimetalurgia y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)". Consultado: el 25 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/powder-metallurgy-market
- [15] M. Sæterbø y W. D. Solvang, "Evaluating the cost competitiveness of metal additive manufacturing – A case study with metal material extrusion", *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 45, pp. 113–124, oct. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.06.005.
- [16] I. Communications Ltd, "HÖGANÄS: SUSTAINABLE METAL POWDER SOLUTIONS POWDER METALLURGY IN CHINA ATOMISING SOLUTIONS

- FROM BLUE POWER POWDER METALLURGY REVIEW”, 2023. [En línea]. Disponible en: www.pm-review.com
- [17] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*, 4a ed. 2010.
- [18] J. Zegzulka, D. Gelnar, L. Jezerska, R. Prokes, y J. Rozbroj, “Characterization and flowability methods for metal powders”, *Sci Rep*, vol. 10, núm. 1, dic. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-77974-3.
- [19] HipermetalesWL, “Distribuidora y Comercializadora de Cobre, Bronce, Aluminio, Angulos, Hierro y Excedente Industriales.” Consultado: el 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hipermetaleswl.com/contactenos.html>
- [20] CobresDeColombia, “Productos”. Consultado: el 20 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cobres.com.co/productos-cobres/>
- [21] CentralDeMetalesS.enS.C., “Compra y venta de Chatarra en Cali - Reciclaje Industrial”. Consultado: el 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://centraldemetales.com/>
- [22] PropulsoraS.A.S., “Propulsora SAS”. Consultado: el 24 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ccc.org.co/portal-fabricas-productividad/propulsora-s-s/>
- [23] ReciclemosElMundo, “COMPRAMOS TODA CLASE DE CHATARRA”. Consultado: el 24 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://reciclemos-el-mundo.jimdosite.com/>
- [24] MatWeb, “ MatWeb, Your Source for Materials Information”. Consultado: el 10 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://matweb.com/>
- [25] Tematicas, “Precio futuro a 3 meses estaño”. Consultado: el 10 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-estano/>

- [26] PrecioOro, "Precio del aluminio hoy baja a 2.451,00 US Dólares la tonelada". Consultado: el 25 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.preciooro.com/precio-aluminio.html>
- [27] Tematicas, "Precio cobre." Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-cobre/>
- [28] Material Properties, "Manganeso-propiedades-precio-aplicaciones-producción". Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://material-properties.org/es/manganeso-propiedades-precio-aplicaciones-produccion/>
- [29] R. Fernandez, "Precios del mineral de hierro de 2003 a 2023". Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/636194/precios-del-mineral-de-hierro/>
- [30] Made-in-China, "Centrifugal Metal Powder Atomizer Spherical Powder Production 1700 Deg". Consultado: el 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: [skylinesmart.en.made-in-china.com/product/yOdTGnvbEJpZ/China-Centrifugal-Metal-Powder-Atomizer-Spherical-Powder-Production-1700-Deg.html](https://www.made-in-china.com/product/yOdTGnvbEJpZ/China-Centrifugal-Metal-Powder-Atomizer-Spherical-Powder-Production-1700-Deg.html)
- [31] CDOCAST, "Vacuum Powder Making Machine". Consultado: el 19 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cdocast.com/vacuum-powder-making-machine/>
- [32] ADDITIVE+, "ATO Lab Plus Atomizer". Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://additiveplus.com/product/ato-lab-plus/>
- [33] K. Kassym y A. Perveen, "Atomization processes of metal powders for 3D printing", en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 1727–1733. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.364.

- [34] A. Asgarian, "PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF WATER ATOMIZATION FOR METAL POWDER PRODUCTION", 2020.
- [35] V. Grubelnik y M. Marhl, "Drop formation in a falling stream of liquid", *Am J Phys*, vol. 73, núm. 5, pp. 415–419, may 2005, doi: 10.1119/1.1866100.
- [36] MIT Massachusetts Institute of Technology, "Lecture 5: Fluid jets". Consultado: el 25 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://web.mit.edu/1.63/www/Lec-notes/Surfacetension/Lecture5.pdf>
- [37] Y. A. Çengel y J. Cimbala, "Mecánica de fluidos", 2004. [En línea]. Disponible en: www.libreriaingeniero.com
- [38] J. Palma, "Diseño y construcción de una máquina atomizadora para la producción de polvos de estaño", Universidad de los Andes, Bogotá, 2004.
- [39] A. Fernandez, "Diseño y construcción de un atomizador de agua para la obtención de polvos de aluminio", Instituto Politécnico Nacional, 2018.
- [40] Almath, "CL70 Crisol de alúmina clásico 280ml". Consultado: el 4 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://almathcrucibles.com/es/producto/cl70/>
- [41] Sh Scientific, "Muffle furnace ". Consultado: el 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: labandfurnace.com/wp-content/uploads/2021/11/muffle-furnace-manual-for-fu-mg-mge-series.pdf
- [42] KANTHAL AB, "Kanthal A-1". Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.kanthal.com/es-es/productos/fichas-técnicas-de-materiales/fleje/kanthal-a-1/
- [43] Chemistry Learner, "Nichrome". Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.chemistrylearner.com/nichrome.html#:~:text=Thermal%20conductivity%20is%20the%20ability%20of,for%20Nichrome%20is%2011.3%20Wm%20–1%20°C%20–1.

- [44] Indiamart, "Kanthal A1 strip (Sweden Make)", Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.indiamart.com/proddetail/kanthal-a1-strip-sweden-make-22683160697.html
- [45] Panache Industries, "Resistance Wires, Nichrome Wire". Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.nichrome-wire.com/resistance-wires.html
- [46] Alloy wire, "80/20 Ni Cr Resistance Wire". Consultado: el 14 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.alloywire.com/alloys/80-20-ni-cr-resistance-wire/
- [47] CAISA, "Porta-resistencia CAISA® cerámica 434". Consultado: el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: wsecaisa.com/producto/porta-resistencia-caisa-ceramica-434/
- [48] Maurice I. Stewart Jr, *Surface Production Operations*, 3a ed., vol. 2. 2014.
- [49] M. Mitu, M. Prodan, V. Giurcan, D. Razus, y D. Oancea, "Influence of inert gas addition on propagation indices of methane-air deflagrations", *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, pp. 513–522, jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.05.007.
- [50] Kingsly S, "Spray Nozzle".
- [51] Mark Bliss, "Helium K Gas Bottle/Cylinder".
- [52] Luis Briseño, "Electroválvula - Electrovalve".
- [53] Y. Li y J. Yang, "Occupational acute argon gas poisoning: A case report", *Medicine (United States)*, vol. 101, núm. 36, p. E30491, sep. 2022, doi: 10.1097/MD.00000000000030491.
- [54] Z. Jiao, D. Li, y A. Asgarian, "INFLUENCE OF APEX ANGLE AND NOZZLE DESIGN ON ENERGY AND MOMENTUM TRANSFER DURING THE WATER

- ATOMIZATION PROCESS”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/318215788>
- [55] Spraying Systems Co., “WashJet® Nozzle, Hardened Stainless Steel, 1/4MEG-1504”. Consultado: el 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://portal.spray.com/en-us/products/1-4meg-1504>
- [56] W. Hikita, T. Ichimura, C. Inoue, y M. Nakaseko, “Visualization and modeling for water atomization of low melting point alloy”, *Advanced Powder Technology*, vol. 32, núm. 11, pp. 4235–4244, nov. 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.09.030.
- [57] K. Miyazaki, K. Morimoto, O. Yamamoto, Y. Harada, y N. Yamaoka, “Thermal interaction of water droplet with molten tin”, *J Nucl Sci Technol*, vol. 21, núm. 12, pp. 907–918, 1984, doi: 10.1080/18811248.1984.9731133.
- [58] Y. Cengel, *Transferencia de Calor y Masa*, 3a ed. McGrawHill.
- [59] E. Cristancho y L. D. Estupiñán, “Diseño y construcción de una máquina prototipo para la obtención de aleaciones no ferrosas por solidificación rápida”, Universidad Libre de Colombia, Bogotá, 2022.
- [60] PLASTANK COLOMBIA, “Tambor cerrado 60 litros”. Consultado: el 31 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastankcolombia.com/productos-con-certificaci%C3%B3n-un>
- [61] Lenntech, “Pump catalog”. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.com/Data-sheets/CAT-Pump-Catalog-2016-L.pdf>
- [62] Catpumps, “Datasheet 7 frame plunger pumps”. Consultado: el 24 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.catpumps.com/sites/default/files/2023-10/56_N.pdf
- [63] Rockwell Automation, “Micro850 24 I/O EtherNet/IP Controlle”. Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:

www.rockwellautomation.com/en-us/products/details.2080-L50E-24AWB.html

- [64] Rockwell Automation, "Micro800 2 Point Analog Input Plug-In". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.rockwellautomation.com/en-us/products/details.2080-IF2.html
- [65] CODALE, "A-B 2080-L50E-24AWB Micro850 24 I/O". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.codale.com/product/detail/4422990/allen-bradley-rockwell-2080-l50e-24awb
- [66] RS, "Allen Bradley 2080 Series PLC I/O Module". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: uk.rs-online.com/web/p/plc-accessories/7508637
- [67] Festo, "Bloque de control CPX-CEC-C1". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.festo.com/es/es/a/567347/?q=~%3AsortByFacetValues-asc
- [68] Festo, "Módulo entrada/salida CPX-8DE-8DA". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.festo.com/es/es/a/526257/?q=~%3AsortByFacetValues-asc
- [69] Festo, "Analogue module CPX-2AE-U-I". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.festo.com/us/en/a/526168/
- [70] RS, "Festo CPX-8DE-8DA Input/Output Module, for CPX modular elec terminal, 8 digital in/8 digital out". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: us.rs-online.com/product/festo/cpx-8de-8da/71209361/
- [71] RS, "Festo CPX-2AE-U-I Analogue Module, for CPX modular electrical terminal, 2 inputs". Consultado: el 20 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: us.rs-online.com/product/festo/cpx-2ae-u-i/71209349/

- [72] Eicos, "Sensor de Nivel LA36M-40". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.eicos.com/sensor-de-nivel/montaje-lateral/LA36M-40/
- [73] FirstRate, "FST600-400A Online Infrared Temperature sensor". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.firstratesensor.com/product/FST600-400A-Online-Infrared-Temperature-Sensor-78.html?_gl=1*j6gw9q*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjw7NmzBhBLEiwAxrHQ-UCGw7PYFx9dxtbu9Iq5vtfpx8cPATQtcCyjAyj_PgdTveekzkMNuRoCa8AQAvD_BwE
- [74] MercadoLibre, "Parada Emergencia Metalica Tipo Hongo 22mm". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: articulo.mercadolibre.com.co/MCO-635181788-parada-emergencia-metalica-tipo-hongo-22mm-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-selleritems&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-seller_itemsabove&reco_id=673a401d-57e2-417f-b673-966a66bbb4c9
- [75] MercadoLibre, "Pulsador Metalico 22mm Verde/rojo". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: articulo.mercadolibre.com.co/MCO-635179154-pulsador-metalico-22mm-verderojo-_JM?attributes=COLOR_SECONDARY_COLOR%3AUK9KTyAxTkM%3D&quantity=1
- [76] MercadoLibre, "110v Ac Electric Solenoide Válvula De Agua Aire Gas, Combust". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1362211285-110v-ac-electric-solenoide-valvula-de-agua-aire-gas-combust-_JM#position=11&search_layout=stack&type=item&tracking_id=d0f3b707-9f55-4994-bd4f-355b7e8a65f1
- [77] EBAY, "VISTA DE PANEL ALLEN BRADLEY 2711R-T4T 800 HMI (TOTALMENTE OPERATIVO)". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:

www.ebay.com/itm/404674810953?itmmeta=01J15RK2HFE24VPDEGH5G8Z
MGC&hash=item5e387f9449:g:KSUAAOSwadv5ldrm9&itmprp=enc%3AAQAJA
AAA8Pqv5XMDnlvqtGV3WTI7Fvq0UkW80%2BcXapmXZah5kyYieZmJ9J67v3v
rb7SnU6eYCbLa8Ra5t8lAm77HbLmMiRVsJtzk6USk4GTzRbwAkperBL%2F3oZ
sF1512pwD7elqXAdefwjW1d0biHW4GTm3%2FnU9jzs7V%2BgZRxAjxTFvM%
2BLGzTFxKwk%2F7XT3ILy%2BMYlcDnx2IsIJDlnXaUDUr64uDxRf%2FDZP7
%2Fg0d2dpY50l2x6jZbj259aclMqXOR6%2B9vZun7LXSWbaaCY7oSd7N9NLve
J22raJTb7lCZ22D5VzOfb2PwSi1KwUERKVxe5uDmy2gbA%3D%3D%7Ctkp%
3ABk9SR-aozLiJZA

- [78] MercadoLibre, "Compresor de aire mini a batería portátil Camel 628-4x4 12V". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.mercadolibre.com.co/compresor-de-aire-mini-a-bateria-portatil-camel-628-4x4-12v-gris/p/MCO15963886#searchVariation=MCO15963886&position=7&search_layout=grid&type=product&tracking_id=c55b2d37-ebd5-4824-9342-24f625da9db8
- [79] Universidad de Oviedo, "Resumen sobre Grafacet", 2002. Consultado: el 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: http://isa.uniovi.es/docencia/iea/teoria/grafacet_resumen.pdf
- [80] ShopETOnline, "CatPumps 56HSG1". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.shopetsonline.com/product-p/56hsg1.htm
- [81] RS, "Cilindro neumático con vástago Festo, DSNU-40-160-PPS-A, Doble Acción". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: es.rs-online.com/web/p/cilindros-lineales-neumaticos/2021806
- [82] Tecratt industry, "Cilindro para CO2 o argón de 10L". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: tecraft.com/products/copia-de-cilindro-para-argon-de-10lt-1?variant=43897723977952

- [83] Repuestos lavado, "BOQUILLA INOX. 1/4" SS 1504 MEG MECATIC". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.repuestoslavado.com/es/boquillas-inoxidables-meg/890-boquilla-inox-14-ss-1503-meg.html
- [84] Mercadolibre, "20 Mts Resistencia Alambre Nicromo Calibre 32 Kanthal 80/20". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1367368572-20-mts-resistencia-alambre-nicromo-calibre-32-kanthal-8020-_JM#position=11&search_layout=stack&type=item&tracking_id=3c7677f5-0c97-4109-a317-8a4c92d87cc3
- [85] Bricometal, "Chapa Acero Inox. 304 de 2 mm espesor, a medida". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: bricometal.com/es/chapas-acero-inoxidable/32-chapa-acero-inox-304-de-2-mm-espesor-a-medida.html
- [86] Surtiaceros, "Lámina de acero 4' x 10' C20 (ASTM A1008)". Consultado: el 23 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: surtiaceros.com/producto/lamina-negra-4-x-10-c-20/
- [87] Temu, "La manta de fibra cerámica de aluminio resistente al fuego Hobbyworker tiene un largo de 62.5 cm, ancho de 30 cm, grosor de 3 cm y peso de 522 g." Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www temu.com/co/la-manta-de-fibra-ceramica-de-aluminio-resistente-al-fuego-hobbyworker-tiene-un-largo-de-62-5-cm-ancho-de-30-cm-grosor-de-3-cm-y-peso-de-522-g-g-601099549270623.html?refer_page_name=goods&refer_page_id=10032_1719475225001_390wrsdonc&refer_page_sn=10032&_x_sessn_id=71d9tmkz4w
- [88] Labbox, "CRISOL DE ALÚMINA FORMA ALTA PREMIUM LINE". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://esp.labbox.com/producto/crisol-de-alumina-forma-alta-premium-line/>

- [89] Fisher Scientific, "Agua ultra pura". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/ultra-pure-water-6/12044907>

- [90] Parker, "Manguera hidráulica". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ph.parker.com/co/es/series/hydraulic-hose>

- [91] Grupo Infra, "Accesorios". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://grupoinfra.com/pagina/categoria/111/Accesorios>

- [92] Amazon, "Tornillos y tuercas". Consultado: el 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.com/s?k=tornillos&__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1NPODA67KBSBR&sprefix=tornillo%2Caps%2C149&ref=nb_sb_noss_1

- [93] QFD online, "Do We Need a Matrix for QFD?" Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.qfdonline.com

- [94] Wasserlab, "Generalidades sobre el agua purificada". Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: www.wasserlab.com/gestor/recursos/uploads/02.3%20Generalidades%20sobre%20al%20Agua%20purificada.pdf

11. ANEXOS

11.1 ANEXO 1

PROCESO DE SELECCIÓN MÉTODO AHP

Para utilizar una matriz AHP cada criterio posee un valor diferente y esto es lo que hace una alternativa más valiosa que la otra. Este proceso se efectúa en un Excel. En este se modificaron los valores de acuerdo con las ponderaciones de importancia que se les otorgó a los criterios como se ve en la **Figura 61** para la determinación del metal a pulverizar.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|------------------|----------------------------------|----------------|--------------------|--------|------------------------------------|
| Criterios | Distribución tamaño de partícula | Disponibilidad | Energía calorífica | Costos | Capacidad de flujo de la partícula |

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
|---------------------|--------|----------|-------|-----------|--------|
| Alternativas | Estaño | Aluminio | Cobre | Manganeso | Hierro |

| | Más importante | | | | | | | | | Menos importante | | | |
|------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|--------|---|----------------|---|---|------------------|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| Criterios | Energía calorífica | Distribución tamaño de partícula | Capacidad de flujo de la partícula | | Costos | | Disponibilidad | | | | | | |

| | Más importante | | | | | | | | | Menos importante | | | |
|------------------------------------|----------------|----|----|----|----|---|----|----|---------|------------------|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| Distribución tamaño de partícula | A1 | A3 | | A4 | | | | A2 | A5 | | | | |
| Disponibilidad | A3 | | A2 | | A5 | | | | A1 - A4 | | | | |
| Energía calorífica | A1 | | A2 | | A3 | | A4 | | A5 | | | | |
| Costos | A5 | A2 | | | A3 | | A4 | | A1 | | | | |
| Capacidad de flujo de la partícula | A5 | A3 | | | A1 | | A2 | | A4 | | | | |

Figura 61. Asignación de grados de importancia para criterios y alternativas de matriz AHP de selección del metal.

Una vez se establecen estos grados de importancia, se realizan tablas (una por criterio). Estas tablas deben cumplir tres criterios matemáticos y asegurarse que la proporción de consistencia (PC) siempre sea inferior del 10%.

Referente al PC, este valor se obtiene mediante datos previamente establecidos (ver **Figura 62**) que dictan qué valor debe utilizarse dependiendo del tamaño de la matriz. Entonces el PC es el resultado de tomar el índice de consistencia (IC) y dividirlo por el valor de la matriz que se emplea.

| | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tamaño de Matriz | 2x2 | 3x3 | 4x4 | 5x5 | 6x6 | 7x7 | 8x8 | 9x9 | 10x10 |
| Índice Aleatorio | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |
| Tamaño de Matriz | 11x11 | 12x12 | 13x13 | 14x14 | 15x15 | 16x16 | 17x17 | 18x18 | 19x19 |
| Índice Aleatorio | 1,51 | 1,54 | 1,56 | 1,57 | 1,58 | 1,59 | 1,61 | 1,62 | 1,63 |

Figura 62. Índice aleatorio de AHP de acuerdo con el tamaño de matriz.

Las tablas por criterio se muestran en la **Figura 63** y el resultado final de extraer los vectores propios de las alternativas C1, C2, C3, C4 y C5, y los vectores propios de los criterios, se obtiene la **Tabla 10**.

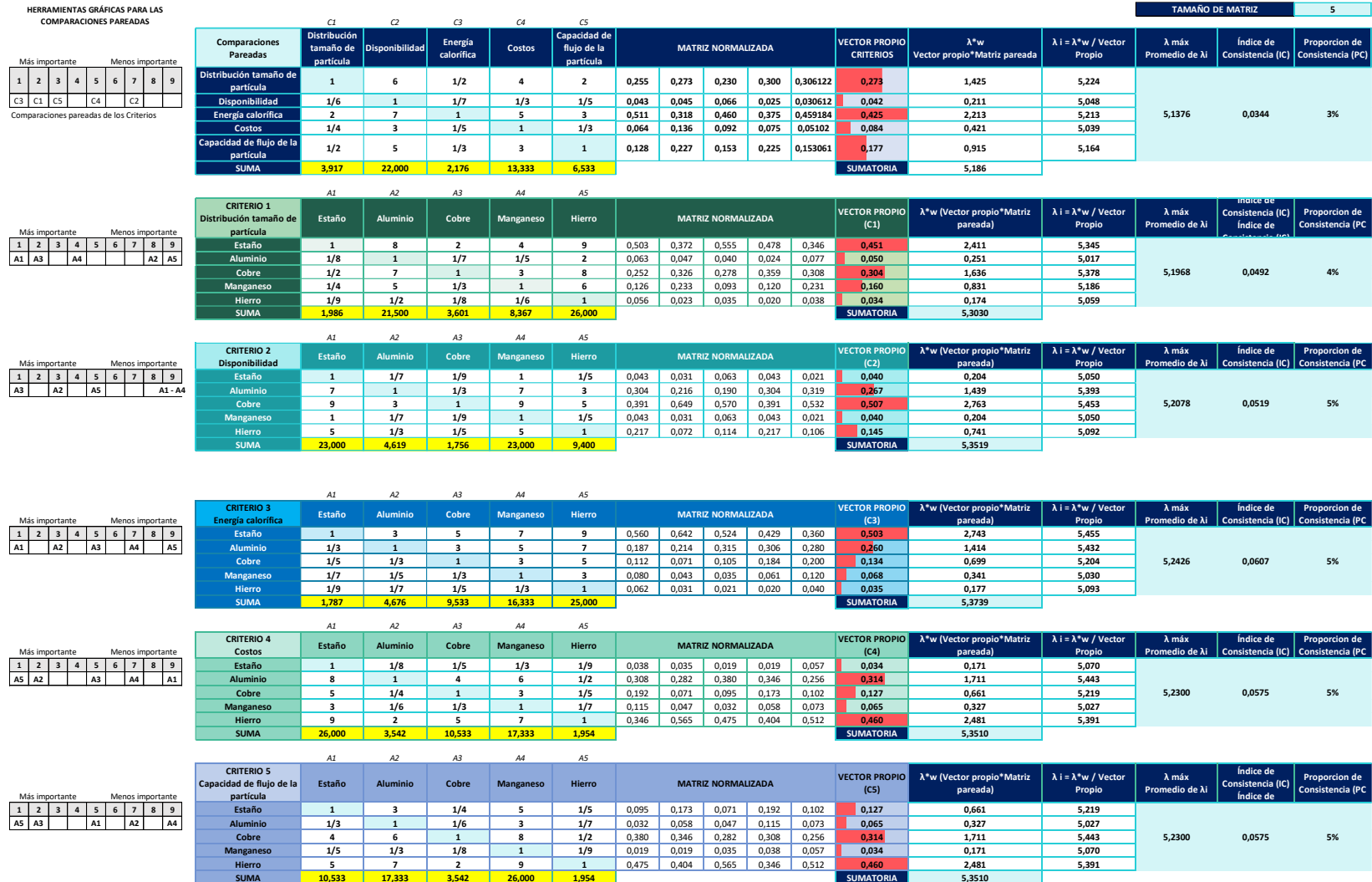


Figura 63. Tablas de ponderación de criterios frente alternativas del método AHP de selección de metal.

Para la matriz AHP de la selección del método, se siguió un mismo lineamiento, como se observa en la **Figura 64** y **Figura 65**. De aquí resultó la **Tabla 12**.

| | C1 | C2 | C3 | C4 |
|------------------|------------------|-----------|--------------------|-------|
| Criterios | Tamaño partícula | Sencillez | Tasa de producción | Costo |

| | A1 | A2 | A3 | A4 |
|---------------------|--------------|----------------------|-------------|-------------------|
| Alternativas | Centrifugado | Atomización por agua | Ultrasónico | Mecanismo cepillo |

| Grado importancia Criterios | Más importante | | | | | | | | | Menos importante |
|-----------------------------|----------------|----|---|----|---|---|----|---|---|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Criterios | C2 | C1 | | C4 | | | C3 | | | |

| Alternativa / grado importancia | Más importante | | | | | | | | | Menos importante |
|---------------------------------|----------------|---|----|----|----|---|----|----|----|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Tamaño partícula | A3 | | A1 | | | | | A4 | A2 | |
| Sencillez | A2 | | A4 | | A1 | | | | A3 | |
| Tasa de producción | A3 | | | A4 | | | A2 | A1 | | |
| Costos | A4 | | A2 | | | | A1 | A3 | | |

Figura 64. Asignación de grados de importancia para criterios y alternativas de matriz AHP de selección del método de pulverización.

| | | | | | | | | | | TAMAÑO DE MATRIZ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------------------|--|----------------------|--|-------------|--|--------------------|--|-------------------------|--|--------------------|---|---|--|---|--|-----------------------------|---------------------------------|
| | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| COMPARACIONES PAREADAS | | | | | | | | | | C1 | | C2 | | C3 | | C4 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | Comparaciones Pareadas | | Tamaño partícula | | Sencillez | | Tasa de producción | | Costos | | MATRIZ NORMALIZADA | | VECTOR PROPIO CRITERIOS | λ^*w Vector propio*Matriz pareada | $\lambda i = \lambda^*w / \text{Vector Propio}$ | λ máx Promedio de λi | Índice de Consistencia (IC) | Proporcion de Consistencia (PC) |
| | | | | | | | | | | 1 | | 1/2 | | 6 | | 3 | | 0,286 0,264 0,333 0,364 | | 0,312 | 1,300 | 4,170 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 2 | | 1 | | 7 | | 4 | | 0,571 0,528 0,389 0,485 | | 0,493 | 2,053 | 4,162 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/6 | | 1/7 | | 1 | | 1/4 | | 0,048 0,075 0,056 0,030 | | 0,052 | 0,210 | 4,027 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/3 | | 1/4 | | 4 | | 1 | | 0,095 0,132 0,222 0,121 | | 0,143 | 0,579 | 4,057 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 3,500 | | 1,893 | | 18,000 | | 8,250 | | SUMATORIA | | 4,142 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | A1 | | A2 | | A3 | | A4 | | MATRIZ NORMALIZADA | | VECTOR PROPIO (C1) | λ^*w (Vector propio*Matriz pareada) | $\lambda i = \lambda^*w / \text{Vector Propio}$ | λ máx Promedio de λi | Índice de Consistencia (IC) | Proporcion de Consistencia (PC) | | |
| | | | | | | | | | | Centrifugado | | Atomización por agua | | Ultrasonido | | Mecanismo cepillo | | 0,232 0,368 0,212 0,387 | | 0,300 | 1,256 | 4,187 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1 | | 7 | | 1/3 | | 6 | | 0,033 0,053 0,071 0,032 | | 0,047 | 0,191 | 4,038 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/7 | | 1 | | 1/9 | | 1/2 | | 0,696 0,474 0,637 0,516 | | 0,581 | 2,482 | 4,273 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 3 | | 9 | | 1 | | 8 | | 0,039 0,105 0,080 0,065 | | 0,072 | 0,289 | 4,013 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/6 | | 2 | | 1/8 | | 1 | | SUMATORIA | | 4,2177 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 4,310 | | 19,000 | | 1,569 | | 15,500 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | A1 | | A2 | | A3 | | A4 | | MATRIZ NORMALIZADA | | VECTOR PROPIO (C2) | λ^*w (Vector propio*Matriz pareada) | $\lambda i = \lambda^*w / \text{Vector Propio}$ | λ máx Promedio de λi | Índice de Consistencia (IC) | Proporcion de Consistencia (PC) | | |
| | | | | | | | | | | Centrifugado | | Atomización por agua | | Ultrasonido | | Mecanismo cepillo | | 0,109 0,122 0,227 0,074 | | 0,133 | 0,542 | 4,076 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1 | | 1/5 | | 5 | | 1/3 | | 0,543 0,608 0,409 0,670 | | 0,558 | 2,401 | 4,304 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/7 | | 1 | | 9 | | 3 | | 0,022 0,068 0,045 0,032 | | 0,042 | 0,168 | 4,043 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 5 | | 1 | | 1 | | 7 | | 0,326 0,203 0,318 0,223 | | 0,268 | 1,144 | 4,276 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/5 | | 1/9 | | 1 | | 1/7 | | SUMATORIA | | 4,2554 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 9,200 | | 1,644 | | 22,000 | | 4,476 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | A1 | | A2 | | A3 | | A4 | | MATRIZ NORMALIZADA | | VECTOR PROPIO (C3) | λ^*w (Vector propio*Matriz pareada) | $\lambda i = \lambda^*w / \text{Vector Propio}$ | λ máx Promedio de λi | Índice de Consistencia (IC) | Proporcion de Consistencia (PC) | | |
| | | | | | | | | | | Centrifugado | | Atomización por agua | | Ultrasonido | | Mecanismo cepillo | | 0,063 0,040 0,082 0,037 | | 0,055 | 0,224 | 4,048 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1 | | 1/2 | | 1/8 | | 1/5 | | 0,125 0,080 0,094 0,046 | | 0,086 | 0,346 | 4,011 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 2 | | 1 | | 1/7 | | 1/4 | | 0,500 0,560 0,659 0,734 | | 0,613 | 2,641 | 4,307 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 8 | | 7 | | 1 | | 4 | | 0,313 0,320 0,165 0,183 | | 0,245 | 1,020 | 4,162 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 5 | | 4 | | 1/4 | | 1 | | SUMATORIA | | 4,2312 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 16,000 | | 12,500 | | 1,518 | | 5,450 | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | A1 | | A2 | | A3 | | A4 | | MATRIZ NORMALIZADA | | VECTOR PROPIO (C4) | λ^*w (Vector propio*Matriz pareada) | $\lambda i = \lambda^*w / \text{Vector Propio}$ | λ máx Promedio de λi | Índice de Consistencia (IC) | Proporcion de Consistencia (PC) | | |
| | | | | | | | | | | Centrifugado | | Atomización por agua | | Ultrasonido | | Mecanismo cepillo | | 0,074 0,046 0,118 0,089 | | 0,082 | 0,328 | 4,014 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1 | | 1/5 | | 2 | | 1/7 | | 0,370 0,229 0,353 0,208 | | 0,290 | 1,208 | 4,165 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 5 | | 1 | | 6 | | 1/3 | | 0,037 0,038 0,059 0,078 | | 0,053 | 0,214 | 4,038 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/2 | | 1/6 | | 1 | | 1/8 | | 0,519 0,687 0,471 0,625 | | 0,575 | 2,442 | 4,245 | | | | | |
| | | | | | | | | | | 1/2 | | 1/6 | | 1 | | 1/8 | | SUMATORIA | | 4,1920 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 13,500 | | 4,367 | | 17,000 | | 1,601 | | | | | | | | | | | |

Figura 65. Tablas de ponderación de criterios frente alternativas del método AHP de selección de método.

11.2 ANEXO 2

ENCUESTA CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA A COMUNIDAD DE INGENIERÍA MECÁNICA DE PONTIFICIA JAVERIANA CALI

Diseño de una máquina para la obtención de partículas metálicas con fines académicos ☞

Estimado/a estudiante, profesor/a, colaborador/a de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Somos Erika Burckhardt Hernández y David Mauricio Suárez Rada, estudiantes de 8vo semestre y nos encontramos desarrollando nuestro trabajo de grado.

Con el fin de recopilar información relevante para nuestra tesis, titulada ***Diseño de una máquina para la obtención de partículas metálicas con fines académicos***, les solicitamos contestar la siguiente encuesta que nos permitirá establecer los criterios más pertinentes para la elaboración de matrices de selección de funcionalidad de nuestra máquina.

A continuación, se encontrará con preguntas relacionadas al grado de importancia que usted considera frente a ciertos aspectos para la construcción de una máquina pulverizadora de metal.

Para mayor contextualización: la tesis contempla el diseño de una máquina que transformará un metal sólido, de bajo punto de fusión, como el estaño a partículas. Se hace énfasis en el diseño desde una visión educativa que le facilite a la comunidad académica el estudio de nuevos procesos de manufactura e innovación en la tecnología de polvos metálicos. Algunos de los métodos de pulverización de metales suelen ser la atomización empleando gas, agua, centrifugado mediante un disco giratorio o ultrasónico. Igualmente, la reducción química y la electrólisis.

Agradecemos mucho su participación y colaboración.

Lo invitamos a contestar honestamente, recalando que esta encuesta tiene únicamente fines académicos y no será utilizada para ningún otro objetivo.

1. Nombre y apellidos *

Escriba su respuesta

2. Rol en la carrera *

- Estudiante
- Profesor/a
- Colaborador/a

3. Semestre *

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8

4. Del pensúm académico, ¿cuáles asignaturas ha cursado? (Puede seleccionar más de una respuesta) *

- Máquinas Térmicas e Hidráulicas
- Mecánica de Fluidos
- Química y Ciencia de los Materiales
- Procesos de Manufactura I
- Procesos de Manufactura II
- Propiedades de los Materiales
- Termodinámica
- Transferencia de Calor
- No aplica

5. Para el diseño de una máquina de obtención de partículas metálicas, ¿qué tan importante considera cada uno de los siguientes criterios?

Otorgue un valor numérico de **1 a 5**, siendo estos:

- 5 - Extrema relevancia
- 4 - Muy relevante
- 3 - Medianamente relevante
- 2 - Poco relevante
- 1 - Nada relevante *

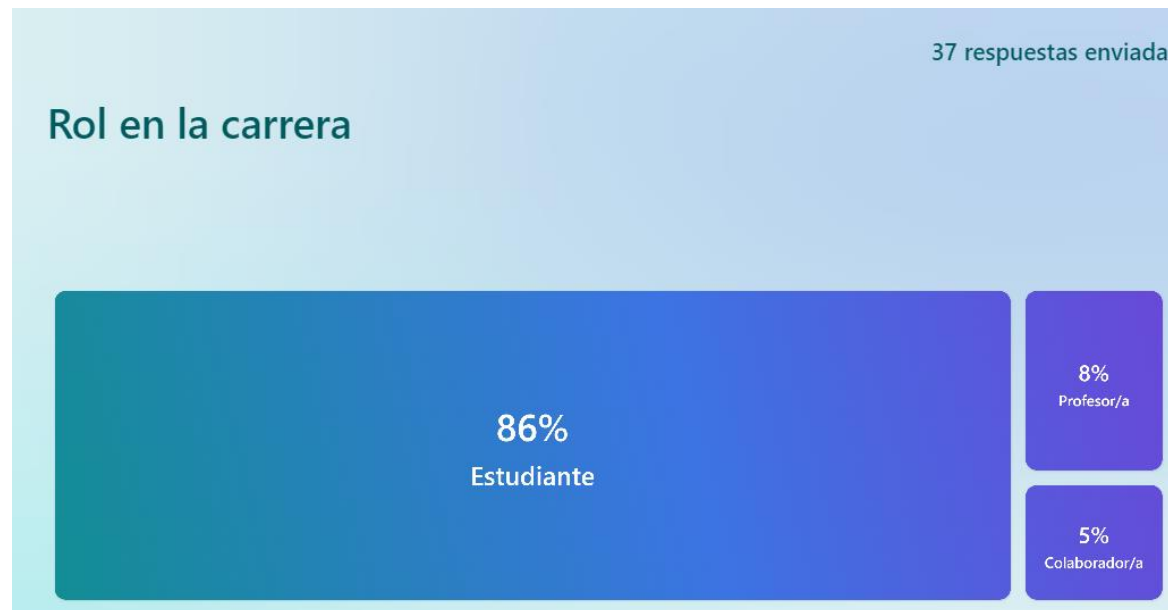
| | 1 (Nada relevante) | 2 | 3 | 4 | 5 (Extrema relevancia) |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Criterio 1: La máquina sea de estructura desmontable para un sencillo mantenimiento y transporte. | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Criterio 2: Visualización del proceso de pulverización (implementación de zonas con vidrio o ventanas para la observación del proceso de transformación a polvo). | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Criterio 3: Funcionamiento automático para el control y la visualización de parámetros (implementación de PLC o elementos de controladores lógicos). | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

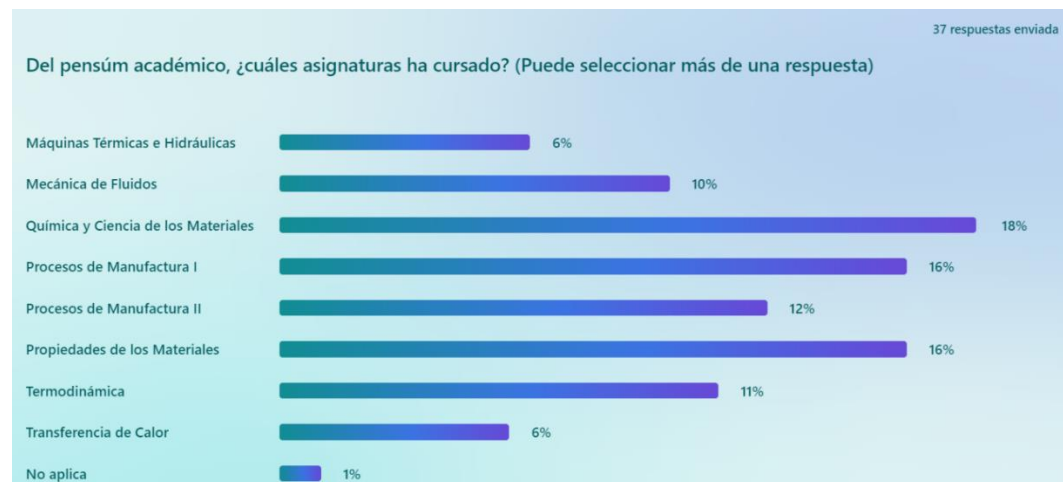
6. OPCIONAL

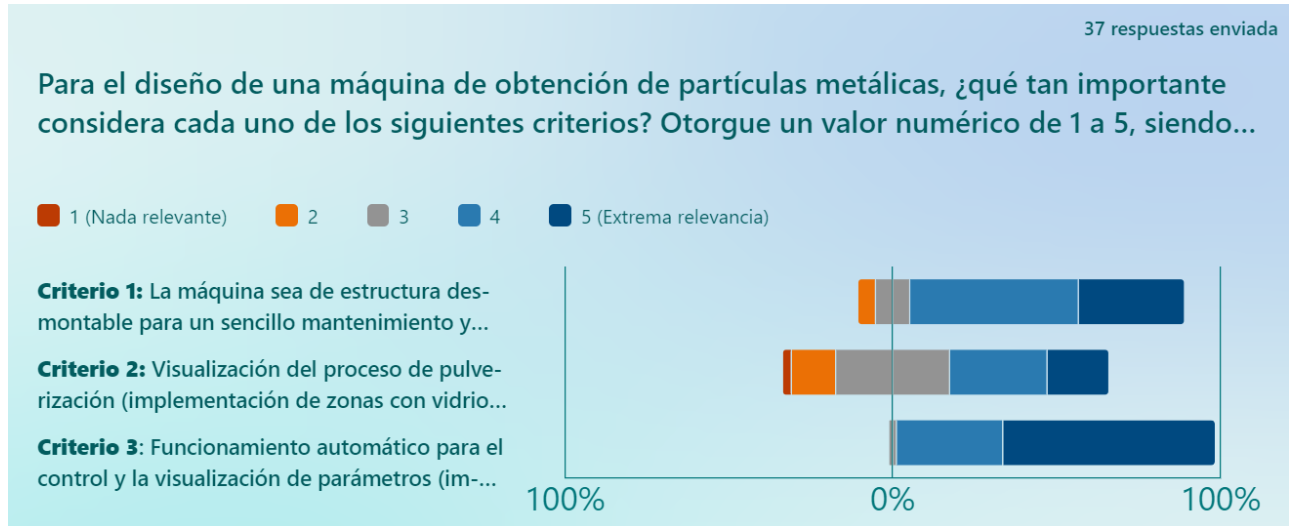
De acuerdo a lo anterior, ¿considera algún otro criterio importante para el diseño de esta máquina?

Escriba su respuesta

A partir de este cuestionario se obtuvieron los siguientes resultados:







11.3 ANEXO 3

Para la realización de la cada de calidad, se utilizó un template QFD online [93]. En la **Figura 66** se muestra que, las filas son los criterios establecidos, mientras que las columnas representan los requerimientos de ingeniería. En las intersecciones se observa la simbología mostrada en la **Tabla 4**. En la parte superior se puede apreciar los objetivos de cada requerimiento (**Tabla 5**).

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | Column # | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------|-----------------|---------------------|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| | | | | Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x) | | | | | | | | | | |
| | | | | | Materiales de construcción resistentes a la corrosión y a la temperatura de vertido del estañío. | X | X | X | X | ▼ | X | X | X | X | X |
| | | | | | Cámaras de fundición y de pulverización desmontables entre sí. | | ⊕ | ⊕ | ▲ | ⊕ | | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ |
| | | | | | Recipiente de los polvos de fácil acceso para su recolección. | | | | | | ⊕ | | | | |
| | | | | | Control para el vertimiento del metal fundido. | | | | | | | | | | |
| | | | | | Que el Tamaño de la máquina sea menor a 1,7 x 2,48 m | | | | | | | | | | |
| | | | | | Uso de materiales traslucidos para la visualización de los procesos. | | | | | | ⊕ | | | | |
| | | | | | Control de calentamiento del material en bruto. | | | | | | | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ |
| | | | | | Control de las boquillas para la expulsión del agua a presión. | | | | | | | | ⊕ | ⊕ | ⊕ |
| | | | | | Control del accionamiento de la bomba para el suministro de agua. | | | | | | | | | ⊕ | ⊕ |
| | | | | | Control atmosférico en la cámara de atomización. | | | | | | | | | | ▲ |
| 1 | 9 | 21,8 | 32,4 | Estructura desmontable | | ⊕ | ⊕ | ▲ | ⊕ | | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ |
| 2 | 9 | 12,7 | 18,9 | Visualización del proceso de pulverización | | | | | | | ⊕ | | | | |
| 3 | 9 | 43,7 | 64,9 | Funcionamiento automático | | ▲ | | ⊕ | ⊕ | | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ⊕ |
| 4 | 9 | 21,8 | 32,4 | Sencillo mantenimiento | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ▲ | ⊕ | ⊕ | ▲ | ⊕ | ⊕ | ⊕ | ▲ |

Figura 66. Relaciones entre criterios del cliente y requerimientos de ingeniería en la casa de calidad.

En la **Figura 67**, se muestran las relaciones entre requerimientos de ingeniería.

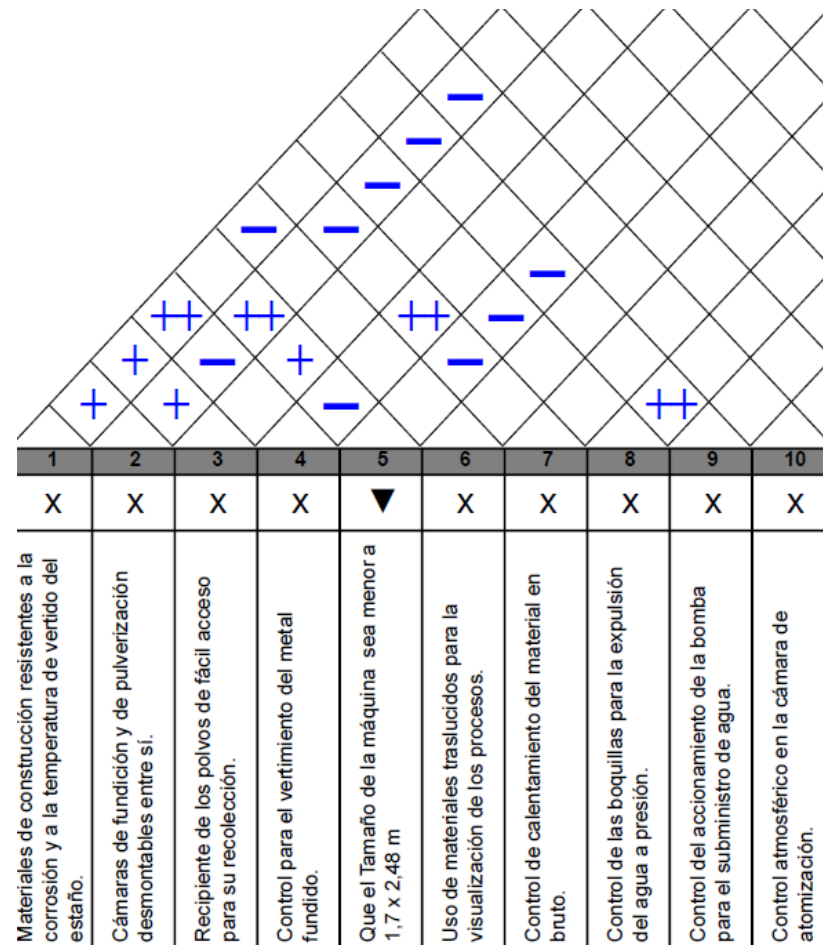


Figura 67. Techo de la casa de calidad: relaciones entre requerimientos de ingeniería.

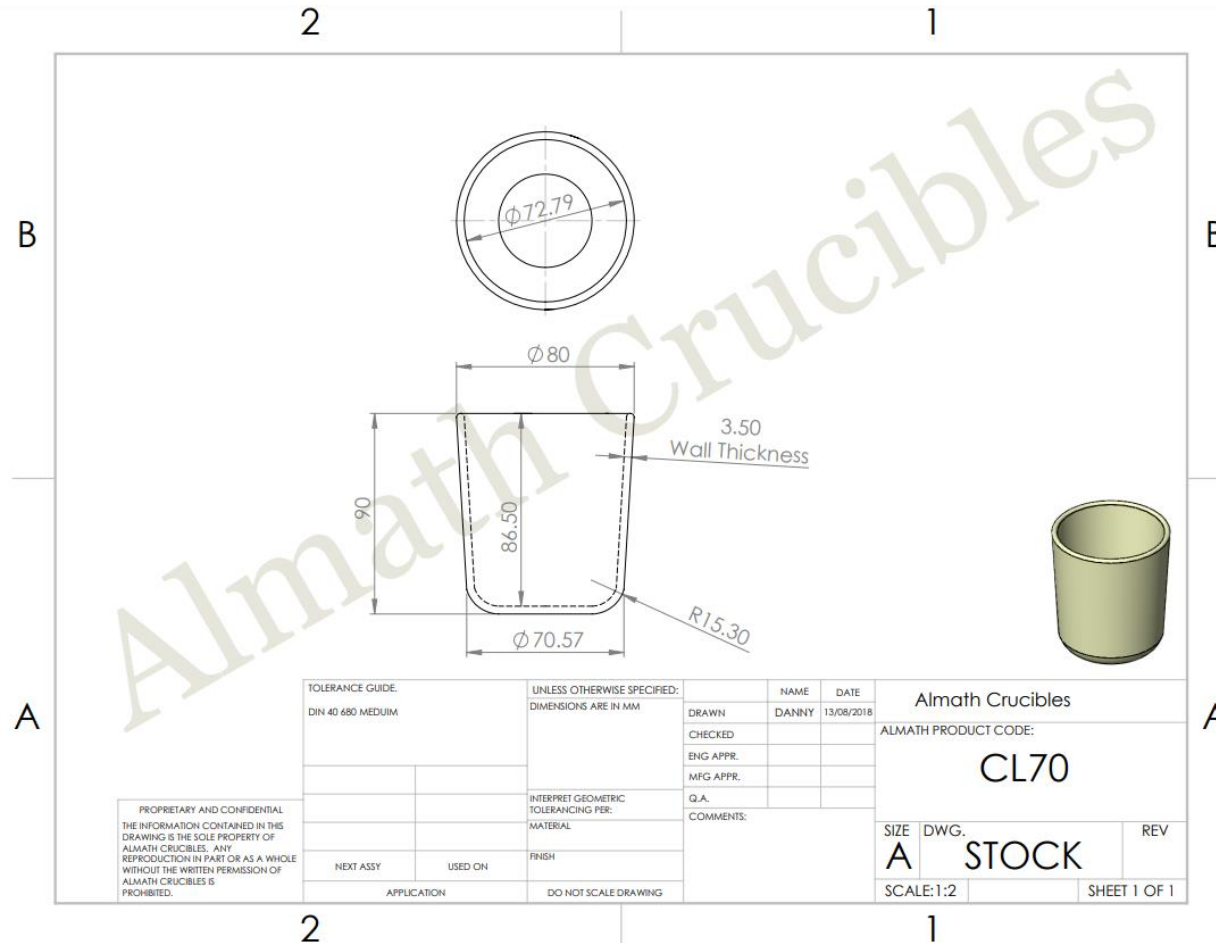
Finalmente, en la **Figura 68** se observa los resultados de peso relativo de la casa de calidad.

| | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | | | | | | |
| Max Relationship Value in Column | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Weight / Importance | 196,2 | 305,3 | 261,6 | 436,7 | 523,5 | 179,9 | 480,3 | 523,9 | 523,9 | 480,3 |
| Relative Weight | 5,0 | 7,8 | 6,7 | 11,2 | 13,4 | 4,6 | 12,3 | 13,4 | 13,4 | 12,3 |

Figura 68. Resultados de la casa de calidad: pesos relativos de los requerimientos de ingeniería.

11.4 ANEXO 4

PLANO CRISOL DE ALÚMINA CLÁSICO COMERCIAL 280 ML [40].



11.5 ANEXO 5

CÁLCULO DE VELOCIDADES Y MOMENTUM DEL CHORRO DE AGUA

A continuación, se presentan los cálculos detallados para la obtención de velocidades, área de aspersion y momentum generado por el chorro de agua. En la **Tabla 29**, se muestran los datos iniciales del agua y del argón. Adicionalmente, en la **Tabla 30**, se muestran los parámetros del chorro de agua, cabe resaltar que algunos valores fueron tomados de Asgarian [34], debido a que no se posee físicamente la boquilla seleccionada.

Tabla 29. Datos iniciales del agua, presión, diámetro de boquilla y caudal.

| Datos iniciales | | |
|--|--|------------|
| Variable | Valor | Referencia |
| Densidad del agua ($\rho_l@27^\circ C$) | 996,6 Kg/m^3 | [58] |
| Viscosidad dinámica del agua ($\mu_l@27^\circ C$) | $8,53 \times 10^{-4} \frac{Kg}{m * s}$ | [58] |
| Tensión superficial del agua (σ) | 0,072 N/m | [58] |
| Densidad del argón ($\rho_g@27^\circ C$) | 1,63 Kg/m^3 | [58] |
| Presión deseada (P) | 10.000 kPa | Diseño |
| Diámetro hidráulico de la boquilla (D_h) | 0,0021 m | [55] |
| Caudal ($Q_l@10MPa$) | 0,00015 m^3/s | [55] |

Tabla 30. Parámetros del chorro de agua.

| Datos del chorro de agua | | |
|---|--------------|-------------------|
| Variable | Valor | Referencia |
| Distancia radial del chorro (r) | 0,08 m | Diseño |
| Distancia radial a la salida de la tobera (r_b) | 0,008 m | [34] |
| Distancia hasta el punto de quiebre (L_b) | 0,072 m | Diseño |
| Ángulo de dispersión (θ) | 0,017 rad | [34] |
| Ángulo de esparcimiento (β) | 0,26 rad | Diseño |
| Espesor del punto de quiebre (t_b) | 0,00021 m | [34] |
| Diámetro de la gota de agua (d_D) | 0,0003 m | [34] |

Cálculo de velocidades

En un principio se calcula la velocidad de quiebre:

$$V_{lb} = 1,3P^{1/2} = 130 \text{ m/s}$$

Posteriormente, se determina el Reynolds, ya que con este se obtiene el coeficiente de arrastre ideal:

$$Re_{@V_{lb}} = \rho_{l@27^\circ\text{C}} * V_{lb} * D_h / \mu_{l@27^\circ\text{C}} = 311578,543$$

$$C_D = \frac{777 \left[\left(\frac{669806}{875} \right) + \left(\frac{114976}{1155} \right) Re + \left(\frac{707}{1380} \right) Re^2 \right]}{646 Re \left[\left(\frac{32829}{952} \right) + \left(\frac{924}{643} \right) Re + \left(\frac{1}{385718} \right) Re^2 \right]} = 3,53 \times 10^{-4}$$

Después, se determina el coeficiente de arrastre real con la finalidad de calcular λ :

$$\frac{1 + CD_{@V_{lb}}}{2} = 0,5$$

$$\lambda = \frac{3 * C_D * \rho_g}{4 * d_D * \rho_l} = 2,36 \text{ m}^{-1}$$

Con el valor de λ se obtiene la velocidad del agua:

$$V_l = V_{lb} e^{-\lambda(r-r_b)} = 109,65 \text{ m/s}$$

Para obtener la velocidad del gas circundante es necesario calcular las constantes K_1 y K_2 :

$$K_1 = r_b t_b = 1,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$K_2 = \frac{\rho_l Q_l}{\rho_g \beta} = 0,35 \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad del gas se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_g^2 = \frac{K_1 V_{gb}^2 - K_2 (V_l - V_{lb})}{r[\theta(r - r_b) + t_b]} = 250,39 \text{ m/s}$$

Cálculo de flujo de momentum efectivo

En primera instancia se determinó el área de rociado y los flujos volumétricos del agua y del gas:

$$A = \beta r[\theta(r - r_b) + t_b] = 2,98 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\phi_l = \frac{Q_l}{V_l * A} = 0,04586$$

$$\phi_g = 1 - \phi_l = 0,9538$$

Después, se determinaron individualmente el flujo de momentum del agua y del gas para luego realizar una sumatoria:

$$\dot{M} = \frac{1}{A} M = \phi \rho V^2$$

$$\sum \dot{M} = 647251,425 \frac{Kg}{m * s^2}$$

Finalmente, se obtiene el flujo de momentum efectivo:

$$M_{eff} = \left(\sum \dot{M} \right) * \text{sen } \alpha = 321606,37 \frac{Kg}{m * s^2}$$

11.6 ANEXO 6

DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN DE LA PARTÍCULA

Se comienza determinando los datos iniciales del argón mostrados en la **Tabla 31**:

Tabla 31. Parámetros iniciales del argón.

| Datos iniciales del argón | | |
|--|---|----------------------------|
| Variable | Valor | Ecuación/referencia |
| Densidad ($\rho_{g@27^{\circ}C}$) | $1,663 \text{ Kg}/\text{m}^3$ | [58] |
| Viscosidad dinámica a temperatura ambiente ($\mu_{g@27^{\circ}C}$) | $2,25 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}$ | [58] |
| Viscosidad dinámica a temperatura superficial ($\mu_{g@241^{\circ}C}$) | $3,47 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}}$ | [58] |
| Conductividad térmica ($k_{g@27^{\circ}C}$) | $0,01772 \frac{\text{W}}{\text{m} * ^{\circ}C}$ | [58] |
| Capacidad calorífica ($C_{p@27^{\circ}C}$) | $520,3 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^{\circ}C}$ | [58] |
| Prandt ($Pr_{@27^{\circ}C}$) | 0,66065 | [58] |
| Velocidad (V_g) | $251,223 \text{ m}/\text{s}$ | Ecuación 18 |
| Diámetro de partícula metálica (d_m) | $1,02 \times 10^{-4}$ | $d_{50} = 893P_w^{-0,94}$ |

Después, se determina el Reynolds:

$$Re_g = \frac{V_g * d_m}{v_{g@27^\circ\text{C}}} = 1853,64$$

Con los valores obtenidos se determina el número de Nusselt y, por ende, el coeficiente de convección:

$$Nu_{esf} = 2 + [0,4Re^{0,5} + 0,06Re^{2/3}] * Pr^{0,4} * \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_s}\right)^{\frac{1}{4}} = 21,98$$

$$h = \frac{Nu_{esf} * k_g}{d_m} = 3817,75 \frac{W}{m^2 * ^\circ\text{C}}$$

Posteriormente, se muestra en la **Tabla 32** los parámetros iniciales de temperatura y del metal:

Tabla 32. Parámetros iniciales para el tiempo de solidificación.

| Parámetros iniciales | | |
|--|--|------------|
| Variable | Valor | Referencia |
| Temperatura de sobrecalentamiento (T_i) | 432 °C | Diseño |
| Temperatura ambiente (T_∞) | 27 °C | Diseño |
| Temperatura admisible ($T_{(t)}$) | 50 °C | Diseño |
| Capacidad calorífica del estaño (C_{pm}) | $256 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ\text{C}}$ | [24] |

Luego, se calculó la masa teórica de la partícula esférica y el área superficial:

$$m = \rho_m * \frac{\pi}{6} * (d_m)^3 = 4,09 \times 10^{-9} \text{ Kg}$$

$$A_s = \pi * (d_m)^2 = 3,27m^2$$

Finalmente, se determinó el tiempo de solidificación de la partícula:

$$t_{sol} = \frac{\ln \left| \frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \right| * m_m * C_{pm}}{-h * A_{sm}} = 0,024 s$$

11.7 ANEXO 7

EXPLICACIÓN GENERAL DEL AGUA TIPO 1

El agua tipo 1 es considerada agua ultrapura debido a las bajas concentraciones de iones, partículas e impurezas. Como se puede observar en la **Figura 69**, se debe de pasar por tratamientos de aguas en las que se encuentra: filtrar el agua, declorarla, descalcificarla y des ionizarla de manera directa. Este tipo de agua se puede encontrar comercialmente y es comúnmente usada en los laboratorios de escuelas y universidades [94].

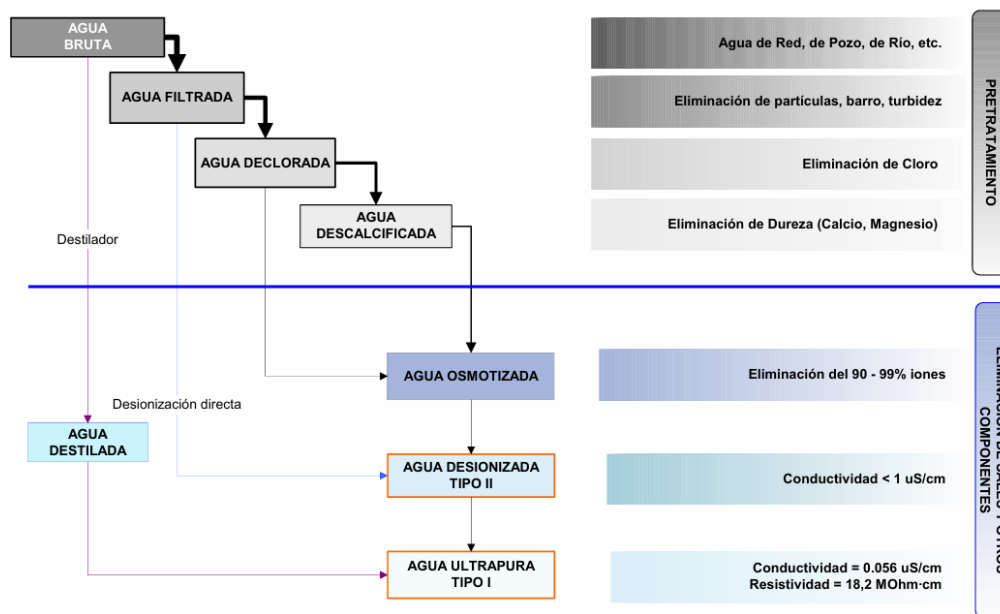
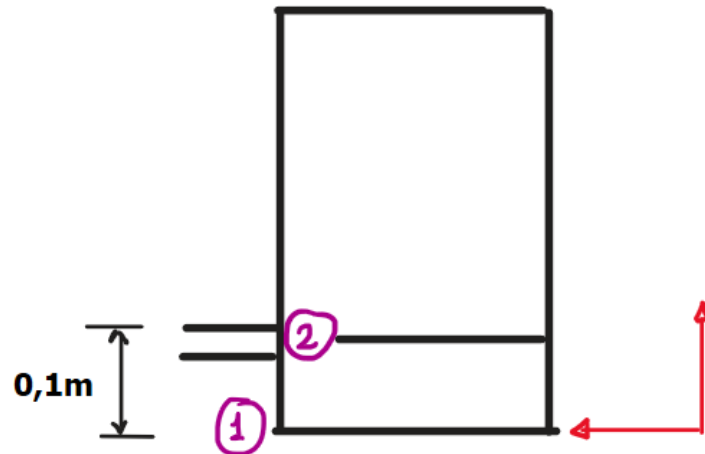


Figura 69. Proceso para obtener agua ultrapura tipo I [94].

11.8 ANEXO 8

DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE TRABAJO A LA SALIDA DEL CONTENEDOR

Teniendo en cuenta la **Figura 49**, se realizó la ecuación de Bernoulli en dos puntos de operación, la superficie del agua (asumiendo que no está lleno) y el punto a la salida del tanque.



$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Se puede simplificar esta ecuación sabiendo que la velocidad 2 del fluido en la superficie del fluido tiende a cero y que se operan a presiones relativas. El resultado de esta simplificación es la siguiente:

$$Z_2 = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$$

Si se despeja la presión de trabajo en metros, se obtiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} = Z_2 - \frac{V_1^2}{2g}$$

Si se utiliza una densidad de agua a 27°C de $996,6 \text{ kg/m}^3$ y se asume la gravedad de $9,81 \text{ m/2}^2$, se tiene entonces una presión de $-0,742 \text{ m}$ [37].

11.9 ANEXO 9

PARÁMETROS INICIALES PARA PÉRDIDAS POR TUBERÍAS.

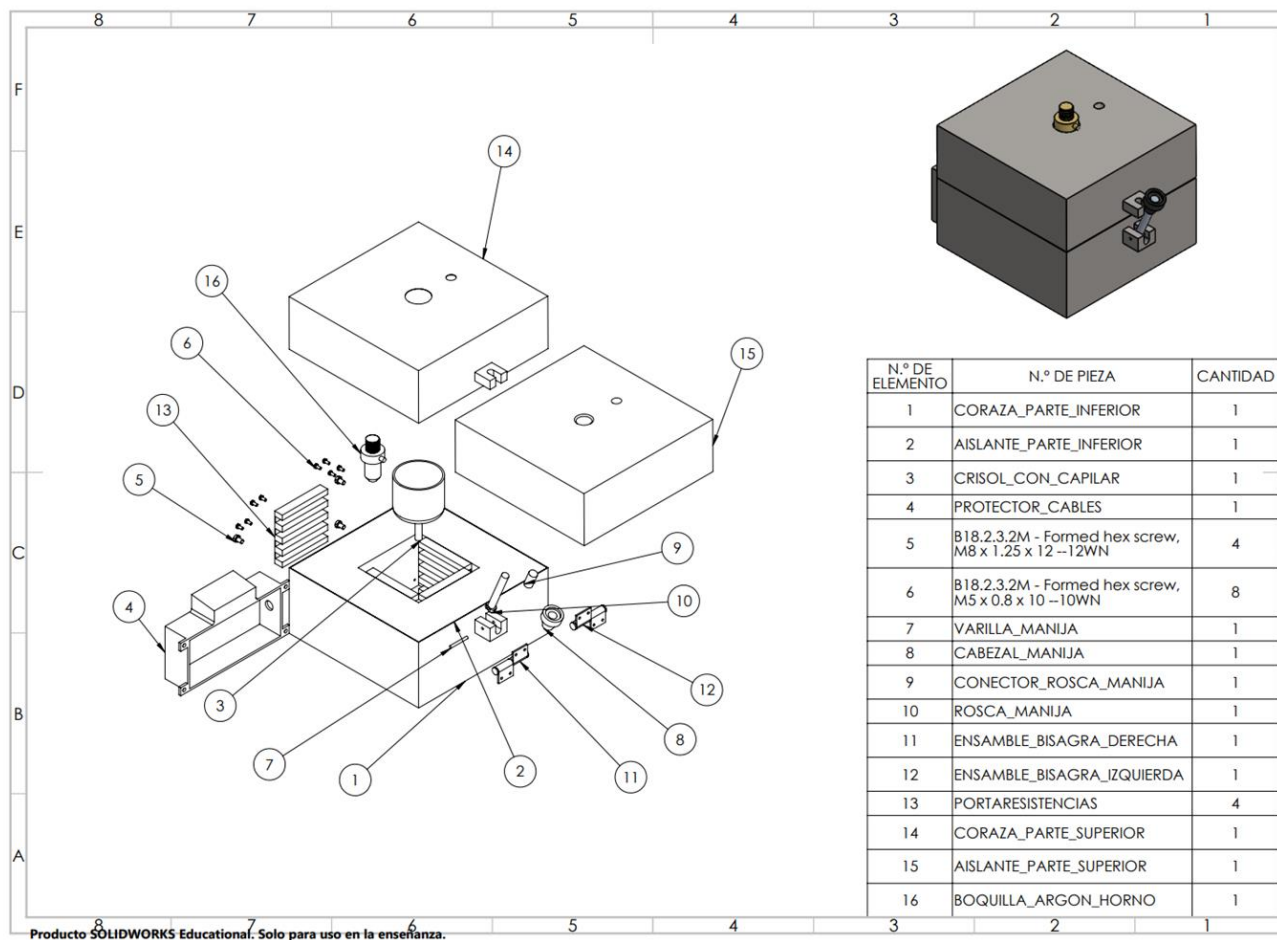
A continuación, se muestra en la **Tabla 33** los coeficientes de fricción de cada accesorio, rugosidad de los materiales, densidad y viscosidad dinámica [37].

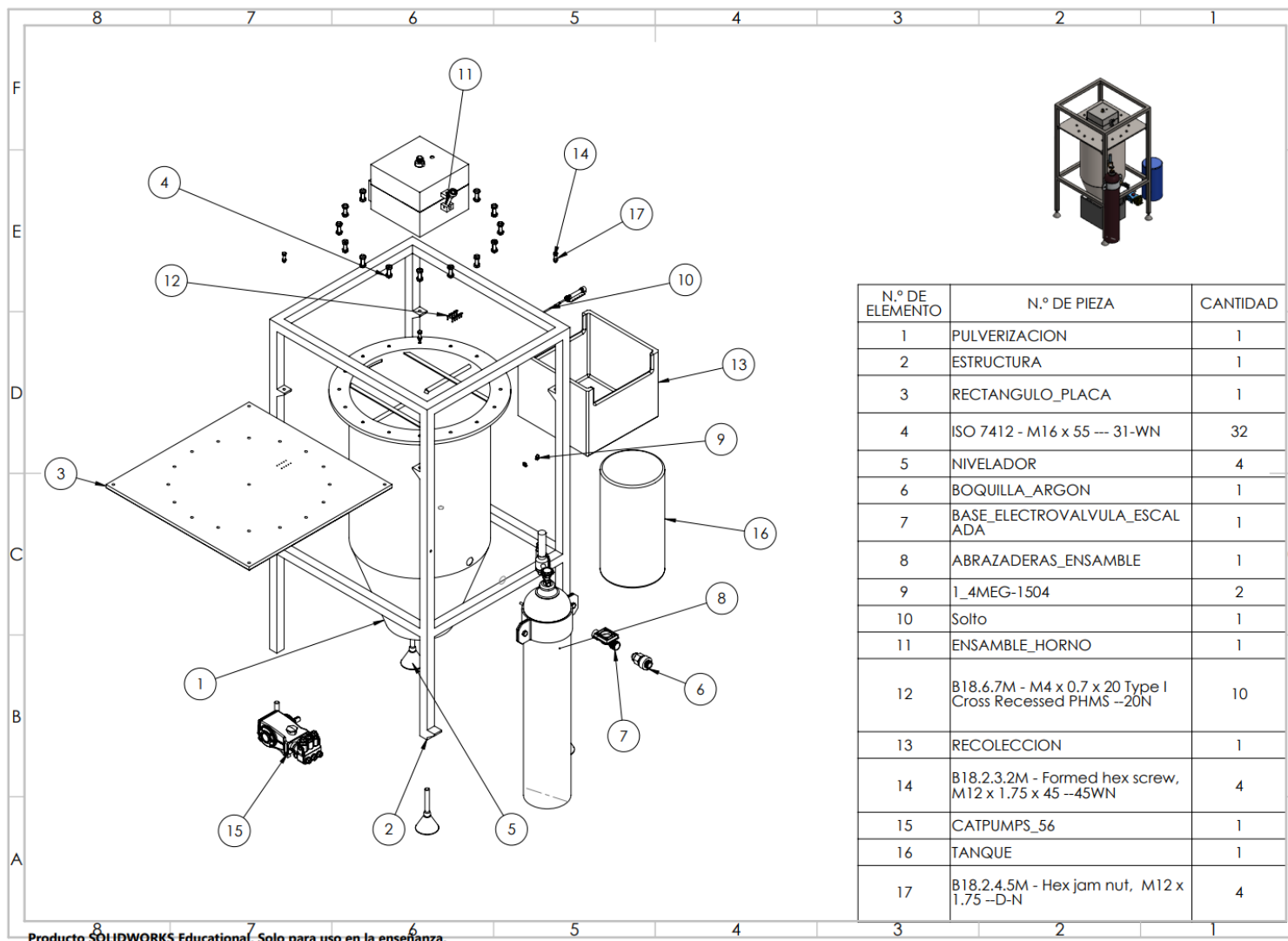
Tabla 33. Parámetros iniciales para perdidas por tuberías y accesorios.

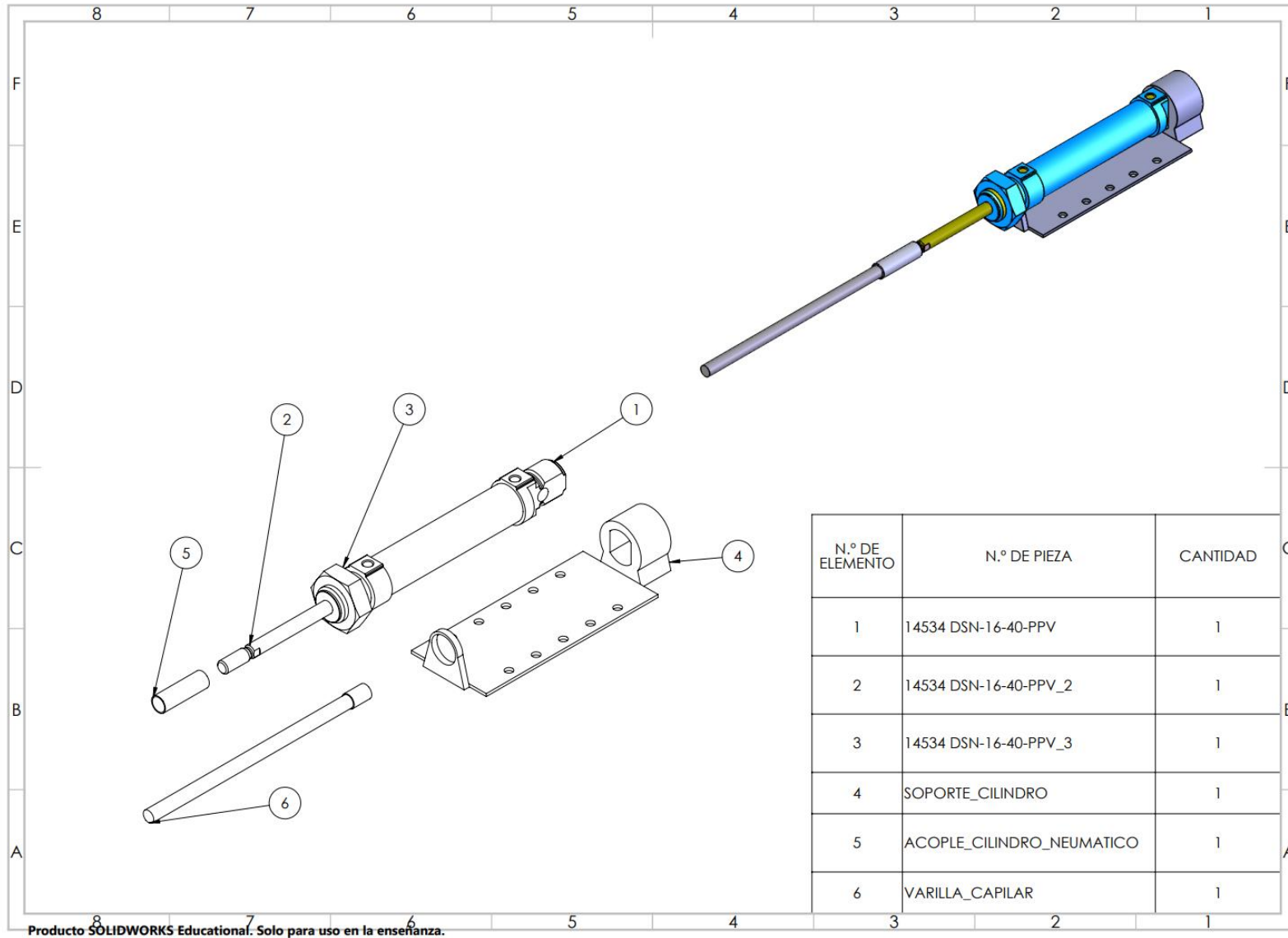
| Parámetro | Valor |
|--|-----------------------------------|
| Densidad del agua a 27°C | 996 kg/m ³ |
| Viscosidad dinámica del agua a 27°C | 8,53 x10 ⁻⁴ kg/(m * s) |
| K de válvula de compuerta | 0,2 |
| K de accesorio Te | 2,0 |
| K de cambio de sección en un tanque | 0,5 |
| K de reducción de diámetro 1/2" a 1/4" | 0,2 |
| K por inclinación de 60° | 0,4 |
| K de reducción de diámetro 1/4" a boquilla | 0,275 |
| Rugosidad del plástico genérico | 0,0015 mm |
| Rugosidad del caucho | 0,01 mm |
| Rugosidad de acero inoxidable | 0,02 mm |

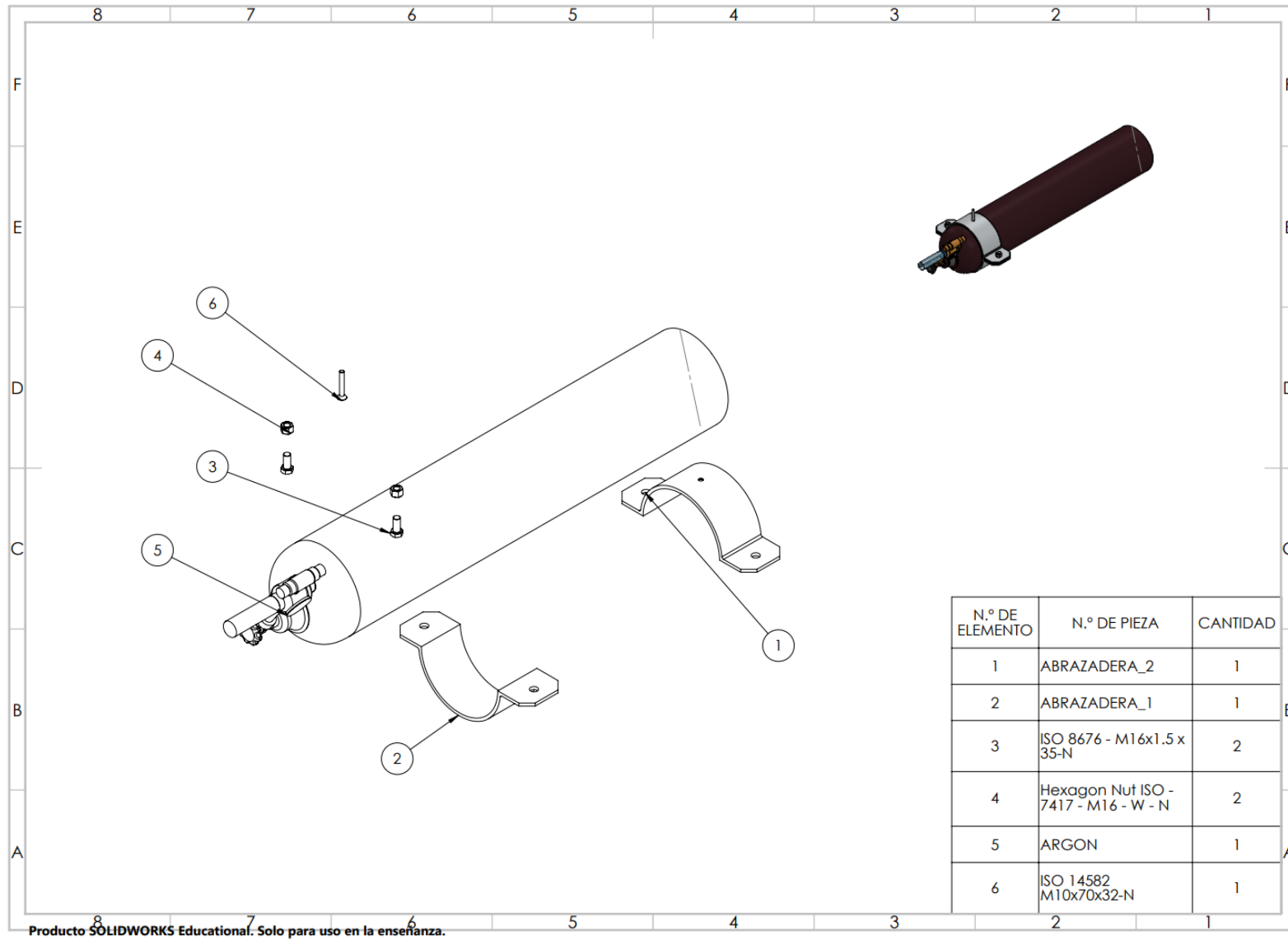
11.10 ANEXO 10

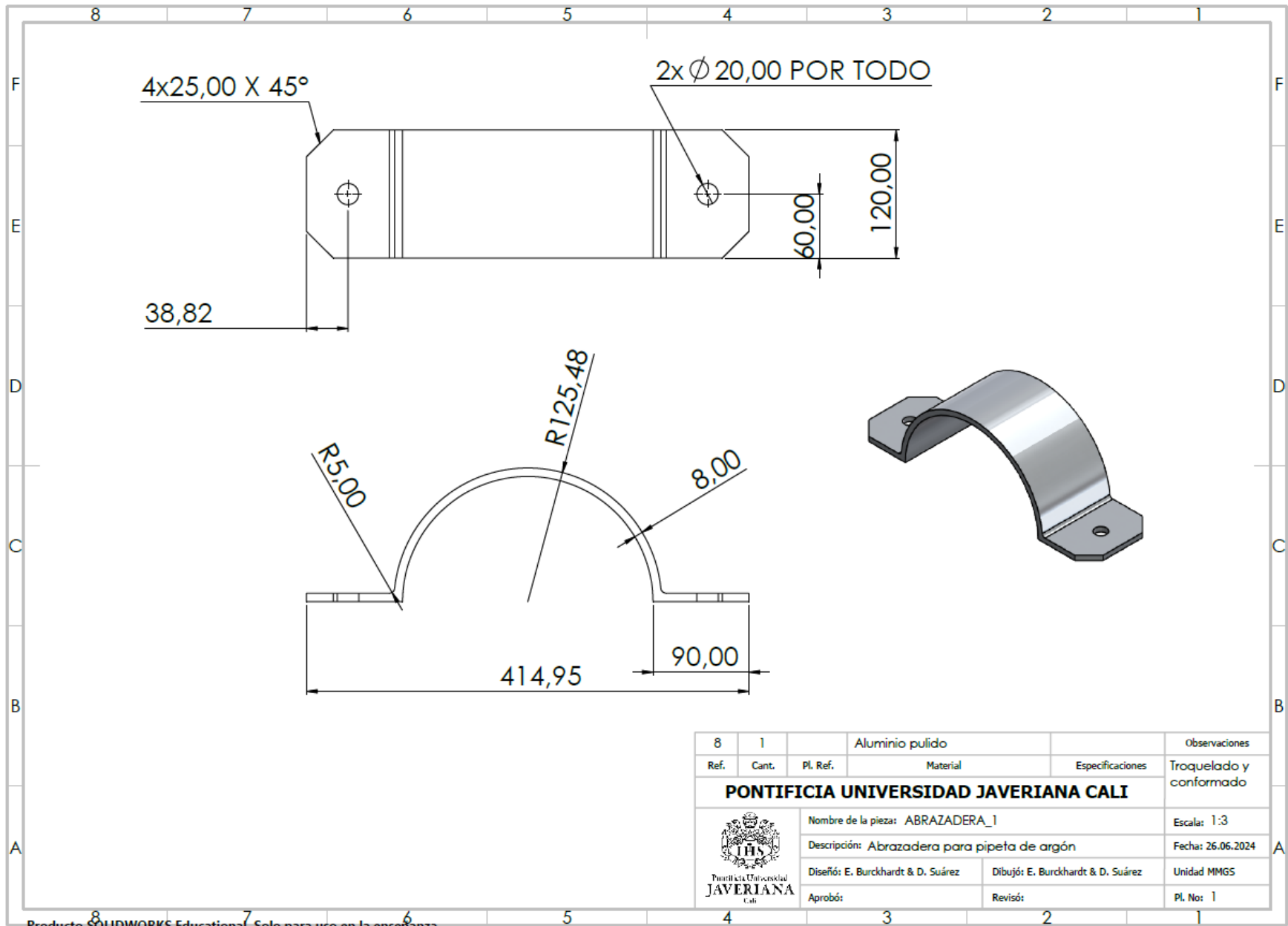
PLANOS DE LA MÁQUINA




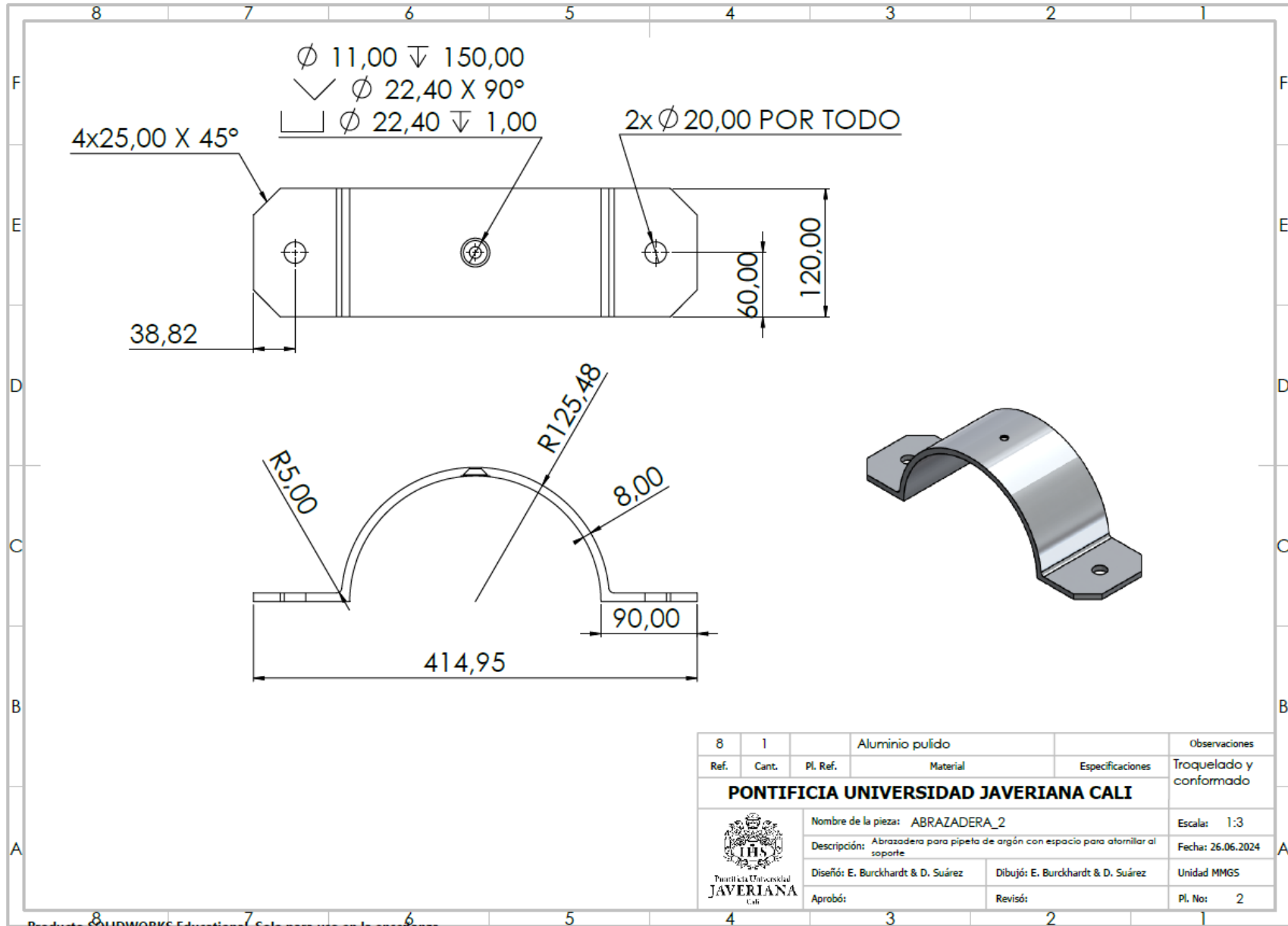


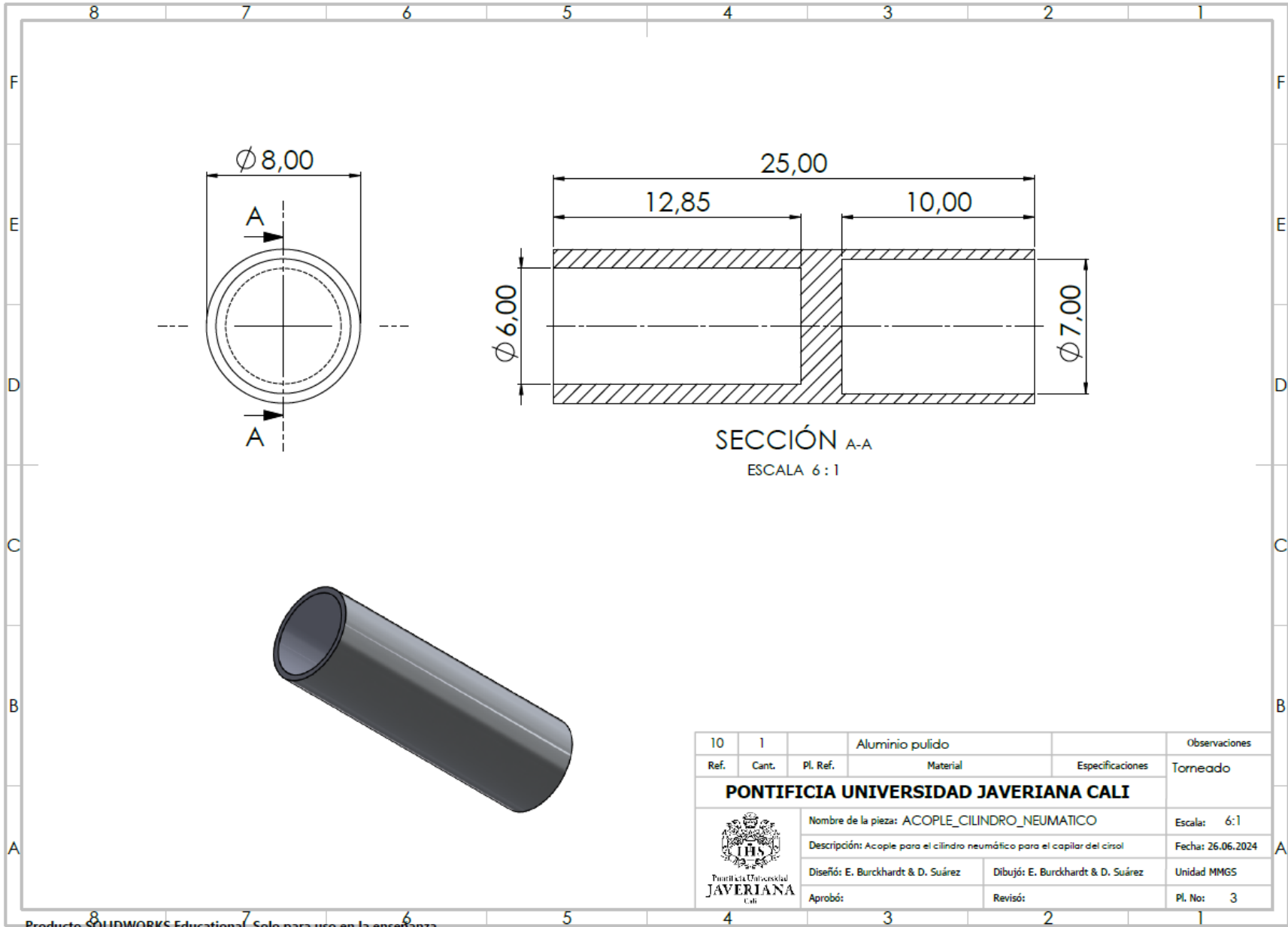





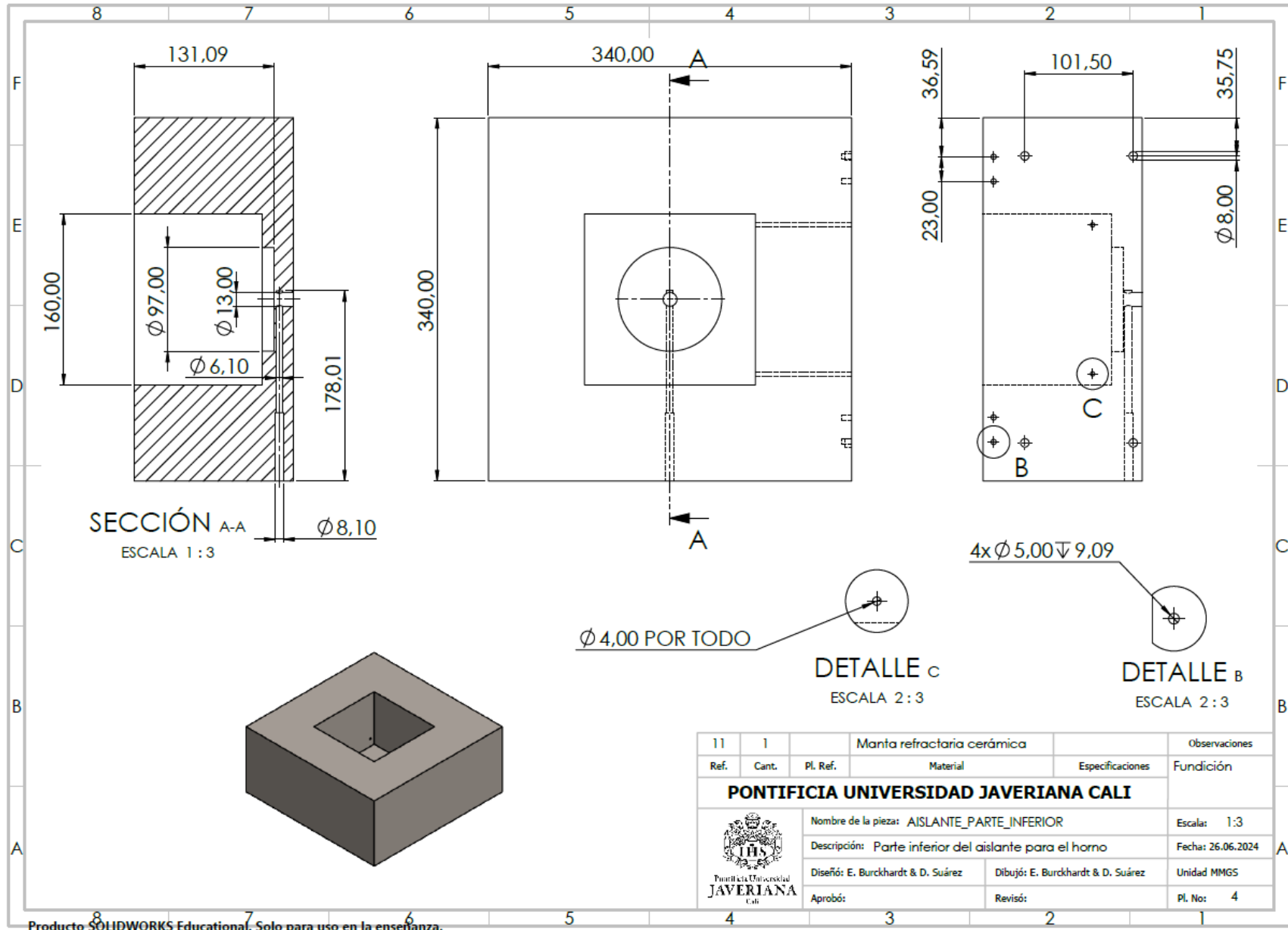


| | | | | | |
|---|-------|----------|-----------------------------------|--|-------------------------|
| 8 | 1 | | Aluminio pulido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Troquelado y conformado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | | | Nombre de la pieza: ABRAZADERA_1 | Escala: 1:3 |
| | | | | Descripción: Abrazadera para pipeta de argón | Fecha: 26.06.2024 |
| Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS | |
| Aprobó: | | | Revisó: | Pl. No: 1 | |

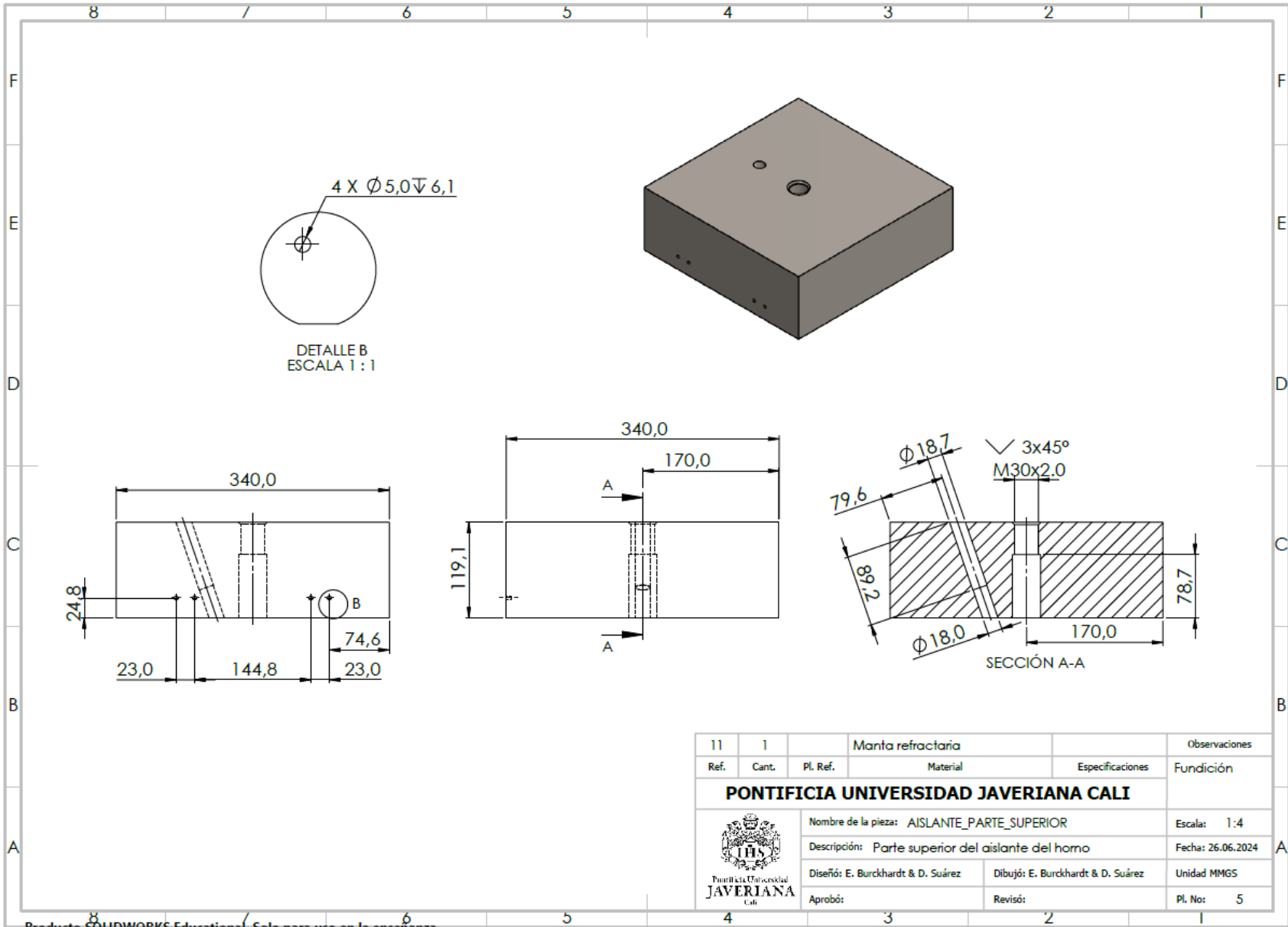


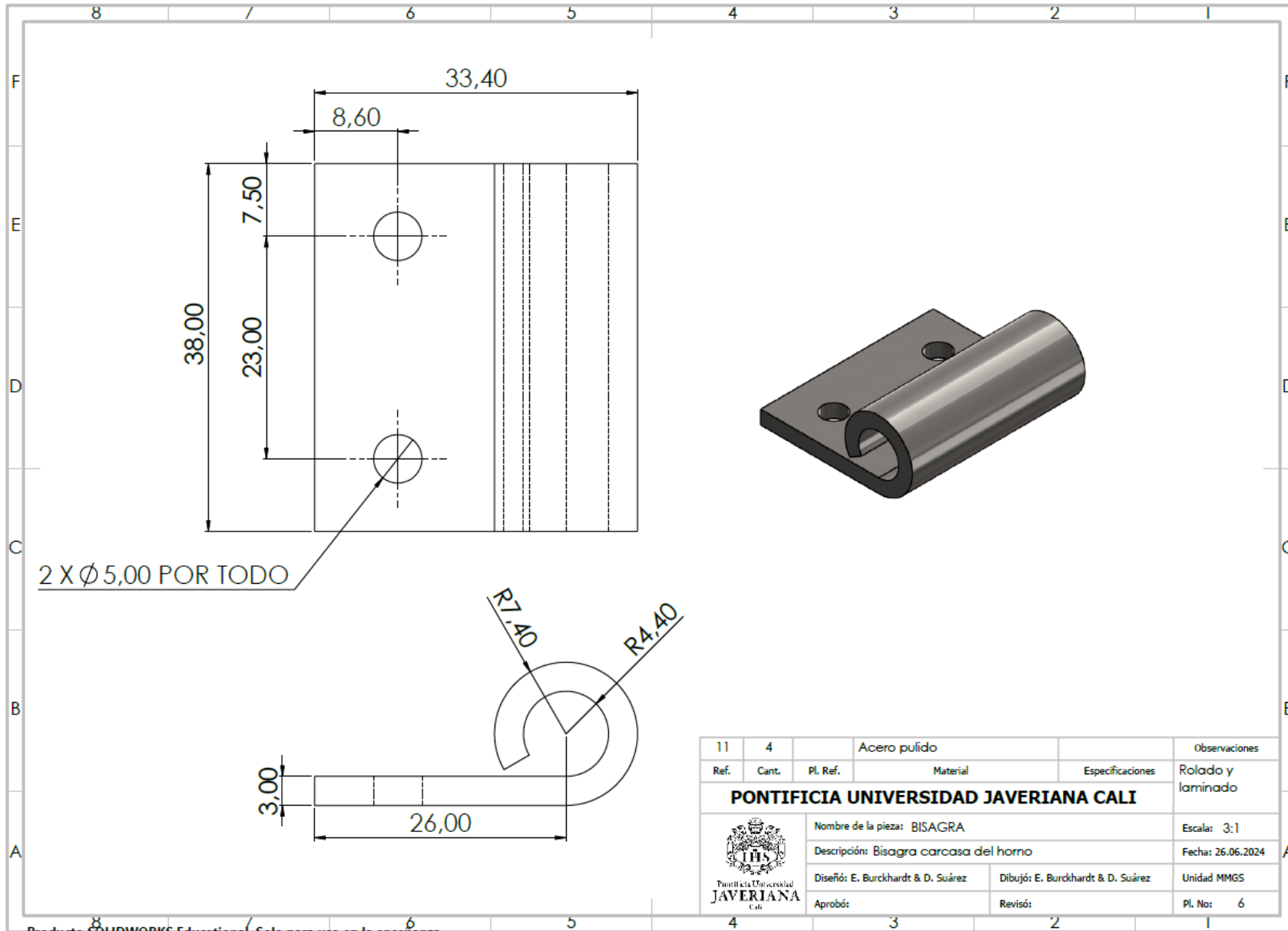


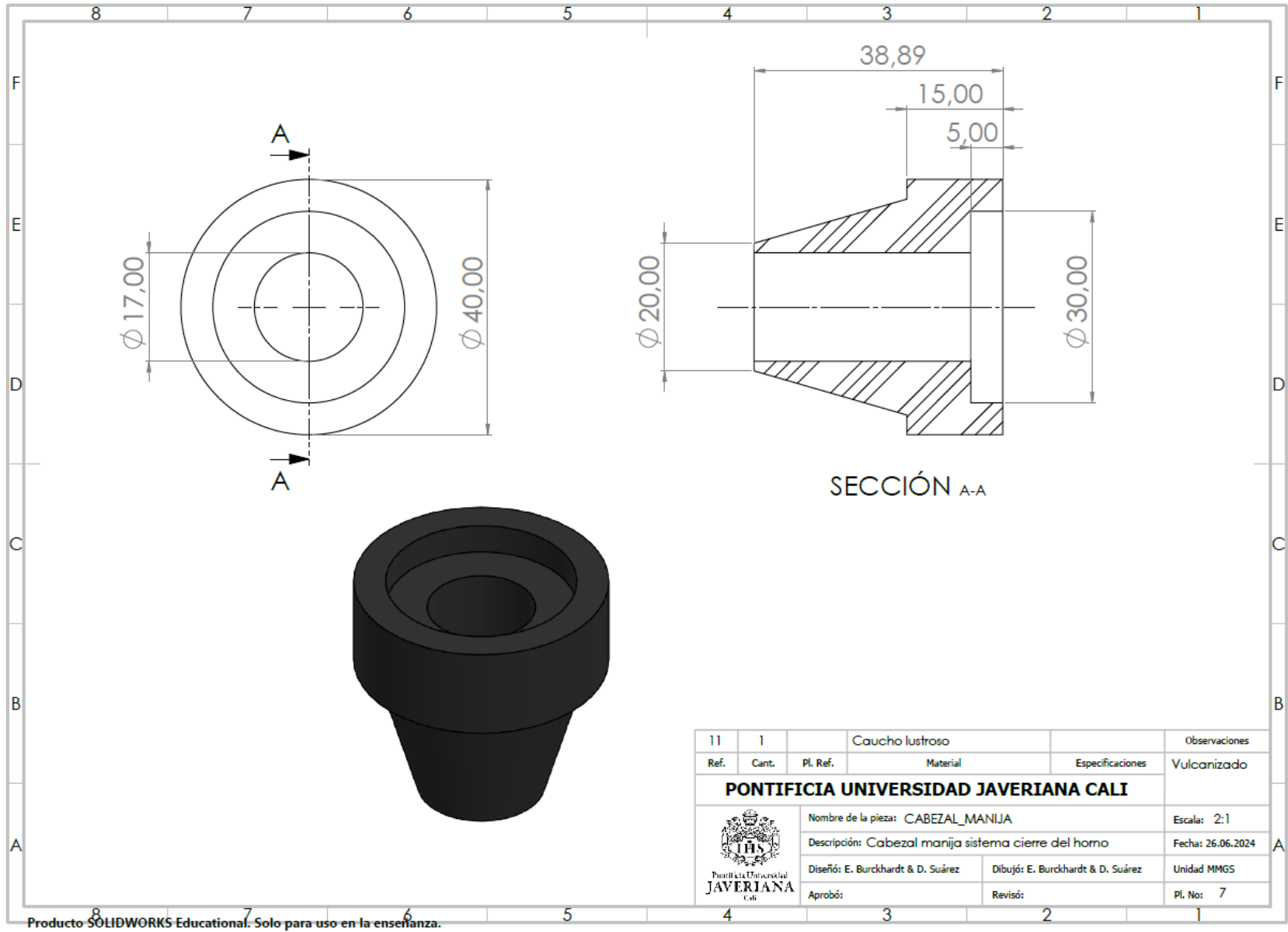
| | | | | | |
|---|-------|---|-----------------------------------|-------------------|---------------|
| 10 | 1 | | Aluminio pulido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Torneado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: ACOUPLE_CILINDRO_NEUMATICO | | Escala: 6:1 | |
| | | Descripción: Acople para el cilindro neumático para el capilar del cirsol | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS | |
| | | Aprobó: | Revisó: | Pl. No: 3 | |




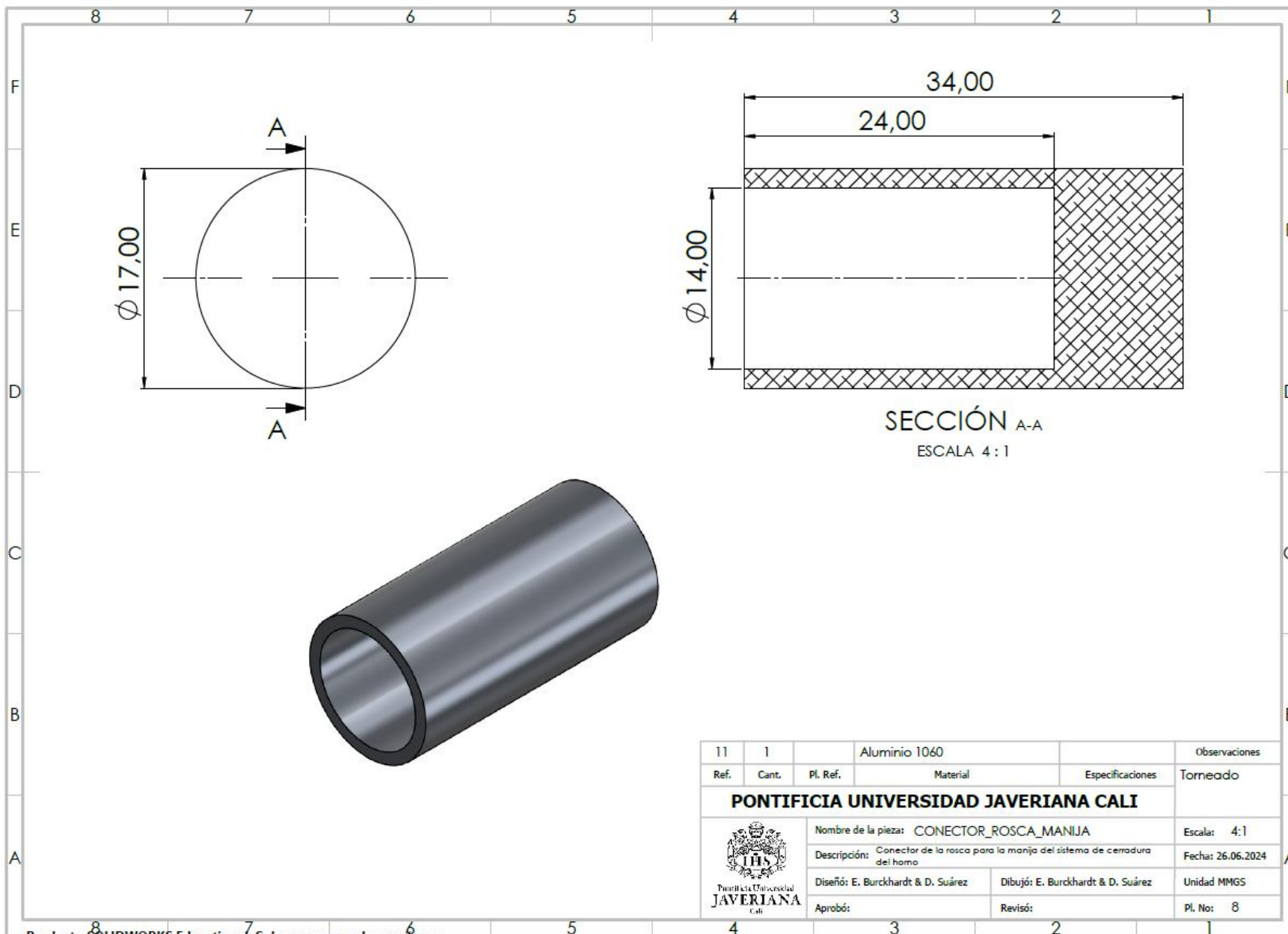
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Observaciones |
|--|-------|---------------------------|---|------------------|---------------------------|
| 11 | 1 | | Manta refractaria cerámica | | Fundición |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
| Nombre de la pieza: | | | AISLANTE_PARTE_INFERIOR | | Escala: 1:3 |
| Descripción: | | | Parte inferior del aislante para el horno | | Fecha: 26.06.2024 |
| Diseño: | | E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: | | E. Burckhardt & D. Suárez |
| Aprobó: | | | Revisó: | | |
| | | | | | Unidad MMGS |
| | | | | | Pl. No: 4 |



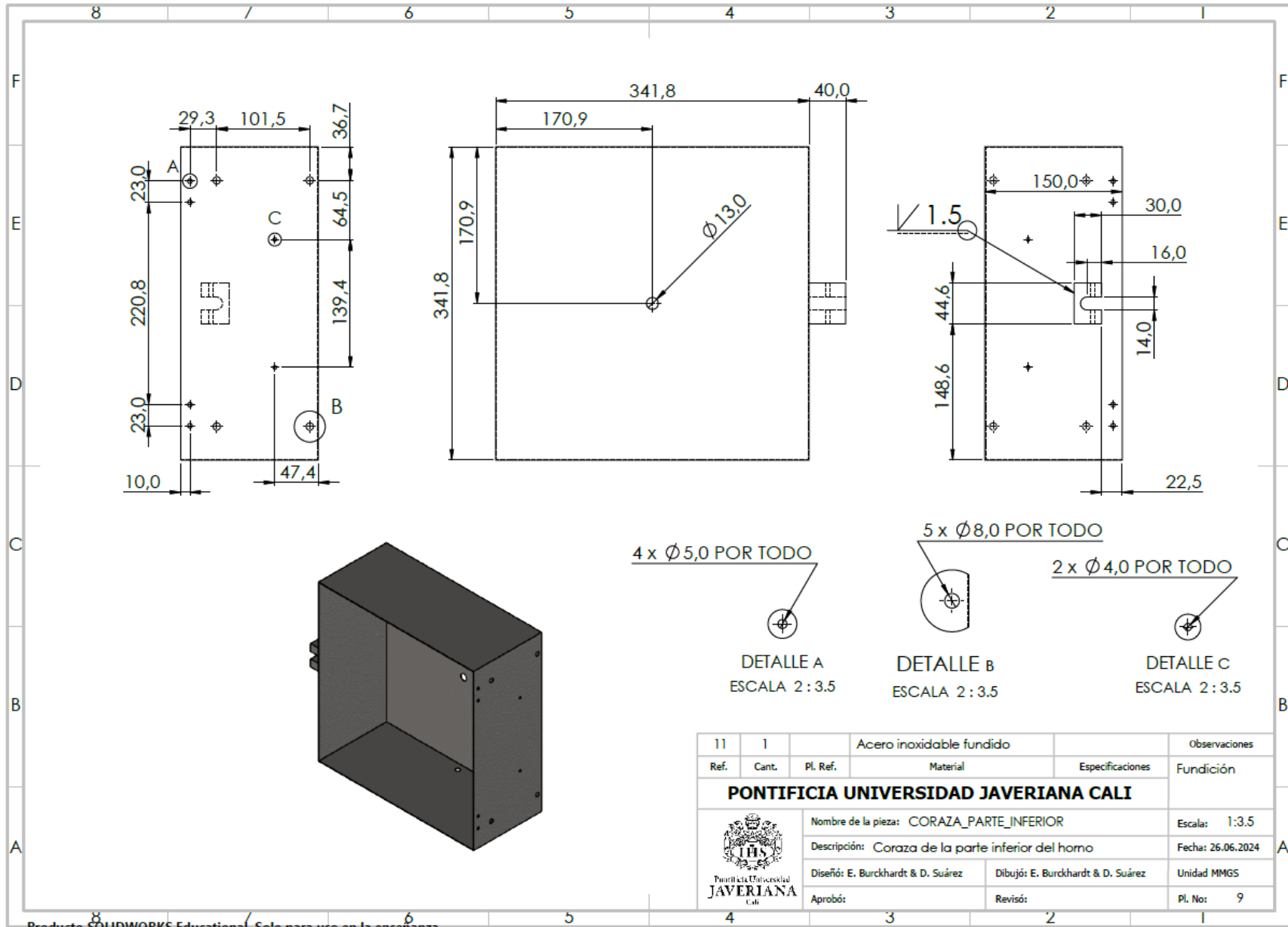




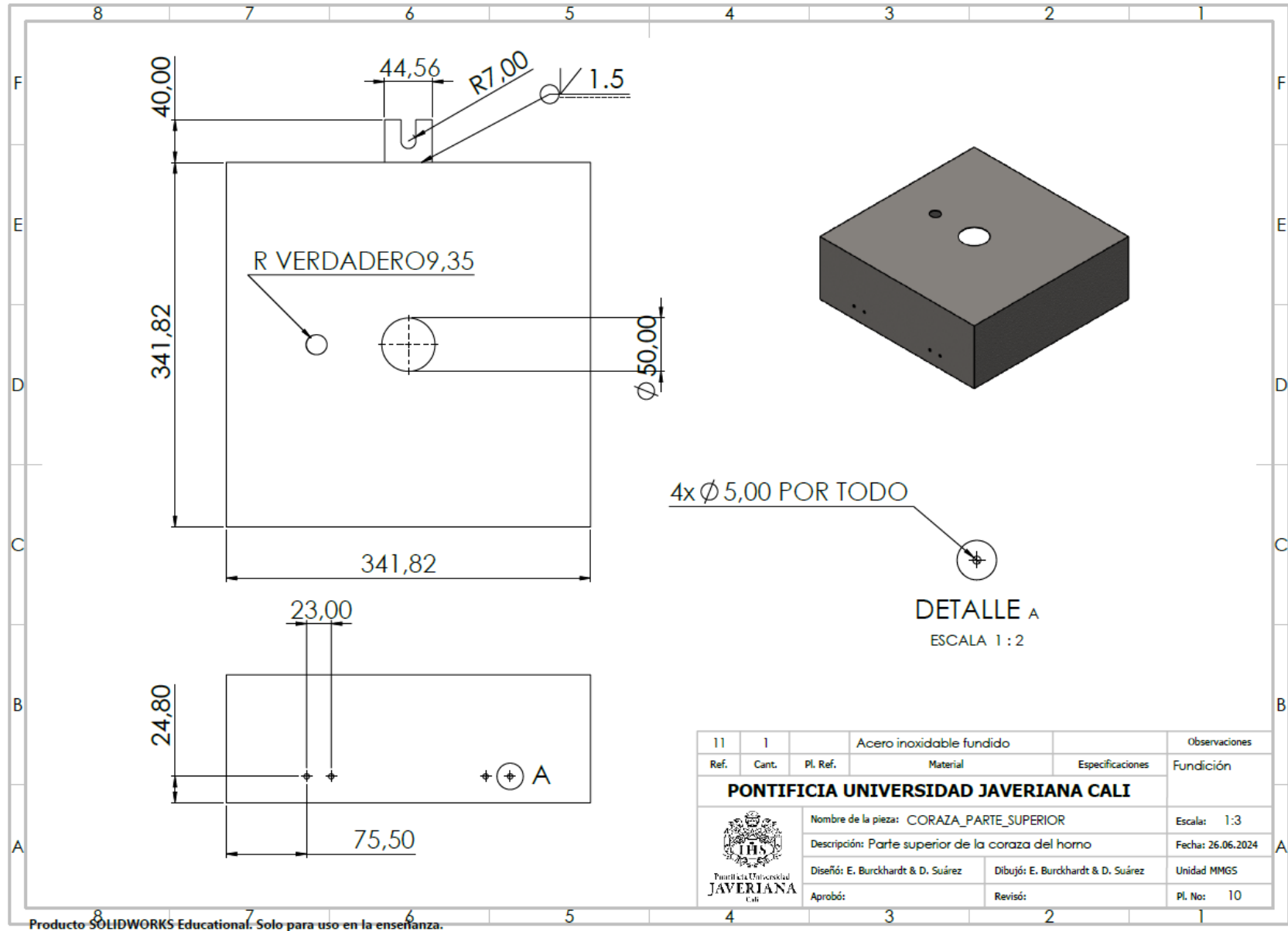
| | | | | | | |
|---|-------|--|-----------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|
| 11 | 1 | | Caucho lustroso | | Observaciones | |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Vulcanizado | |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: CABEZAL_MANIJA | | Escala: 2:1 | | |
| | | Descripción: Cabezal manija sistema cierre del horno | | | | Fecha: 26.06.2024 |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | | Unidad MMGS |
| | | Aprobó: | | Revisó: | | Pl. No: 7 |




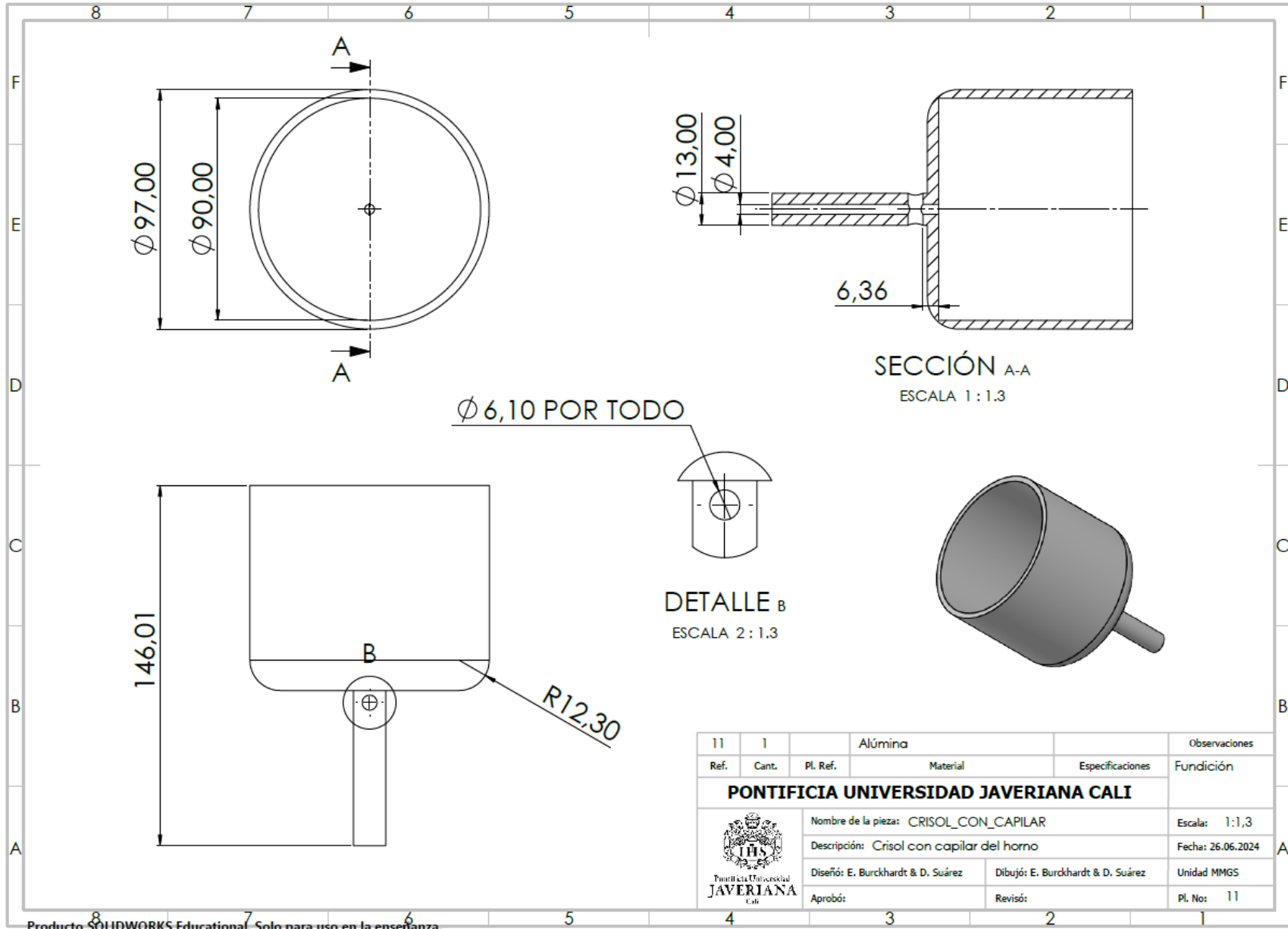
| | | | | | |
|---|-------|---|-----------------------------------|-------------------|---------------|
| 11 | 1 | | Aluminio 1060 | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Torneado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: CONECTOR_ROSCA_MANIJA | | Escalas: 4:1 | |
| | | Descripción: Conector de la rosca para la manija del sistema de cerradura del horno | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS | |
| | | Aprobó: | Revisó: | Pl. No: 8 | |




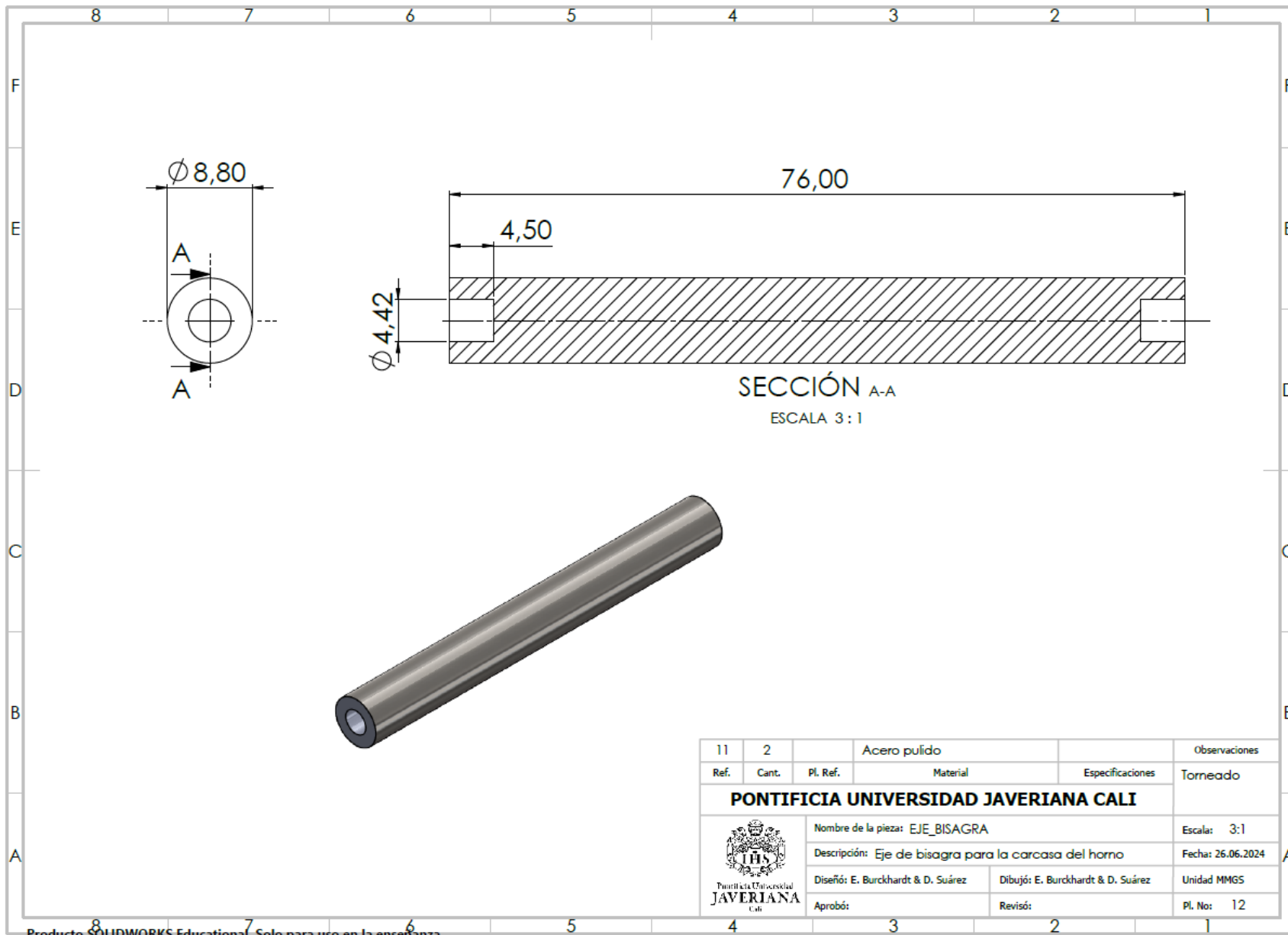
| | | | | | |
|--|-------|----------|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| 11 | 1 | | Acero inoxidable fundido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Fundición |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
| Nombre de la pieza: CORAZA PARTE INFERIOR | | | | | Escala: 1:3.5 |
| Descripción: Coraza de la parte inferior del horno | | | | | Fecha: 26.06.2024 |
| Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | | Unidad MMGS |
| Aprobó: | | | Revisó: | | Pl. No: 9 |



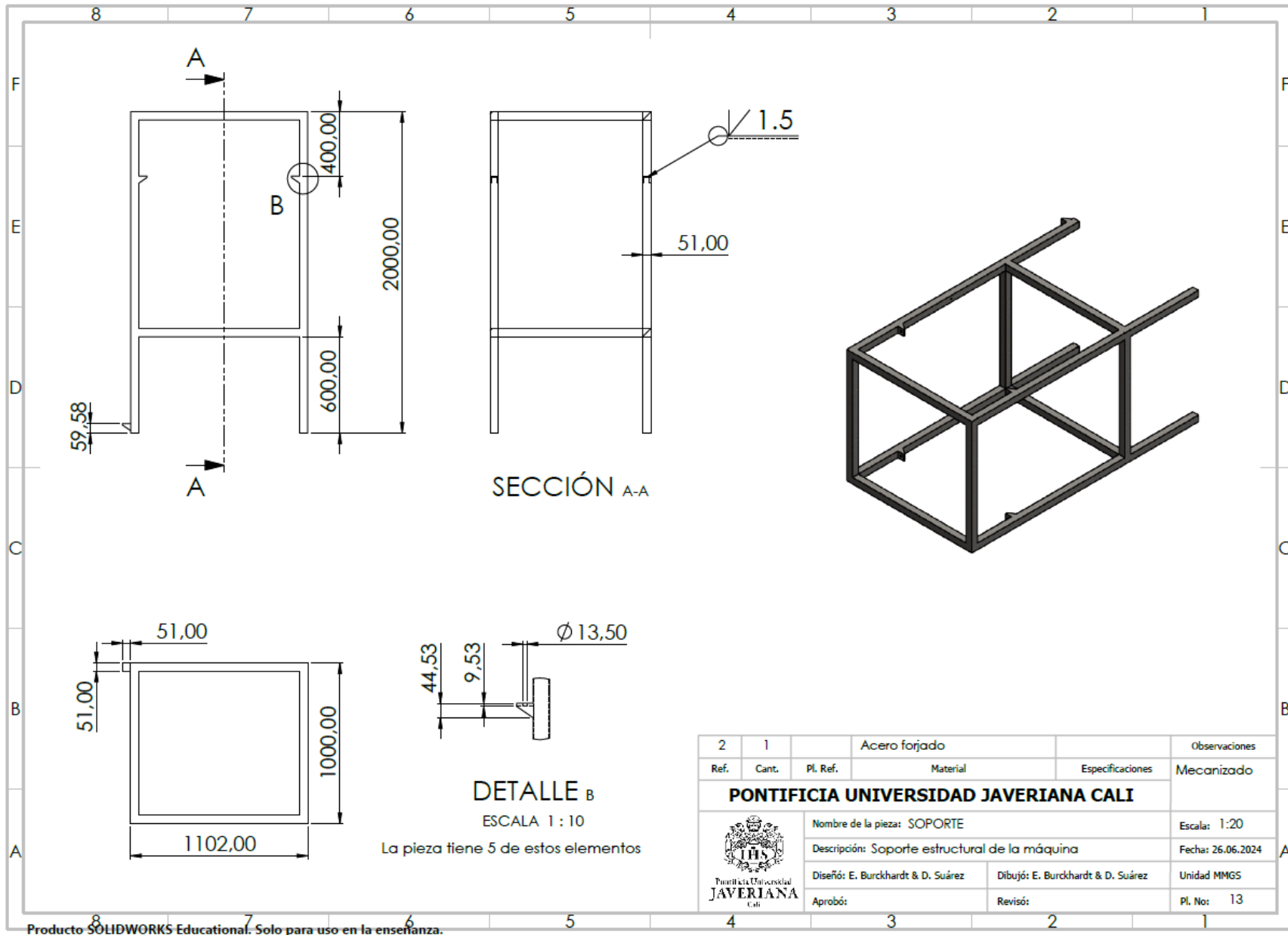
| | | | | | | |
|---|-------|--|--------------------------|-----------------------------------|---------------|-------------------|
| 11 | 1 | | Acero inoxidable fundido | | Observaciones | |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Fundición | |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: CORAZA_PARTE_SUPERIOR | | Escala: 1:3 | | |
| | | Descripción: Parte superior de la coraza del horno | | | | Fecha: 26.06.2024 |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | | Unidad MMGS |
| | | Aprobó: | | Revisó: | | Pl. No: 10 |

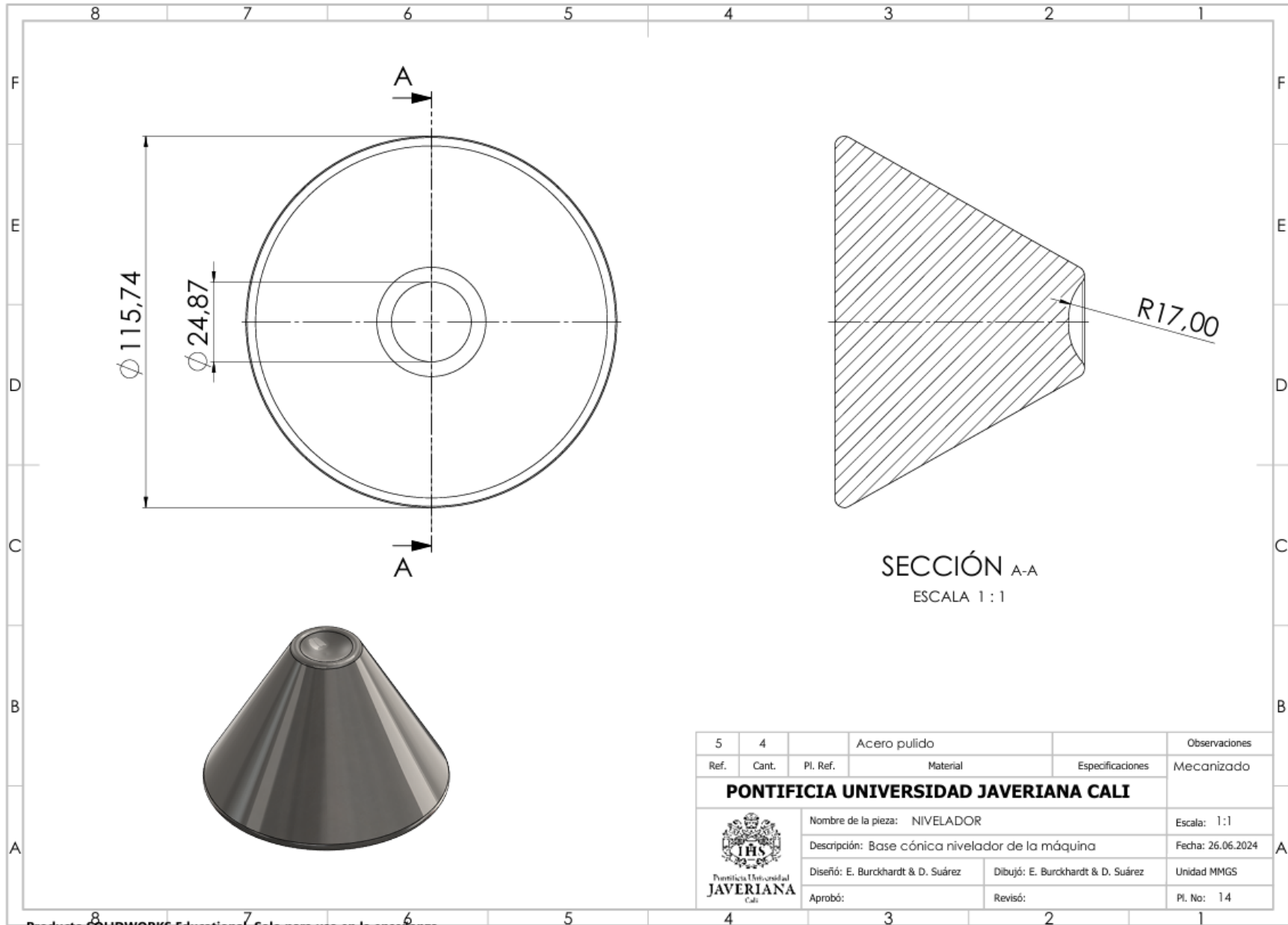



| | | | | | |
|---|-------|---|-----------------------------------|-------------------|---------------|
| 11 | 1 | | Alúmina | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Fundición |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: CRISOL_CON_CAPILAR | | Escala: 1:1,3 | |
| | | Descripción: Crisol con capilar del horno | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS | |
| | | Aprobó: | Revisó: | Pl. No: 11 | |

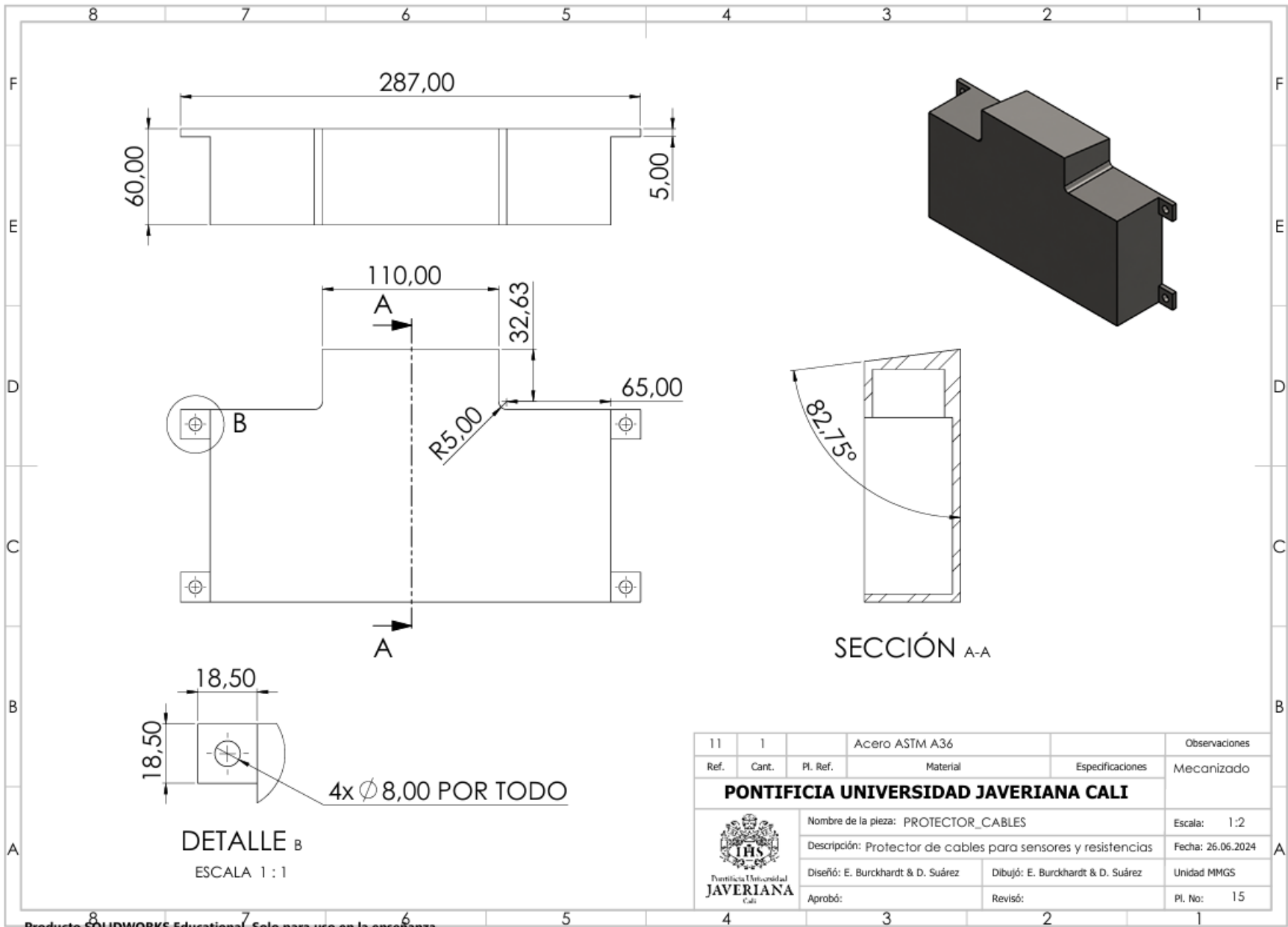


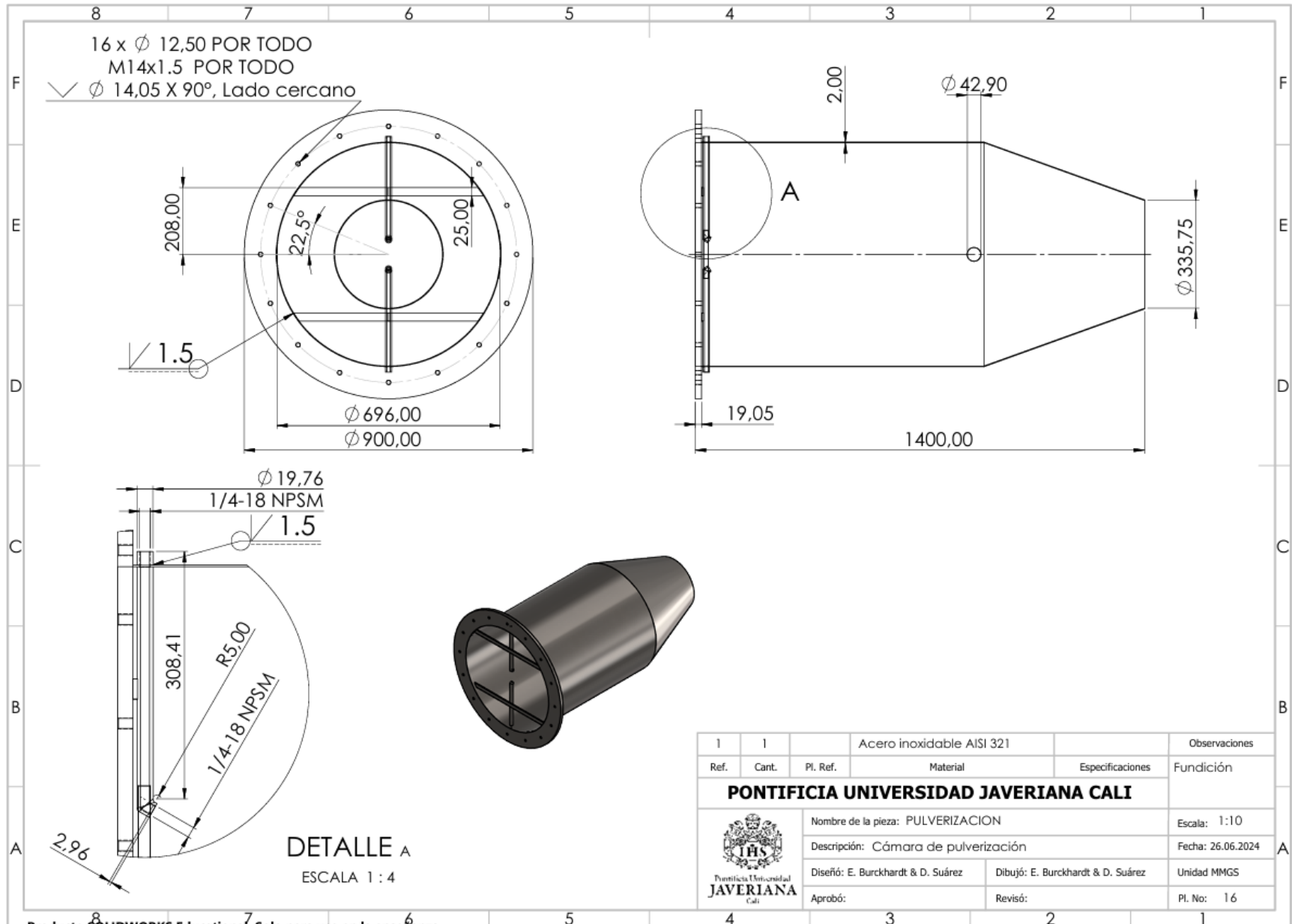
| | | | | | |
|--|-------|---|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| 11 | 2 | | Acero pulido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Torneado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
| | | Nombre de la pieza: EJE_BISAGRA | | | Escala: 3:1 |
| | | Descripción: Eje de bisagra para la carcasa del horno | | | Fecha: 26.06.2024 |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | | Unidad MMGS |
| | | Aprobó: | Revisó: | | Pl. No: 12 |

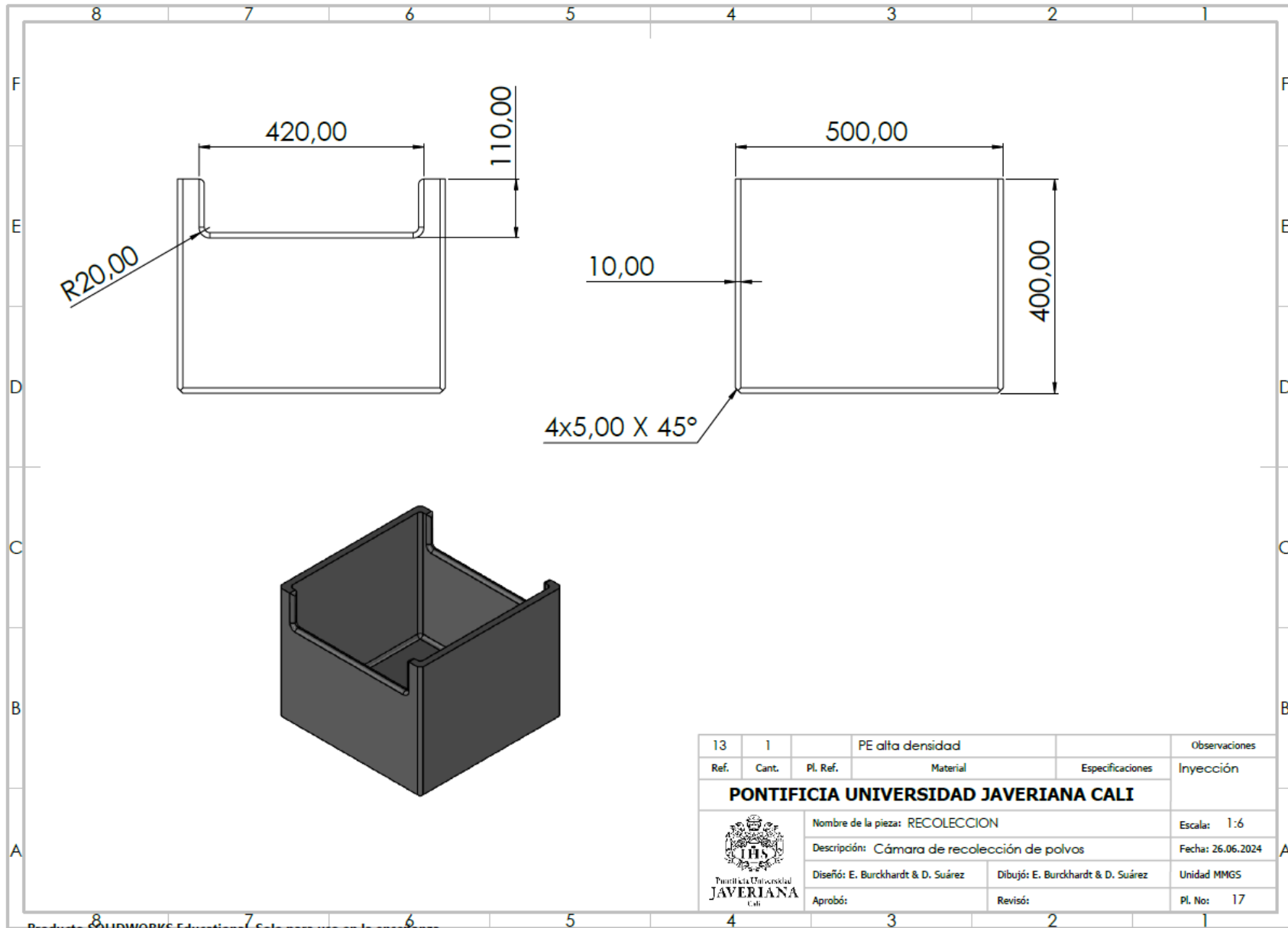





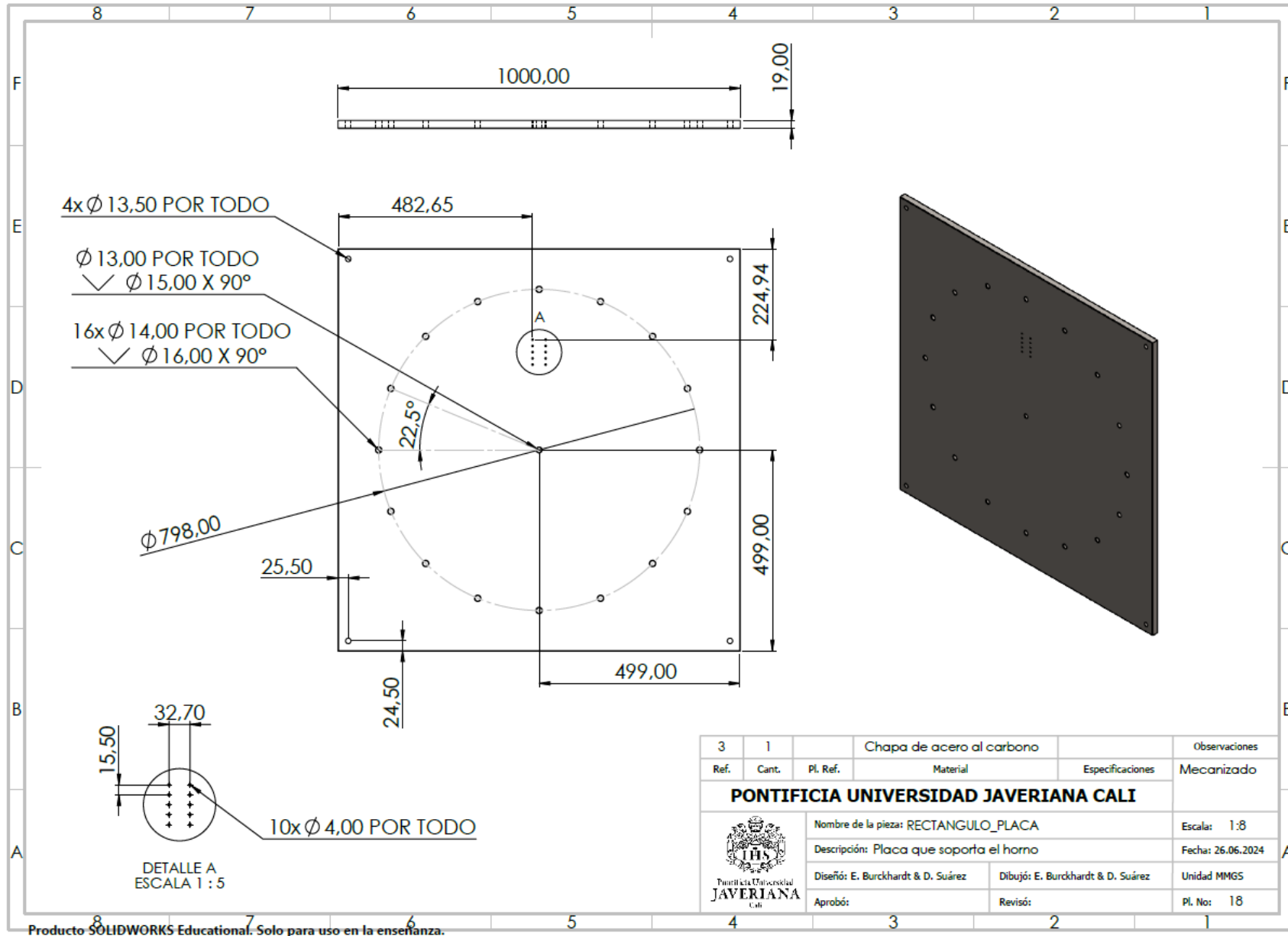
| | | | | | |
|---|-------|--|--------------|-----------------------------------|---------------|
| 5 | 4 | | Acero pulido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Mecanizado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: NIVELADOR | | Escala: 1:1 | |
| | | Descripción: Base cónica nivelador de la máquina | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | |
| | | Aprobó: | | Revisó: | |
| | | | | Pl. No: 14 | |

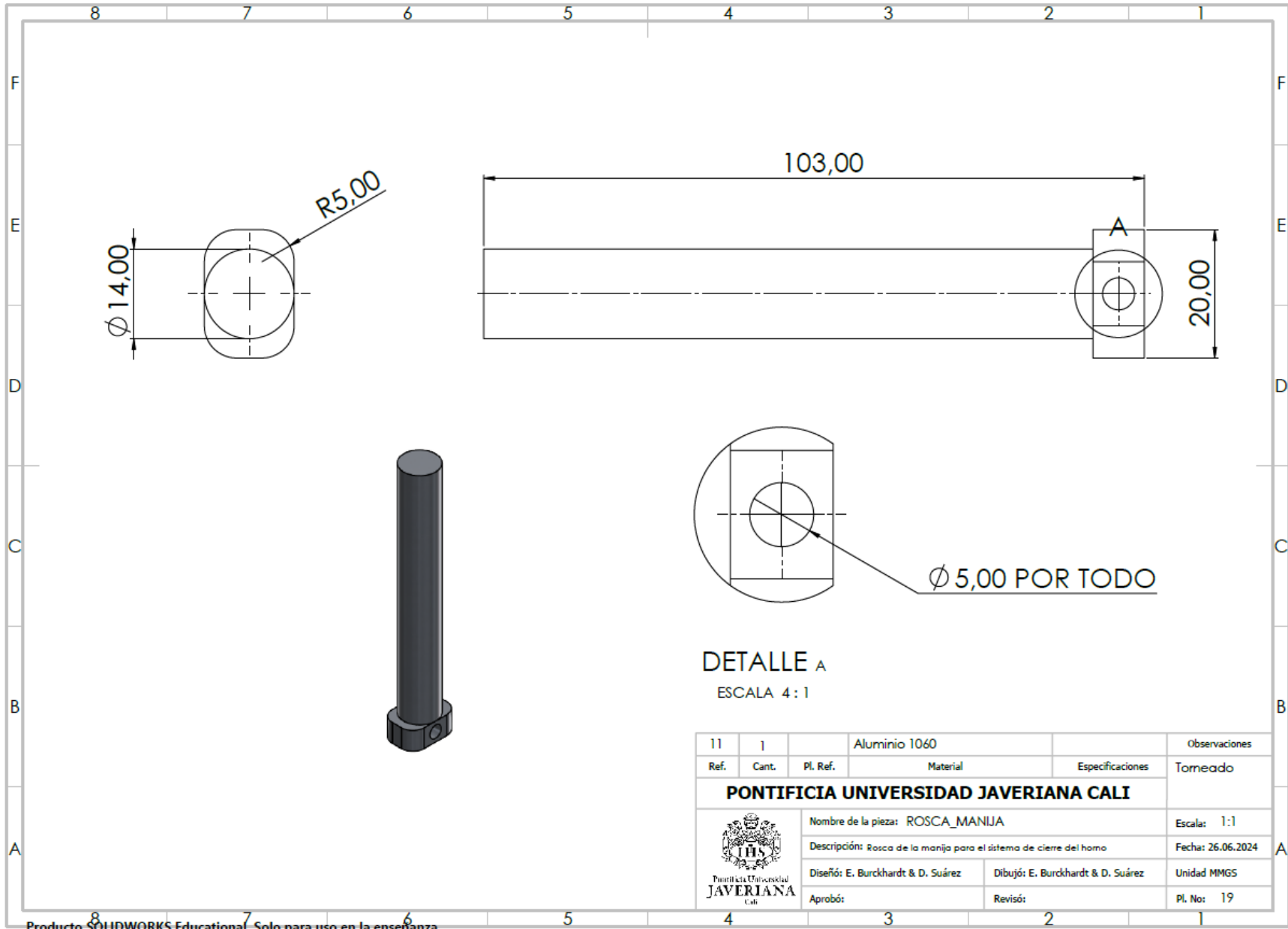


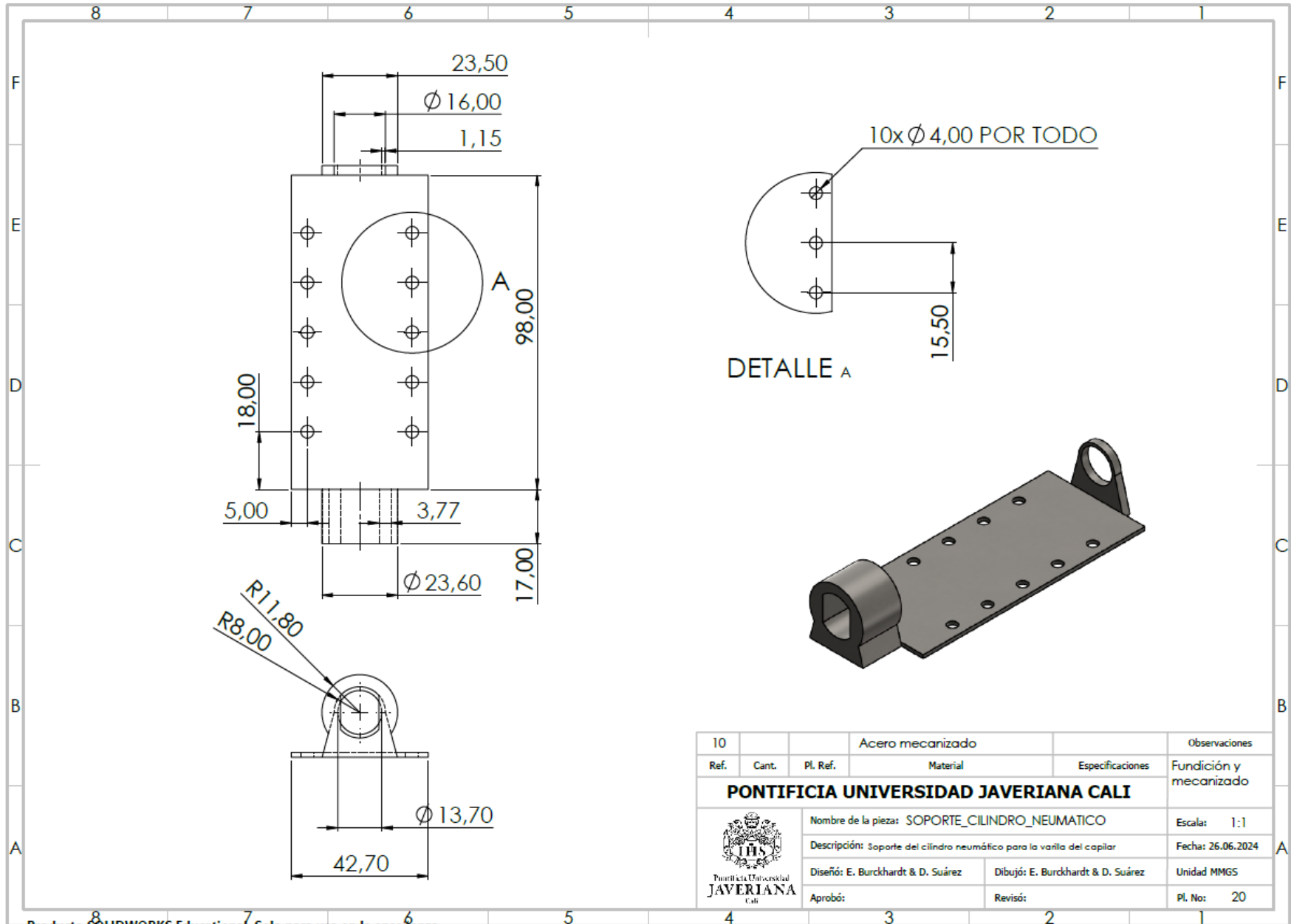


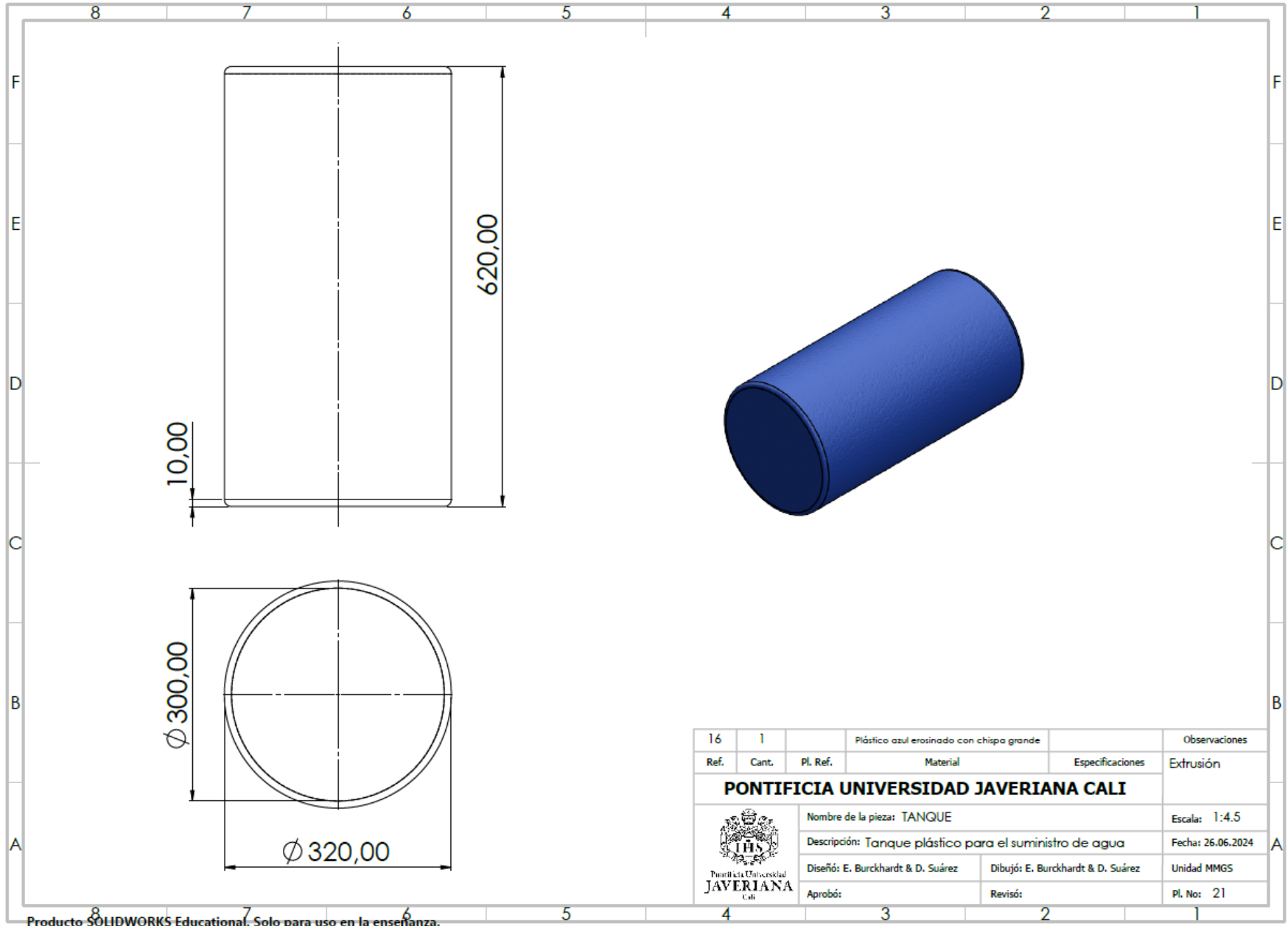



| | | | | | | | |
|---|-------|----------|------------------|--|---------------|-----------------------------------|-------------|
| 13 | 1 | | PE alta densidad | | Observaciones | | |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Inyección | | |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | | | |
|  | | | | Nombre de la pieza: RECOLECCION | | Escala: 1:6 | |
| | | | | Descripción: Cámara de recolección de polvos | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS |
| | | | | Aprobó: | | Revisó: | Pl. No: 17 |

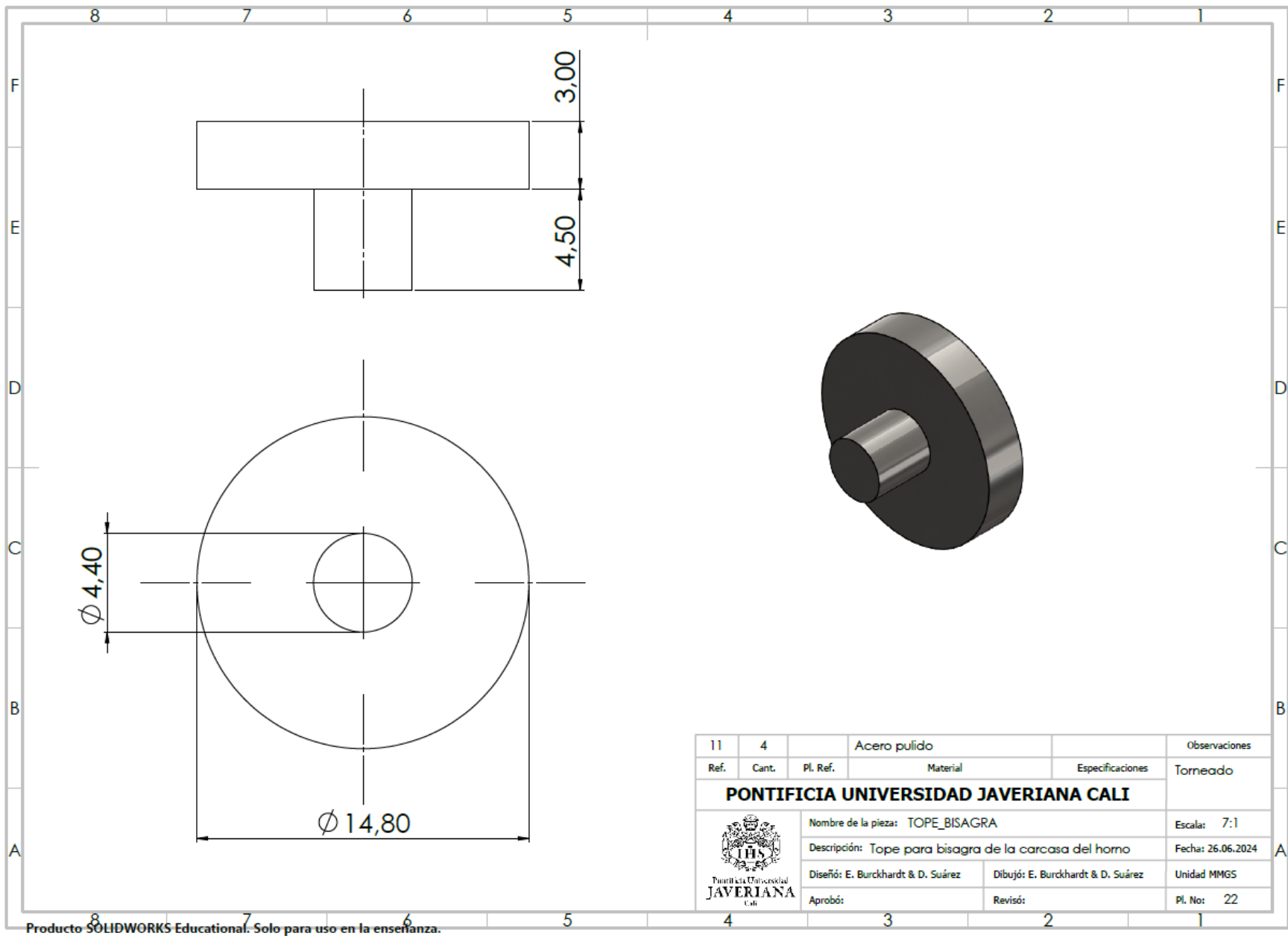


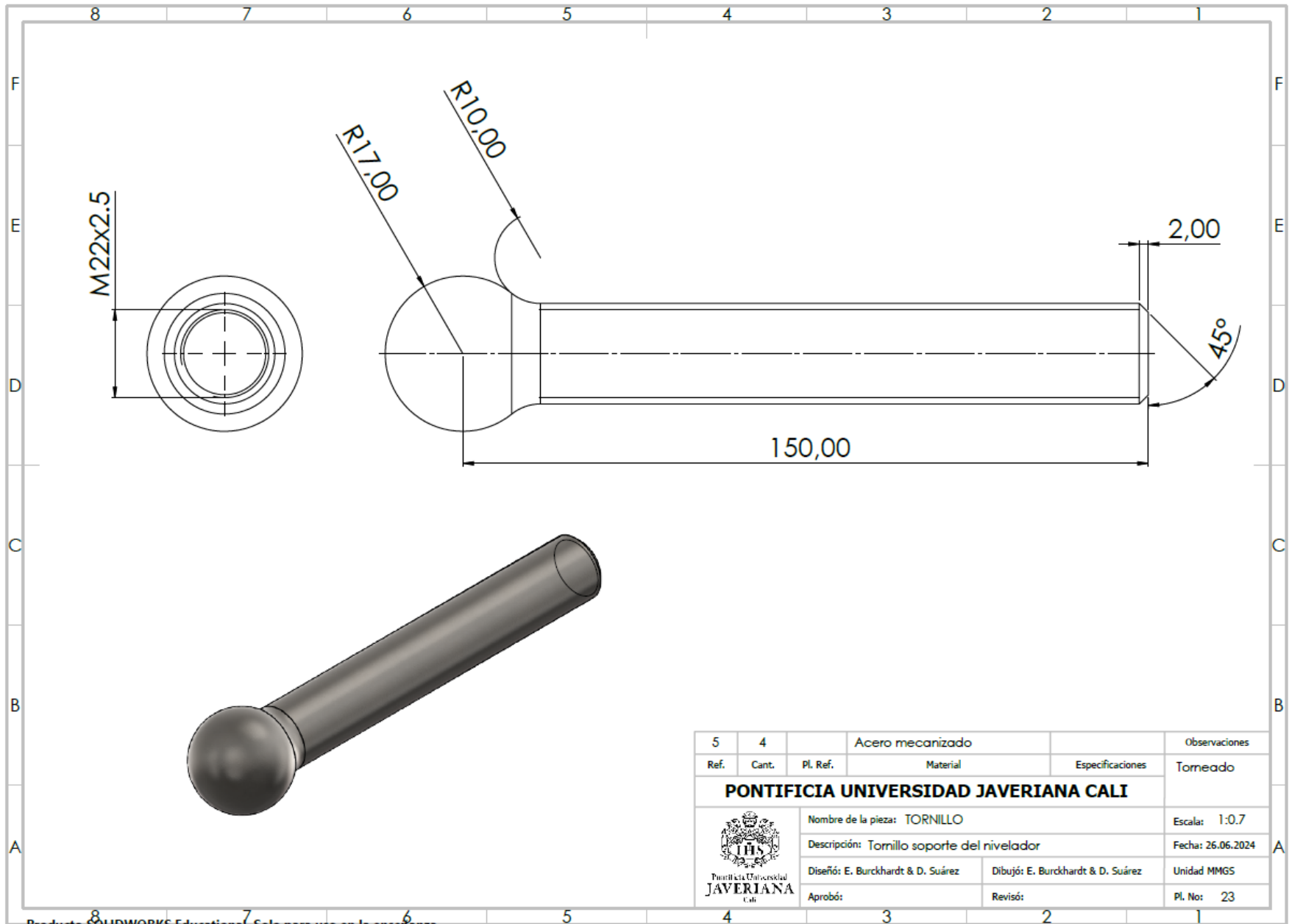





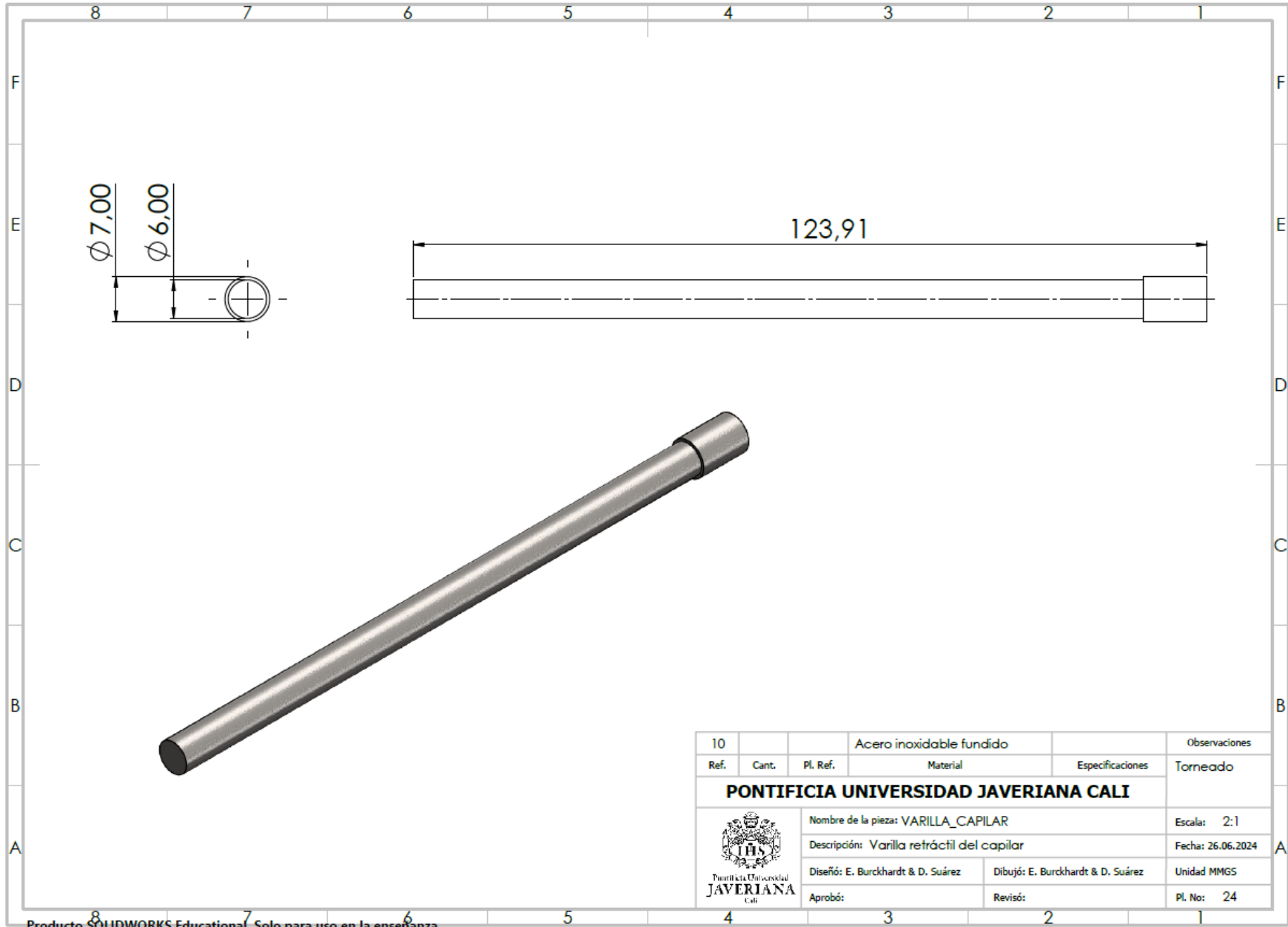



| 16 | 1 | | Plástico azul erosionado con chipsa grande | Observaciones | |
|---|-------|----------|---|-----------------------------------|-------------------|
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Extrusión |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  Pontificia Universidad JAVERIANA Cali | | | Nombre de la pieza: TANQUE | | Escala: 1:4.5 |
| | | | Descripción: Tanque plástico para el suministro de agua | | Fecha: 26.06.2024 |
| | | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | Unidad MMGS |
| | | | Aprobó: | Revisó: | Pl. No: 21 |





| | | | | | |
|---|-------|---|------------------|-----------------------------------|---------------|
| 5 | 4 | | Acero mecanizado | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Torneado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  Pontificia Universidad JAVERIANA Cali | | Nombre de la pieza: TORNILLO | | Escala: 1:0.7 | |
| | | Descripción: Tornillo soporte del nivelador | | Fecha: 26.06.2024 | |
| | | Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | |
| | | Aprobó: | | Revisó: | |
| | | | | Unidad MMGS | |
| | | | | Pl. No: 23 | |



| | | | | | |
|---|-------|--|--------------------------|-------------------|---------------|
| 10 | | | Acero inoxidable fundido | | Observaciones |
| Ref. | Cant. | Pl. Ref. | Material | Especificaciones | Torneado |
| PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI | | | | | |
|  | | Nombre de la pieza: VARILLA_CAPILAR | | Escala: 2:1 | |
| | | Descripción: Varilla retráctil del capilar | | Fecha: 26.06.2024 | |
| Diseño: E. Burckhardt & D. Suárez | | Dibujó: E. Burckhardt & D. Suárez | | Unidad MMGS | |
| Aprobó: | | Revisó: | | Pl. No: 24 | |

