



Universitat Jaume I

Escola Superior de Tecnologia i Ciències Experimentals

Grau en Enginyeria Química

***DISEÑO DE UN PROCESO DE
OBTENCIÓN DE GRÁNULOS VÍTREOS
PARA SU APLICACIÓN COMO
RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS***

Trabajo Fin de Grado

Autora

Andrea Andreu Porcar

Tutor

Arnaldo Moreno Berto

Castellón, septiembre de 2022

AGRAÏMENTS

El que queda escrit en aquestes pàgines és una feina que va començar fa molt més que el dia en que vaig decidir el tema del meu TFG, és per això que he comptat amb l'ajuda tècnica i anímica de moltes persones en el camí de l'aprenentatge.

Vull agrair als professors que m'han ajudat a créixer i a donar petjades cada vegada més grans, a aquells que viuen la docència i a tots amb els que he trobat sempre un tracte personal i ajuda quan he necessitat. A tu, Arnaldo, per haver-me iniciat en la ceràmica i ser el punt on acudir quan m'he sentit perduda.

En general a tot l'ITC. Als companys del laboratori de composicions, al laboratori de Caracterització físic-estructural i al de Microscopia per les proves. Agrair concretament a Maria José Vicente, la meua tutora de pràctiques, a Maria José Sánchez i Carmen Segarra per implicar-se tant amb mi i ajudar-me directament en aprendre i preparar l'experimental del procés.

A José Vicente Carceller, per ser el meu primer contacte en el món laboral i per haver aportat la seua visió industrial, experiència i coneixement al treball.

Vull agrair també als meus companys i confidents de grau Belén, Josua, Paul i Rus. Especialment a Ramon, per haver compartit tantes hores d'aprenentatge junts i ajudar-me sempre quan creia que no sabia i que no podia més, i a la meua Andrea, amb qui he viscut cada dia des del primer, amb qui tant he compartit dins i fora de la facultat i a qui tant estime, eres una estudiant i una amiga excel·lent.

Per últim, a la meua família, els meus pares i la meua germana, que han hagut d'aguantar l'estrès d'una estudiant d'enginyeria sempre agobiada en casa, gràcies pel vostre esforç. I a Candi, per tantes "rues" al eixir de l'escola, al final estic convertint-me en la dona que volia ser i segur que tu, que em cuides des de dalt, estaràs orgullosa de la teua neta.

*“A medio mundo le gustan los perros; y hasta el día de hoy,
nadie sabe qué quiere decir guau.”*

Quino

RESUMEN

El objetivo principal del trabajo es el diseño de un método capaz de obtener vidrios esféricos minimizando el uso de energías no renovables. Se pretende crear un producto de geometría y tamaño determinado, similar a las granillas procedentes de la molturación de frita cerámica, utilizando energía eléctrica en lugar del gas natural empleado actualmente como combustible para la fusión de fritas, y, además, reducir el uso del agua de enfriamiento en la fabricación de estas.

Se diseña un proceso que tiene como unidades principales una granuladora, un secadero y un horno de fusión vertical. Este proceso se basa en granular una composición de materias primas pulverulentas no arcillosas con la ayuda de una disolución de ligante en agua, en secar los gránulos obtenidos, separarlos en fracciones de interés y finalmente, fundirlos en un horno de caída vertical.

El desarrollo del trabajo final de grado se ha dado durante la estancia en prácticas en el Instituto de Tecnología Cerámica. Durante estas, se ha llevado a cabo una parte experimental que ha consistido en la creación de una composición de frita, en la realización de ensayos de granulación para adaptar las especificaciones del proceso y en la caracterización de los gránulos obtenidos en una granuladora de alta cizalla de laboratorio. Además, se han realizado otros ensayos de secado de gránulos y fusión de estos.

Con el diseño de este proceso se pretende cambiar una línea de producción de granillas por una de gránulos vítreos en los que se utilice únicamente el agua de granulación. Se quiere cambiar el uso de gas natural por energía eléctrica en todo el proceso y obtener esferas de vidrio que no generen polvo al transportarse, se puedan aplicar en seco sobre el soporte y no requieran de calentamiento por gas, agua de enfriamiento ni energía de molturación. Se espera que este proceso sea viable económicamente y mejore el uso de recursos frente al proceso tradicional.

RESUMEN

1. ÍNDICE GENERAL

1. ÍNDICE
2. MEMORIA
3. ANEXOS
4. PLANOS
5. PLIEGO DE CONDICIONES
6. ESTADO DE MEDICIONES
7. PRESUPUESTO

2. MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETIVO	8
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. ALCANCE	11
4. ANTECEDENTES	13
4.1. Proceso de fusión de fritas y molturación de granillas	13
5. INTRODUCCIÓN	15
5.1. Proceso de granulación	15
5.2. Caracterización del material granulado	18
5.3. Equipos de granulación	21
5.4. Secado	24
5.4.1. Etapas del secado	25
5.4.2. Secado por radiación	26
5.5. Separación por tamaño de partícula	27
5.6. Descarga de material granular	28
5.7. Modelo de sistemas concentrados	30
5.8. Horno de fusión vertical	33
6. NORMATIVA APLICADA	42
7. REQUISITOS DE DISEÑO Y ESTUDIOS PREVIOS	43
7.1. Ensayos de granulación en planta piloto	43
7.2. Condiciones iniciales para lograr la productividad deseada	46
7.3. Ensayos de secado	48
7.4. Ensayos de temperatura de fusión	50
8. RESULTADOS	51

8.1.	Caracterización de los gránulos	51
8.2.	Diseño de la granuladora	54
8.3.	Diseño del secadero por infrarrojos	55
8.4.	Dimensionado del silo de descarga de base plana	56
8.5.	Diseño del horno de fusión vertical	57
8.6.	Funcionamiento del proceso	59
9.	PLANIFICACIÓN	62
10.	ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS	64
11.	ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA.....	65
12.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ECONÓMICO	76
13.	NOMENCLATURA	77
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Comportamiento de los gránulos atendiendo a su Índice de Hausner.....	20
Tabla 7.1. Composición a granular, fracción másica (% en peso).	43
Tabla 7.2. Ensayos realizados con la granuladora EIRICH RV02. La cantidad de agua y ligante está referida a la masa pulverulenta.	44
Tabla 7.3. Condiciones de operación de la granuladora EIRICH RV02 de Planta Piloto en el ensayo 4.1.	46
Tabla 7.4. Características del producto obtenido del ensayo de granulación 4.1 con la granuladora EIRICH RV02 cargada con 1,6875 kg de material.	46
Tabla 7.5. Distribución de tamaño de gránulo del ensayo 4.1 del total de gránulos secos obtenidos.....	47
Tabla 7.6. Datos de secado de los gránulos con el secadero por Infrarrojos.	49
Tabla 8.1. Características de los gránulos.	53
Tabla 8.2. Distribución anual del material.	60
Tabla 8.3. Porcentajes de distribución de material en el proceso.....	60
Tabla 8.4. Compra anual de materias primas.	61
Tabla 8.5. Compra anual de fungibles.	61
Tabla 8.6. Organización de la operación de granulación.	61
Tabla 9.1. Listado de duración y precedencia de las actividades o tareas del proyecto.....	62
Tabla 11.1. Resumen Presupuesto Ejecución Material.	65
Tabla 11.2. Resumen Presupuesto de Ejecución Por Contrata.....	65
Tabla 11.3. Resumen Presupuesto Total.	66
Tabla 11.4. Ingresos anuales por la venta de productos acabados.	66
Tabla 11.5. Compra de materia prima anual.	67
Tabla 11.6. Compra de fungibles.	67
Tabla 11.7. Coste energético del proceso.	68
Tabla 11.8 Gastos directos totales.	68

Tabla 11.9. Gastos indirectos totales.....	69
Tabla 11.10. Gastos Totales.	69
Tabla 11.11. Coeficientes lineales de amortización y período máximo.....	70
Tabla 11.12. Valores del Interés nominal, Interés real e IPC.....	72
Tabla 11.13. Valores para el estudio de Viabilidad Económica.	73
Tabla 11.14. Estudio de Viabilidad Económica.	74
Tabla 12.1 Indicativos económicos del proyecto.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso. Fuente propia elaborado con [30].	12
Figura 4.1. Diagrama de vías del proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos esmaltados.[6]	13
Figura 5.1. Fases de la operación de granulación. [18]	16
Figura 5.2. Granuladora EIRICH RV02.	22
Figura 5.3. Graunladora EIRICH RV02 - poisiones correa de velocidad.	23
Figura 5.4. Curva de secado.	25
Figura 5.5. Esquema del silo de descarga de base plana.	29
Figura 5.6. Esquema gráfico de los parámetros que intervienen en el análisis de sistemas concentrados.	31
Figura 5.7. Esquema del horno de fusión vertical.	33
Figura 5.8. Esquema de la analogía eléctrica de un horno de geometría cilíndrica y pared compuesta.	35
Figura 5.9. Esquema de la vista de sección de una geometría cilíndrica que pierde calor por conducción a través de su espesor y por convección y radiación hacia el ambiente.	35
Figura 7.1. Distribución de tamaño de gránulos de los ensayos con la granuladora EIRICH RV02. Las barras coloreadas marcan el % en peso que hay de gránulos con un tamaño comprendido entre cada marca de clase. El eje x, tamaño de gránulo, es el extremo que delimita el intervalo de cada clase.	45
Figura 7.2. Ensayo de granulación. Imagen detallada del interior de la cuba al finalizar el ensayo. Se observa la capa de material pulverulento adherido a las paredes no granulado.	47
Figura 7.3. Secadero por infrarrojos de la Planta Piloto Hipocarbónica.	48
Figura 7.4. Curva de secado de los gránulos.	49
Figura 7.5. Ensayo de temperatura de fusión de la composición a 1400 °C.	50
Figura 8.1. Gránulos visualizados en el microscopio óptico con 5 y 11 aumentos.	52
Figura 8.2. Esquema secadero por infrarrojos.	55
Figura 8.3. Funcionamiento del horno de fusión vertical, esquema.	58

Figura 9.1. Diagrama de Gantt del "Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos". 63

1. OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es diseñar un proceso para producir gránulos crudos de una composición de materias primas no arcillosas para, posteriormente, fundirlos en un horno de fusión vertical y obtener gránulos vítreos de geometría y tamaño determinado. Se quiere llegar a una producción del 5 %-10 % de la de un horno de fritado convencional. La instalación está diseñada para poder instalarse en una planta de producción de fritas cerámicas.

Del objetivo principal deriva la necesidad de obtener estos vidrios esféricos de la forma más rentable posible, tanto económica como medioambientalmente. Se pretende minimizar el uso de energías no renovables, cambiando el gas natural como combustible para la fusión por energía eléctrica en todo el proceso y reducir el uso de agua.

Para comprobar la viabilidad de las operaciones, se han hecho ensayos en planta piloto, concretamente en la del Instituto de Tecnología Cerámica.

2. JUSTIFICACIÓN

La necesidad del diseño nace por varios motivos. El sector cerámico se encuentra actualmente en una crisis energética debido al coste elevado del gas natural, el combustible que utilizan los hornos de fusión de frita de llama. En marzo de 2022 por ejemplo, según (El periódico del azulejo) [36] aumentó el precio de este en un 20,7 % en tan solo 10 días. Además, se debe cumplir el Paquete Legislativo «Fit for 55» de la Comisión Europea [27] que pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55 % para el 2030 y ser un continente de emisiones neutras en 2050. Es por esto por lo que se decide diseñar un horno de fusión alternativo a los actuales de combustión de gas natural que funcione con energía eléctrica, que puede proceder en la mayoría de los casos de fuentes de energía renovables.

Además, otro consumo que pretende minimizar el proceso es el agua. Actualmente en un proceso de fritado y esmaltado el agua está presente en los siguientes procesos según (Blasco. A, 1992) [13]:

- Como vehículo de intercambio de calor para la refrigeración de fritas a la salida del horno. Se trata de un circuito cerrado con recirculación que utiliza 8 kg H₂O/kg frita- 25 kg H₂O/kg frita.
- En la preparación de esmaltes para molturar en vía húmeda la suspensión. Esto supone unos 0,6 L/m² de producción. Además, esta agua debe de eliminarse posteriormente y antes de la cocción, con el elevado aporte energético que eso supone.
- Como agente de lavado en la línea de esmaltado, entre 10 L/m² de producción y 20 L/m² de producción, que suponen una importante generación de aguas residuales.

Obtener gránulos vítreos por granulación y fusión sin enfriamiento con agua y además que se puedan aplicar en seco, hace reducir el consumo de agua hasta aproximadamente 0,12 kg H₂O/kg de gránulo.

Por último, tener un material vítreo granulado de un tamaño y geometría determinado para desarrollar sobre un azulejo una superficie vidriada, presenta notables ventajas frente al uso y comercialización de esmaltes en suspensión o de granillas. Los esmaltes suponen el movimiento de materias primas crudas que generan polvo, además, para una azulejera que compra esmaltes, la necesidad de tener que preocuparse por la adición agua y aditivos a la

mezcla, por último, tener en cuenta que los esmaltes en suspensión se degradan con el tiempo. También supone notables ventajas frente al uso de granillas cerámicas, ya que elimina la fusión en los hornos de gas y la posterior molturación en seco, una operación de elevado consumo energético.

3. ALCANCE

El proceso que se va a diseñar se muestra en la Figura 3.1. Las materias primas a granular (feldespato potásico, colemanita, óxido de zinc, dolomita, carbonato cálcico, óxido de circonio y cuarzo) se encuentran de forma separada en sus respectivos silos de almacenamiento mientras que, el ligante, una disolución de cola en agua se encuentra en un tanque agitado.

La granuladora de alta cizalla opera en discontinuo, de modo que cada vez que se va a granular, se dosifica la cantidad adecuada de material pulverulento y la de disolución del ligante. Tras la operación, se descarga primeramente el material granulado, y, a continuación, es posible descargar en una segunda vez la pequeña cantidad de material no granulado que se ha quedado adherida en las paredes, de modo que se recircula de nuevo a la entrada de materias primas. El material granulado húmedo debe secarse en un secadero por infrarrojos y, tras un tiempo de secado, se obtienen unos gránulos secos que se deben separar. La separación ocurre por la interposición de un vibrotamiz que separa por tamaños de partícula. La separación se hace en tres fracciones. Los gruesos, que van destinados a la venta en otras aplicaciones, la fracción de interés, entre 100 μm y 300 μm , que es la destinada a fundir y los finos, que se deben recircular de nuevo a la granuladora. Los gránulos secos de la fracción de interés se funden en cinco hornos de fusión vertical que funcionan en continuo, de forma que se obtienen los gránulos vítreos.

Este proceso es capaz de producir aproximadamente 600 t/año de gránulos vítreos a partir de materias primas pulverulentas. El principal objetivo es maximizar la producción de gránulos comprendidos entre 100 μm y 300 μm ya que, tras consultar con expertos en granulación, se trata de unos microgránulos con tamaño idóneo para obtener con granuladoras de alta cizalla.

El presente trabajo se centrará en diseñar las operaciones que ocurren en el proceso, principalmente los equipos de granulación y fusión. Se realizará un estudio de viabilidad económico del proceso.

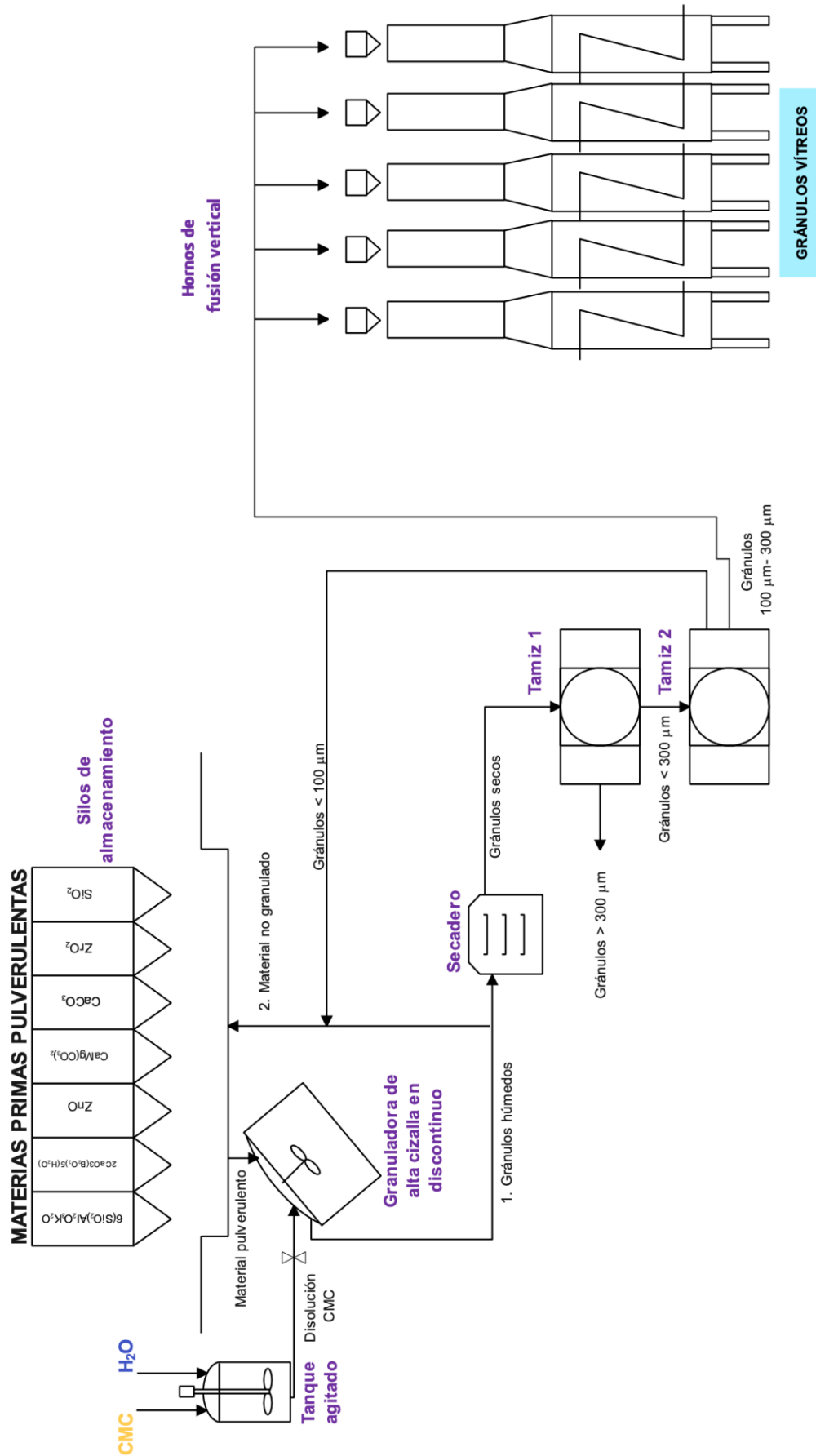


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso. Fuente propia elaborado con [30].

4. ANTECEDENTES

4.1. PROCESO DE FUSIÓN DE FRITAS Y MOLTURACIÓN DE GRANILLAS

Una frita es un material vítreo insoluble formado por la fusión de materias primas inorgánicas enfriadas de forma brusca. Las materias primas son óxidos, silicatos, carbonatos, boratos... naturales o sintéticos que al fundirse adoptan una forma de matriz vítrea rígida y que se comportan como un sólido homogéneo. La temperatura de fusión de estas materias primas está entre el rango de 1350 °C y 1550 °C.

La fabricación de frita se da, normalmente, en hornos de llama de gas natural continuos que producen aproximadamente 20-25 t/día. La masa fundida se enfría, también normalmente, en agua, de forma que rápidamente se solidifica en pequeños trozos de vidrio.

Para preparar un esmalte, según (Amorós, J.L. s.f.) [6] para aplicarlo como recubrimiento cerámico, se pueden seguir varias vías dependiendo de las operaciones y orden, Figura 4.1. Se puede hablar de esmalte en seco si pasamos por un proceso de fritado o granilla.

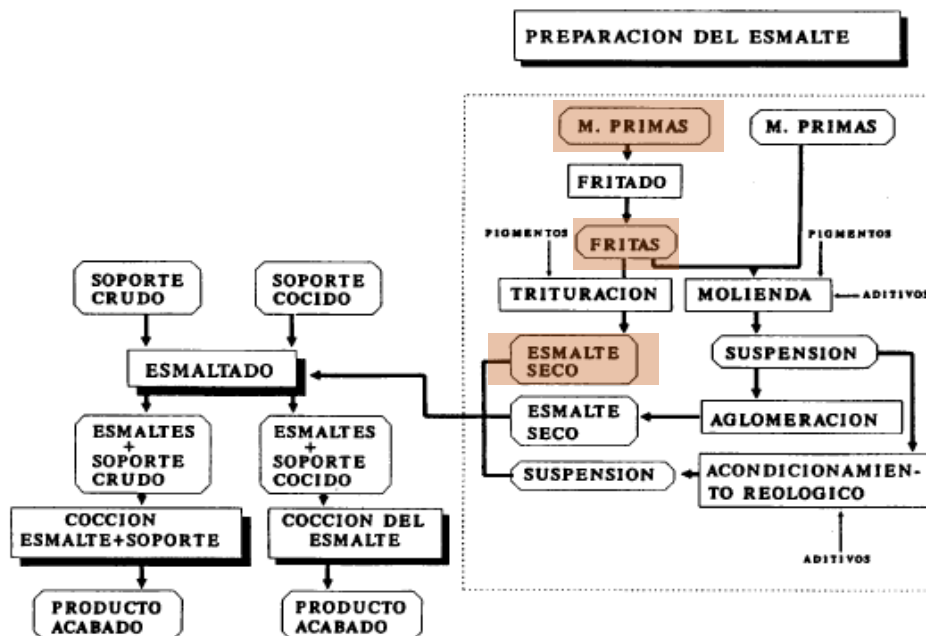


Figura 4.1. Diagrama de vías del proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos esmaltados.[6]

Se denomina granilla a partículas de frita con un tamaño comprendido entre 50 µm y hasta 400 µm. Estas se producen moliendo mecánicamente los gránulos de frita. A continuación, se tamizan en una torre de tamices con diferentes granulometrías. De esta forma podemos

tener granilla de una misma frita, pero con distinta granulometría, ya que el comportamiento postcocción de las granillas puede variar con el tamaño de estas.

Según datos de la *Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos (ANFFECC)* [10], España es líder mundial en el sector de fritas y esmaltes cerámicos, siendo una parte muy importante de los recursos los que se destinan a la investigación e innovación.

Haciendo referencia a los datos del sector, son más 1.500.000.000 € los que se generaron en España en año 2021 debido a las ventas nacionales y de exportación de fritas y esmaltes. Castellón es el clúster cerámico más importante a nivel nacional y es que el 30 % de la producción industrial de la provincia es producto cerámico.

Tras consultar con expertos cerámicos del sector privado, se puede afirmar que la producción de una tonelada de frita consume únicamente en términos de gas natural para los quemadores unos 1500 kW·h. Esto supone en verano de 2022, unos 140 €/t únicamente teniendo en cuenta la energía necesaria para la fusión.

Según datos de la *Guía de Tecnologías Hipocarbónicas para la Industria de Baldosas Cerámica* [25], el sector cerámico es el motor económico de muchas comarcas castellonenses, pero supone el segundo sector industrial en datos de consumo de energía de la Comunitat Valenciana, en 2019, consumió el 31 % de la energía de la comunidad.

Además, de la energía consumida en el proceso, el 91 % proviene de gas natural y únicamente el 9 % restante proviene de energía eléctrica, siendo esta proveniente de sistemas de cogeneración o autoconsumo renovable.

Por último, es importante mencionar la creciente preocupación por el aumento del precio del gas natural. Según la *Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos ASCER* [9], la factura del gas está aumentando este año para las empresas en torno al 146 % de su precio habitual.

Es por todo esto la especial importancia de estudiar nuevos procesos de obtención de vidriados para recubrimientos cerámicos a partir de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, ajustándose así al Paquete Legislativo «Fit for 55» de la Comisión Europea. [27]

5. INTRODUCCIÓN

5.1. PROCESO DE GRANULACIÓN

La granulación es un proceso tecnológico que consiste en convertir material pulverulento en material granulado mediante la técnica de granulación, es decir, agrandar el tamaño de partícula de un material sólido para crear estructuras mayores llamadas gránulos, con unas propiedades físicas controladas. [18], [31], [37]

Los procesos de aumento de tamaño se usan para formar granulados a partir de partículas pequeñas, es un proceso común en las operaciones de tratamiento de sólidos. Para que el material esté granulado se deben formar enlaces fuertes entre partículas y que no se rompan en operaciones posteriores. Los gránulos se pueden mantener unidos por fuerzas de cohesión o puentes entre las partículas, aunque lo más habitual es añadir un ligante o « binder » para que se peguen. La elección del ligante depende del tipo de producto a granular y de la temperatura a la que ocurre el proceso. A veces, el aglutinante debe eliminarse por secado o por calcinación de las partículas. [48]

En la granulación ocurre un aumento de las fuerzas de cohesión (entre materiales de iguales características) y fenómenos de adhesión (entre partículas de diferente composición, forma y estructura). Las fuerzas más comunes que se manifiestan son [7]:

- Fuerzas causadas por una película líquida, causante de la humedad residual. Es una capa delgada de agua entre partículas que hace disminuir la distancia y aumentar el contacto, son de alta viscosidad y producen uniones de baja fuerza.
- Uniones fuertes cuando hay un mayor grado de humedad que hace crear puentes que mantienen unidas a las partículas debido a la fuerza capilar, estos puentes líquidos son necesarios para crear puentes fuertes tras el secado gracias a la acción de ligantes.
- Puentes sólidos. Ocurren en zonas de elevada presión que hacen aumentar la temperatura, de forma que hay un punto de fusión en el que están en contacto dos partículas. Hay difusión de moléculas de una partícula a otra.
- Fuerzas superficiales de Van der Waals y electrostáticas.

En granulación en masa húmeda predominan las fuerzas de cohesión debidas a los puentes líquidos que mantienen las partículas unidas gracias a la tensión superficial entre la interfase aire-agua y también la interacción entre partículas debido a las fuerzas superficiales.

El material pulverulento es difícil de transportar y procesar. Al granular un material pulverulento, en este caso para fundirlo a continuación en un horno de fusión de caída vertical se consigue:

- Mejorar y controlar el flujo de transporte del material.
- Reducir la generación de polvo durante el procesamiento.
- Distribuir las materias primas de forma uniforme en los gránulos y aumentar la densidad.

El proceso de granulación se divide en cuatro fases, como se muestra en la Figura 5.1.

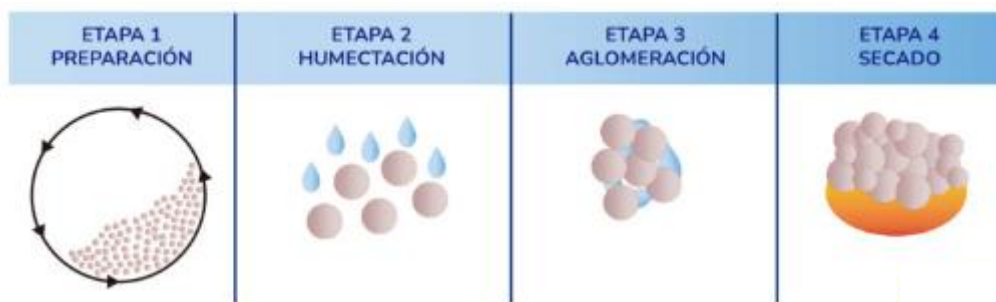


Figura 5.1. Fases de la operación de granulación. [18]

La preparación del material pulverulento ocurre dentro de la cámara de la granuladora o cuba y sigue con la etapa de humectación, que ocurre cuando el recipiente de la granuladora empieza a girar y se va añadiendo la solución acuosa con el ligante hasta el momento en que las partículas empiezan a juntarse formando granulados de mayor tamaño. Los gránulos van aumentando de tamaño con el tiempo de operación debido a las colisiones entre partículas y gránulos. Por último, el producto granulado húmedo debe secarse para posteriores operaciones.

Las etapas del proceso son por tanto y según (*Litster, J., Ennis, B., 2013*) [37].

1. Humectación, nucleación y distribución del ligante.
2. Consolidación, coalescencia y crecimiento de gránulos.
3. Rotura.

La primera etapa de la granulación es la **adición y distribución del ligante** para dar los núcleos de gránulos. Esto ocurre al inicio, cuando se está pulverizando el líquido dentro del granuladora. El ligante se pulveriza sobre el lecho de material pulverulento que está en

movimiento y de forma rápida. La situación ideal es que cada gota impregne el lecho del polvo para formar los núcleos. Una velocidad de rotación lenta hace que se formen gránulos grandes y húmedos y zonas de material seco.

En la etapa de **nucleación** aparecen gránulos poco compactos, pero si la humectación es eficiente, dará lugar a una distribución de tamaño de gránulos finales estrecha. Por lo contrario, una mala dispersión del ligante en el lecho afecta de forma considerable a las condiciones finales del producto, dando lugar a una distribución de tamaños más ancha.

Estos núcleos se consolidarán debido a las colisiones con otros iguales, dando lugar a la etapa de **crecimiento**. El grado de consolidación dependerá de la intensidad de la agitación y de la resistencia mecánica del gránulo. Aquellos gránulos procedentes de materias primas finas y granulados con líquidos viscosos son muy resistentes y se consolidan lentamente. Para que se dé una coalescencia y crecimiento, la energía de impacto se debe absorber por los gránulos y estos no deben rebotar al entrar en contacto, además debe formarse una unión de tipo fuerte como se ha comentado líneas arriba.

Si seguidamente al crecimiento se sigue con el proceso, el efecto que se crea es la **rotura**. Puede darse que se rompan gránulos húmedos para formar de más pequeños o que se desgasten y formen polvo. Es difícil de prevenir, pero si se sigue con una velocidad elevada en esta fase se producen gránulos más pequeños debido al incremento del mecanismo de rotura.

Los aglutinantes o ligantes se añaden a una composición para formar gránulos. Se pueden utilizar en seco o en forma de disolución, aunque lo más común es en forma de disolución. Deben aportar al gránulo dureza, reducir la friabilidad o generación de polvo y dar un comportamiento cohesivo al polvo, en general, son los aditivos que proporcionan resistencia mecánica. Los ligantes pueden ser polímeros naturales, sintéticos o azúcares.

Dentro de los polímeros sintéticos se encuentran dos de los ligantes más utilizados en cerámica, la carboximetilcelulosa (CMC) y el polivinilalcohol (PVA).[33]

5.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULADO

Para caracterizar los gránulos es importante conocer la distribución de tamaños, el diámetro medio, el tipo de ligante utilizado para granular, el índice de Hausner (indicativo de la fluidez) o la densidad. Se explican a continuación.

La distribución de tamaños de partícula se puede determinar mediante un ensayo de difracción láser vía seca. En este equipo, las partículas atraviesan un haz de luz láser y la luz que se dispersa se recoge en los detectores del equipo. El polvo granulado se alimenta al equipo y atraviesa a alta velocidad un sistema de conducciones, donde los impactos y esfuerzos de cizalla a los que se someten rompen los gránulos e individualizan las partículas. Las ondas que recibe el equipo se analizan utilizando el modelo de difracción de Fraunhofer (modelo basado en que la difracción de ondas electromagnéticas y la pantalla se encuentran alejadas del obstáculo por lo que inciden en ella ondas planas), que interpreta la señal de la dispersión de la luz recogida por los detectores. A continuación, es el software del equipo el que hace los cálculos. [29]

La ecuación empírica de Rossin-Rammler-Sperling sirve para ajustar los datos experimentales de distribución de tamaño de partícula, gránulo en este caso, a una recta, para obtener el diámetro medio estadístico de dicha distribución.

La Ecuación 1 muestra cómo se ajusta dicha recta :

$$1 - F = F' = \exp \left[- \left(\frac{D}{D_R} \right)^p \right] \quad (1)$$

Donde F es la fracción acumulada de partículas con diámetro inferior a Di. D_R y p son los parámetros de la ecuación, donde p es la pendiente de la recta y D_R es el parámetro definido como el diámetro estadístico del modelo. Si despejamos la Ecuación 1 obtenemos una recta en forma paramétrica que puede representarse. Tiene la forma de la Ecuación 2.

$$\log \left(\ln \frac{1}{F'} \right) = p \cdot \log D_g - p \cdot \log D_R \quad (2)$$

Por lo que representando el $\log \left(\ln \frac{1}{F'} \right)$ frente al $\log D_g$, podemos obtener el diámetro medio estadístico, D_R . [45], [46].

Las características de un gránulo esférico son:

- D_g = diámetro del gránulo (m).

- r_g = radio del gránulo (m).
- ρ_g = densidad del gránulo $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.
- m_g = masa del gránulo (kg).
- V_g = volumen del gránulo (m^3).
- A_{sg} = área superficial de un gránulo esférico (m^2).
- L_{cg} = longitud característica del gránulo (m).

Qu pueden relacionarse mediante la Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5, Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$r_g = \frac{1}{2} \cdot D_g \quad (3)$$

$$V_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_g^3 \quad (4)$$

$$m_g = \rho_g \cdot V_g \quad (5)$$

$$A_{sg} = 4 \cdot \pi \cdot r_g^2 \quad (6)$$

$$L_{cg} = \frac{A_{sg}}{V_g} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_g^3}{4 \cdot \pi \cdot r_g^2} = \frac{1}{3} \cdot r_g \quad (7)$$

El Índice de Hausner, IH, Ecuación 8, es una cantidad física adimensional que sirve para caracterizar la fluidez del polvo granular. Se determina mediante el cociente entre la densidad de un lecho formado por el polvo a estudiar que ha sido vibrado dentro de una probeta, y, por tanto, está bien empaquetado (ρ_f) o densidad real, y la densidad que tenía este mismo lecho antes de vibrar (ρ_0).

$$IH = \frac{\rho_f}{\rho_0} \quad (8)$$

Dependiendo del índice de Hausner atribuimos un comportamiento a los gránulos, como se observa en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Comportamiento de los gránulos atendiendo a su Índice de Hausner.

Comportamiento	IH
Cohesivo	> 1,40
Flujo Fácil	1,40 – 1,25
Flujo Libre	< 1,40

Es interesante tener unos gránulos con elevada fluidez, comportamiento de flujo libre, para evitar que se peguen o adhieran en etapas posteriores a la granulación. [14]

Gracias al ensayo que permite calcular el índice de Hausner, es posible también calcular la densidad aparente del lecho (ρ_{ap}). Conociendo el volumen de la probeta completamente llena se puede calcular la densidad del lecho vibrado o densidad aparente, midiendo la masa que ocupan dicha probeta llena de gránulos empaquetados, Ecuación 9.

$$\rho_{ap} = \frac{m_f}{V_0} \quad (9)$$

Si se considera, además, que estos gránulos vibrados ocupan el 60 % del volumen, es decir, que hay un 40% de poros intragranulares, es posible calcular la densidad de los gránulos o densidad real (ρ_g) a partir de la densidad del lecho o densidad aparente, Ecuación 10. [14]

$$\rho_g = \frac{\rho_{ap}}{0,6} \quad (10)$$

5.3. EQUIPOS DE GRANULACIÓN

Según (Litster, J., Ennis, B., 2013) [37], agrandar el tamaño de partícula mediante la adición de un ligante líquido capaz de formar puentes entre las partículas y añadir agitación que promueva la dispersión de este y permita el crecimiento de los gránulos, puede ocurrir en tres equipos industriales en vía húmeda: granuladoras de volteo, granuladoras de lecho fluidizado y granuladoras mezcladoras.

Las **granuladoras de volteo** hacen que las partículas se pongan en movimiento debido al giro. Pueden ser de tambor, de disco o de cuba, pero no están recomendadas para obtener gránulos pequeños.

Las **granuladoras de lecho fluidizado** se basan en el movimiento de las partículas debido al aire más que a la agitación mecánica. Se pueden utilizar para producir gránulos pequeños de elevada porosidad.

Por último, las **granuladoras mezcladoras** son capaces de mover el polvo gracias a la acción rotativa de un «impeller», impulsor o rotor. El líquido ligante se introduce de forma pulverizada en el interior de un lecho en movimiento situado dentro de una cuba. Existe un amplio número de diseños con diferentes grados de cizallamiento. Las granuladoras mezcladoras son el equipo idóneo según estudios anteriores, [20], [21], [22], [46] para producir gránulos pequeños a partir de materias primas cerámicas.

Un tipo de esta familia de equipos es la granuladora de alta cizalla. Un dispositivo que genera un movimiento rotatorio de un rotor para mezclar materiales en polvo dentro de una cuba de granulación. Estos equipos disponen de un pulverizador para añadir el ligante mientras gira el rotor y también de un mando de regulación de velocidad de los elementos rotativos, rotor y cuba. El movimiento rotativo lo genera un motor eléctrico. Las velocidades comunes de rotación son desde 500 rpm hasta 3500 rpm para el rotor y desde 60 rpm hasta 800 rpm para la cuba, que tiene una capacidad de entre 10 L hasta 1200 L. Por último, el tiempo de operación (en discontinuo) es de aproximadamente 5 minutos.

Se pueden subdividir a su vez en eje vertical, horizontal o excéntrico dependiendo del eje de rotación del rotor.

En el caso concreto de la granuladora EIIRCH RV02 de la Planta Piloto del ITC, con la que se pudieron hacer ensayos de granulación, se trata de una granuladora mezcladora de alta cizalla de eje excéntrico y está formada por dos unidades básicas, el rotor y la cuba, como

se muestra en la Figura 5.2. Estas tienen velocidad de giro regulable, Figura 5.3. Según estudios anteriores, [20], [21], [22], [46], la mejor forma de obtener microgránulos es utilizando una velocidad de rotación baja en la cuba (de las dos posibles se debe seleccionar la de 42 rpm) y una rotación de rotor elevada (como el método de ajuste de la velocidad con correas lo permite, se deben seleccionar las dos mayores, 2500 rpm y 5000 rpm, que pueden cambiarse durante el ensayo). El rotor tiene acoplado el pin con la geometría que recomienda el fabricante para producir microgránulos.

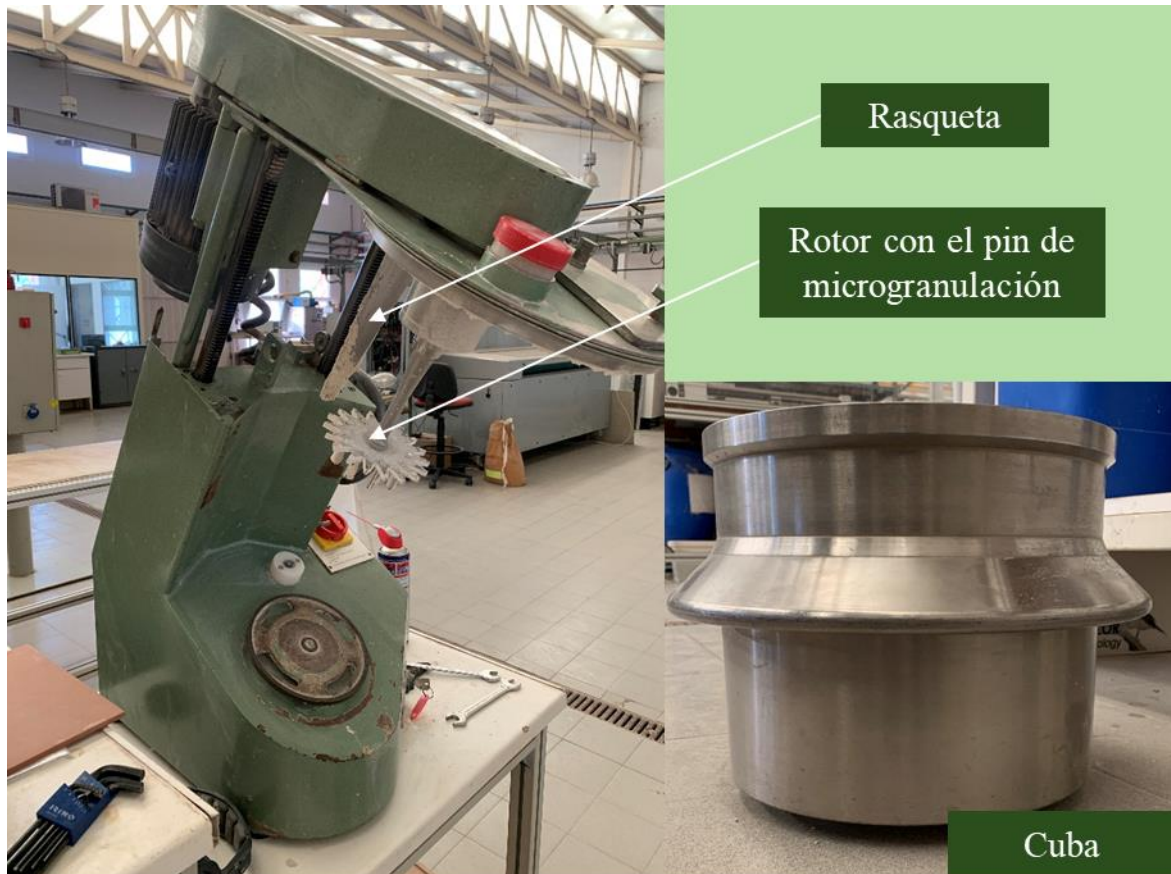


Figura 5.2. Granuladora EIRICH RV02.

Según la bibliografía, la velocidad de rotación del rotor debe ser en la etapa de mezclado y nucleación de los gránulos más elevada, para obtener un buen mezclado de las materias primas y, para el crecimiento, más lenta para evitar la rotura de gránulos. Como en el caso a estudiar se querían obtener gránulos pequeños, la velocidad del rotor se iba ajustando en cada caso dependiendo del tamaño de gránulos y del mezclado que se conseguía en la cuba.

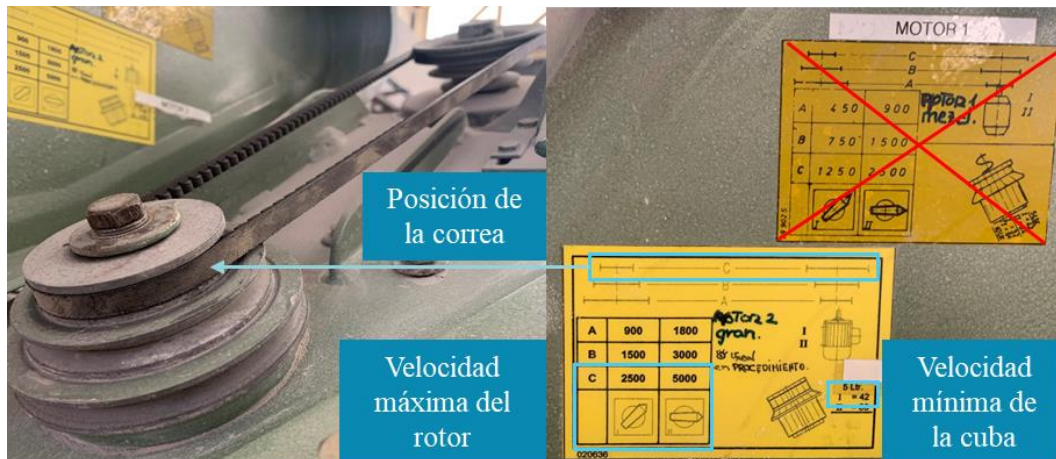


Figura 5.3. Graunladora EIRICH RV02 - poiciones correa de velocidad.

Para el escalado de granuladoras de alta cizalla según Eirich [38] debe de elegirse un diámetro acorde con la nueva producción deseada. A partir del diámetro del rotor (D_{r1}) y de la cuba (D_{c1}) de la primera granuladora, la velocidad angular a la que están sometidos (n_{r1} y n_{c1} respectivamente) y el diámetro de la nueva granuladora (D_{c2}), se puede calcular la velocidad angular a la que deben moverse el rotor y la cuba de la nueva granuladora (n_{r2} y n_{c2}). El principio del escalado se basa en que debe mantenerse constante la velocidad periférica a la que está sometido un punto de la zona exterior de ambos elementos. El escalado de velocidades se calcula con la Ecuación 11 y Ecuación 12.

$$v_1 \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\pi \cdot D_1 (m) \cdot n_1 (\text{min}^{-1})}{60 \left(\frac{s}{\text{min}} \right)} \quad (11)$$

Como ya se ha nombrado, v_1 debe de ser igual a v_2 . Teniendo esto en cuenta se puede calcular la nueva velocidad angular.

$$n_2 (\text{min}^{-1}) = \frac{v_2 \left(\frac{m}{s} \right) \cdot 60 \left(\frac{s}{\text{min}} \right)}{\pi \cdot D_2 (m)} \quad (12)$$

Donde:

- v (m/s)= velocidad periférica del elemento rotante.
- D (m) = diámetro del elemento rotante. 1 hace referencia al inicial y 2 al escalado.
- n (rpm)= velocidad angular del elemento rotante .1 hace referencia al inicial y 2 al escalado.

5.4. SECADO

El secado es una operación de separación que consiste en eliminar un líquido que empapa a un sólido. El líquido, que se encuentra impregnando a una fase sólida se transfiere desde esta al seno del gas. De entre los modos de llevar a cabo el secado, el más relevante consiste en evaporar líquido (normalmente agua) hacia un gas inerte (aire) mediante aporte de calor. Mediante el secado se modifican y mejoran las propiedades del sólido.

Los métodos de aporte de calor pueden ser por convección, radiación, conducción, microondas, infrarrojos...

La **convección** se lleva a cabo utilizando gases calientes (aire o gases de combustión). Es el método más empleado. Se puede regular y controlar la humedad y temperatura, lo que permite un mayor control de la velocidad de secado.

La **radiación** suele ser un mecanismo adicional en todos los secaderos, combinada con la convección.

La **conducción** se lleva a cabo desde las paredes que estén en contacto con el sólido. Este mecanismo es útil para secar sólidos muy húmedos y con bajo espesor.

Desde otro punto de vista los secaderos pueden ser **continuos** o **discontinuos**, dependiendo de la producción y coste del proceso.

En cuanto al aporte térmico durante el secado pueden ser **con aporte de calor** o **adiabáticos**, en estos la calefacción del aire se efectúa una sola vez, a la entrada de este, enfriándose posteriormente de forma adiabática a lo largo del secadero.[33], [50].

Para calcular la humedad en base seca de una masa se puede utilizar la Ecuación 13.

$$Y \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg ss}} \right) = \frac{m(t) - m_f}{m_f} \cdot 100 \quad (13)$$

Donde:

- $Y \left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg ss}} \right)$ = humedad en base seca del material.
- $m(t)$ (kg H₂O + kg ss) = masa del material en un instante de tiempo t.
- m_f (kg ss) = masa al finalizar el ensayo de secado.

5.4.1. ETAPAS DEL SECADO

Cuando se expone un sólido a una temperatura más elevada que este, se producen tres fenómenos de transporte:

- Transmisión de calor desde el medio a la superficie del sólido.
- Transferencia del vapor de agua de la interfase gas-sólido hacia el medio.
- Transporte de agua líquida desde el interior del sólido hacia la interfase líquido-gas.

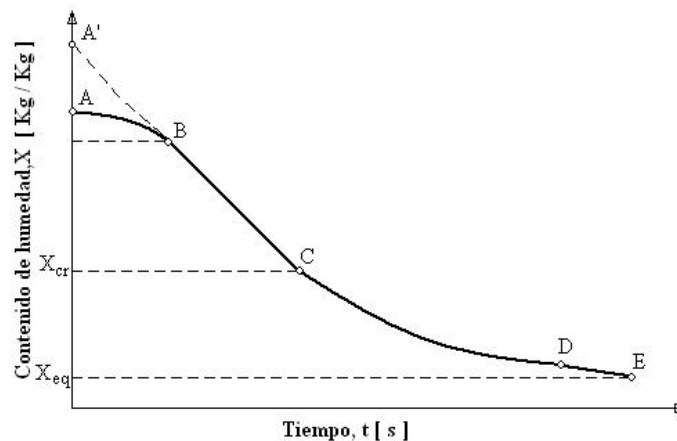


Figura 5.4. Curva de secado.

Para todos los productos existe una curva representativa que describe las características de secado (Figura 5.4) para condiciones específicas de temperatura, velocidad y presión conocida como curva de secado. El secado se produce en tres períodos diferentes:

• **Período de inducción (A-B):** en el que el calor sensible se transfiere al producto y a la humedad contenida. Se trata del calentamiento del producto y acondicionamiento de este, se elimina la mayor parte de la humedad libre, el tiempo de duración depende del contenido en humedad del sólido y su comportamiento es de difícil modelización.

• **Período de velocidad de secado constante (B-C):** en esta etapa la temperatura del sólido permanece constante, la humedad libre persiste en la superficie y la velocidad de evaporación se altera muy poco a medida que se reduce el contenido de humedad, en esta etapa es cuando más se contrae el sólido. Esta acaba cuando el sólido alcanza su humedad crítica.

• **Primer y segundo período de velocidad de secado decreciente (C-D-E):** el sólido ya casi no se contrae, aumenta de temperatura progresivamente y finaliza cuando se seca por completo o alcanza la humedad de equilibrio.

5.4.2. SECADO POR RADIACIÓN

Los sistemas convencionales de secado por convección, en los que el aire caliente sirve tanto como fuente de energía como medio de eliminación de la humedad, son intrínsecamente lentos y pueden no ser adecuados para secar algunos productos delicados. Hay sistemas en los que el aire caliente que fluye o atraviesa una superficie sólida que está húmeda no suele suministrar suficiente energía térmica para extraer la humedad del sólido. Sin embargo, la energía térmica suministrada por ondas electromagnéticas sí que es capaz de penetrar en lo más profundo de los productos húmedos y calentar el agua atrapada.

En el caso concreto de la radiación, la energía se transmite a través de ondas electromagnéticas, siendo las siguientes las tres técnicas principales de secado por radiación: infrarroja, microondas y ultravioleta.

La radiación infrarroja es un espectro electromagnético cuyas características la hacen idónea para el secado de materiales especiales, ya que es un tipo de radiación con una longitud de onda más larga que la luz visible pero más corta que la microondas. Puede utilizarse entonces para la evaporación de agua sin que ello requiera de un gasto de energía desmesurado y, al darse la transmisión de calor por radiación, no necesita, como se ha mencionado anteriormente, un medio para su propagación.

Dadas sus características, el secado por infrarrojos presenta numerosas ventajas frente a otros medios de secado tradicionales. Algunas de estas son las siguientes:

- Presenta una alta eficacia en la conversión de energía eléctrica en energía térmica. Así pues, permite una mayor velocidad de evaporación del agua.
- No provoca distorsiones en la estructura interna del material a secar, asegurando así las propiedades de este. Esto se debe a que el secado se produce sin contacto directo con el producto a secar.
- Permite el calentamiento selectivo, ya que calienta solo el objeto sin calentar el entorno.
- Los cambios de potencia en este tipo de secadores son extremadamente rápidos, del orden de segundos, facilitando así los ajustes de energía para acomodar las diferencias de velocidad, por lo que presenta respuestas más rápidas a las condiciones cambiantes del proceso.

5.5. SEPARACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULA

Las partículas o gránulos sólidos de distinto tamaño se separan mediante la operación de tamizado. Esta consiste en la interposición de un elemento de separación denominado tamiz.

La fuerza impulsora que hace que las partículas pasen por un tamiz es la fuerza de la gravedad sumada a una agitación externa que suele ser la vibración. Las funciones del tamizado son la separación de tamaños (finos y gruesos) de la fracción de interés y la clasificación.

Los tamaños gruesos en el caso de la fusión hacen aumentar el flujo de calor necesario para fundir el gránulo, ya que como se explicará más adelante, no podrían tratarse como un sistema concentrado. Los tamaños finos, por el contrario, son los que emiten polvo y empeoran la fluidez.

Al separar por tamaños se obtienen distribuciones granulométricas estrechas por lo que se consigue clasificar y diferenciar un producto con un tamaño uniforme.

Los factores más importantes que afectan a la operación son las características del material. El material que clasificar debe tener una densidad diferente a la del fluido que la contiene, un exceso de finos o gruesos a separar hace que se aglomere polvo o se obture el tamiz y, por último, debe de estar seco para mejorar la eficiencia de la operación.

En la operación debe de adaptarse al caudal de alimento, la intensidad de la agitación y la abertura y superficie de tamizado. [45]

5.6. DESCARGA DE MATERIAL GRANULAR

La descarga de material granular de forma uniforme se rige bajo la ley de Hagen-Beverloo. Esta ley propone una ecuación matemática que describe el flujo de descarga de material granular en un silo de base plana. [40]

La ecuación supone que las partículas caen desde un arco de caída libre que abarca todo el orificio de salida. Por encima de dicho arco, las partículas se hallan en contacto unas con otras mientras que, por debajo, las partículas pierden el contacto entre sí y se aceleran únicamente por la fuerza de la gravedad.

El caudal de paso de partículas es proporcional al área del orificio y a la velocidad de estas. A su vez, el área depende del diámetro del orificio. Si se tiene en cuenta que la velocidad de caída está relacionada con el arco de caída libre que se forma, se puede entender que la velocidad será también función del diámetro del orificio de salida.

Según el autor, las variables que influyen a la descarga por un orificio son, por tanto, la densidad aparente del material a descargar (ρ_{ap}), la gravedad (g), el coeficiente de fricción entre las partículas (μ) y, como no, el diámetro del orificio (D_o).

Con estas variables se dedujo una primera expresión que las relacionaba a todas con el caudal de descarga de forma lineal. Al representar datos experimentales y ajustarlos a la ecuación empírica, observaron que la línea del ajuste no pasaba por el eje de coordenadas. Esto se debe a la existencia de un anillo vacío en el orificio de descarga que hace reducir el diámetro efectivo del mismo, por lo que fue necesario añadir un parámetro que dependía de la forma de las partículas.

Con todo esto aparece la Ecuación 14:

$$W \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = C \cdot \rho_{ap} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \sqrt{g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \cdot (D_o(\text{m}) - k_b \cdot D_g(\text{m})) \quad (14)$$

Donde:

- W (kg/s) = caudal de descarga de material granular.
- C (ad.) = constante relacionada con la rugosidad, y, por tanto, con el coeficiente de fricción entre los gránulos. Puede tomar valores entre $0,58 < C < 0,64$.
- ρ_{ap} (kg/m³) = densidad aparente de los gránulos.

- g ($9,81 \text{ m/s}^2$) = constante gravitacional.
- D_o (m) = diámetro del orificio de descarga del silo de base plana.
- k_b (ad.) = Constante del modelo relacionada con la esfericidad. Puede tomar valores entre $1 < k_b < 3$.
- D_g (m) = diámetro medio de los gránulos.

Para cumplir la Ecuación 14, se añadieron a posteriori del modelo matemático unas restricciones al diseño del silo de base plana:

- La altura (H_{sd}) del silo debe de ser como mínimo 2,5 veces mayor al diámetro (D_{sd}) para no modificar el flujo de material que pasa por el orificio. Esto se debe a efecto Jannsen, que dice que el peso de los gránulos a una determinada altura suficiente se transfiere a las paredes de este, sin afectar a los gránulos cercanos al orificio.
- El flujo no depende del diámetro del silo siempre que $D_{sd} > 2,5D_o$ y, que, además, $D_{sd} > D_o + 30D_g$.

Para esclarecer las restricciones se esquematiza el silo de base plana en la Figura 5.5:

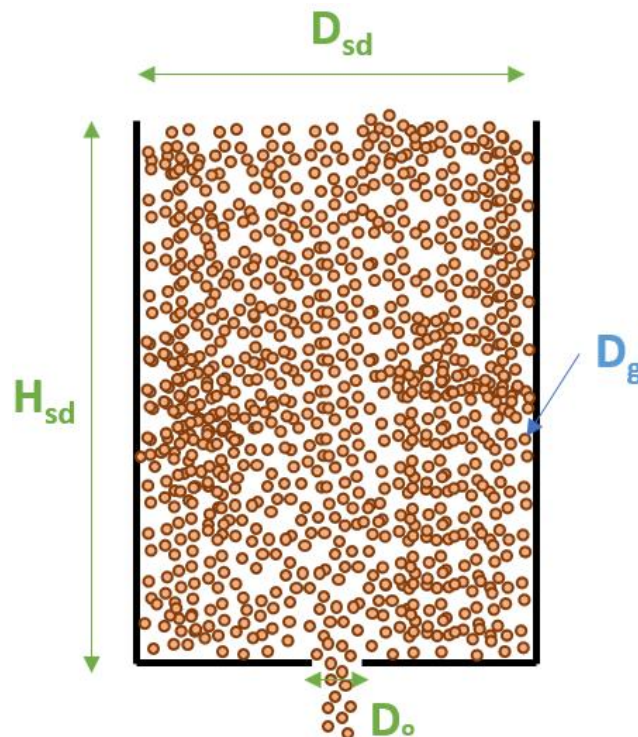


Figura 5.5. Esquema del silo de descarga de base plana.

5.7. MODELO DE SISTEMAS CONCENTRADOS

Si se habla de transferencia de calor se puede hablar de cuerpos que actúan de forma uniforme en cuanto a la temperatura en su interior, es decir, que la temperatura en su interior es función únicamente del tiempo. Esto ocurre cuando la resistencia a la conducción de calor dentro del cuerpo es despreciable, es decir predomina la transferencia de calor por convección (y radiación si es el caso) hasta la superficie del cuerpo. Por tanto, se puede aceptar que en el análisis de sistemas concentrados se supone que la distribución de temperaturas en todo el cuerpo es uniforme debido a la baja resistencia térmica de éste a la conducción de calor. [19]

Matemáticamente se expresa con la ecuación de Biot, que representa la resistencia a la conducción de un cuerpo frente a la resistencia por convección a la superficie de este, según la Ecuación 15:

$$Bi = \frac{\text{Resistencia a la conducción dentro del cuerpo}}{\text{Resistencia a la convección en la superficie del cuerpo}} = \frac{L_c/k}{1/h} = \frac{L_c (m) \cdot h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)}{k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)} \quad (15)$$

Donde:

- $L_c (m)$ = longitud característica de la superficie.
- $h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ = coeficiente individual de transferencia de calor por convección (y radiación).
- $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ = conductividad térmica del material.

De forma general se acepta que un sistema puede tratarse como un sistema concentrado si cumple que:

$$Bi \leq 0,1$$

Esto ocurre en sistemas cuya longitud característica (para esferas, por ejemplo, la longitud característica es un tercio del radio, $r_0/3$) es muy pequeña y/o el material que los compone es muy conductor térmico.

Si se hace un balance de energía al cuerpo (que se está calentando o enfriando) de estudio, que se puede considerar como un sistema concentrado, se puede decir que para un intervalo de tiempo dt , la temperatura del cuerpo aumenta y disminuye un determinado dT . Los

parámetros que intervienen en el análisis de sistemas concentrados son los que se muestran en la Figura 5.6.

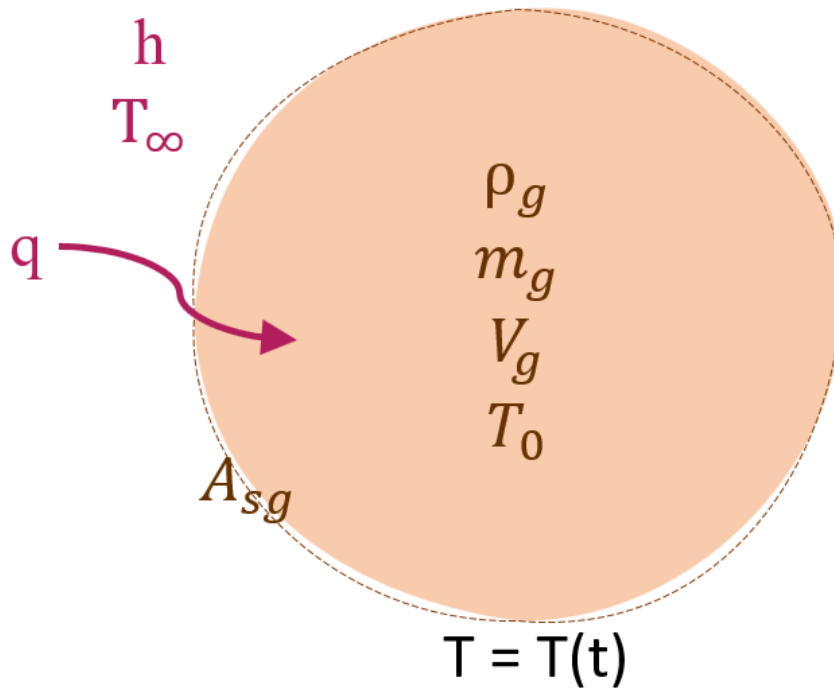


Figura 5.6. Esquema gráfico de los parámetros que intervienen en el análisis de sistemas concentrados.

Donde los parámetros característicos del material (en el caso de estudio, gránulos esféricos) son:

- ρ_g ($\frac{kg}{m^3}$) = densidad del gránulo.
- m_g (kg) = masa del gránulo.
- V_g (m^3) = volumen del gránulo.
- T_0 (K) = temperatura inicial del gránulo.
- A_{sg} (m^2) = área superficial del gránulo
- h ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$) = coeficiente individual de transferencia de calor por convección (y radiación, ya que según [19] debe tenerse en cuenta para un análisis refinado)
- T_∞ (K) = temperatura del medio en el que se lleva a cabo la transferencia de calor.

Esto significa que toda la transferencia de calor hacia el cuerpo en un instante de tiempo hace que aumente o disminuya la energía de este. En términos matemáticos es la Ecuación 16:

$$h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \cdot A_{sg} (m^2) \cdot (T_{\infty} - T) (K) dT = m(kg) \cdot C_p \left(\frac{J \cdot kg}{K} \right) \cdot dT \quad (16)$$

Si se cambia la masa por su definición, Ecuación 5, y se entiende que el diferencial de temperatura varía según $dT = T - T_{\infty}$ siendo la temperatura en el infinito constante, se puede reescribir la Ecuación 16 como la Ecuación 17.

$$\frac{d(T - T_{\infty})}{T - T_{\infty}} = - \frac{h \cdot A_{sg}}{\rho_g \cdot V_g \cdot C_p} dt \quad (17)$$

Si se integra la Ecuación 17 entre el instante inicial (a tiempo cero y temperatura inicial T_0) hasta un instante t con temperatura $T(t)$ se obtiene la Ecuación 18.

$$\ln \frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = - \frac{h \cdot A_{sg}}{\rho_g \cdot V_g \cdot C_p} \cdot t \quad (18)$$

Tomando términos exponenciales en la Ecuación 18, reorganizando y nombrando a todas las constantes de forma agrupadas se obtiene la Ecuación 19, que describe como varía la temperatura de un cuerpo que puede tratarse como un modelo de parámetros agrupados a partir de sus parámetros característicos y las condiciones del entorno.

$$T(t) = e^{-b \cdot t} \cdot (T_i - T_{\infty}) + T_{\infty} \quad (19)$$

Donde se define b y puede simplificarse con la Ecuación 7:

$$b = \frac{h \cdot A_{sg}}{\rho_g \cdot V_g \cdot C_p} = \frac{h}{\rho_g \cdot L_c \cdot C_p}$$

5.8. HORNO DE FUSIÓN VERTICAL

Un horno de fusión vertical es una cámara cilíndrica que permite calentar y enfriar un determinado caudal en un tiempo de residencia igual al que ofrece la caída vertical.

Está formado por tres partes principales: un tubo de canalización por donde cae un determinado caudal, una cámara de calentamiento y una cámara de enfriamiento.

La cámara de calentamiento contiene un cilindro vertical por el que cae el material por gravedad. El material se calienta por medio de resistencias eléctricas. Estas resistencias están recubiertas por una o varias capas de aislante térmico para evitar al máximo las pérdidas de calor en la cámara de fusión. La cámara de enfriamiento está formada por una conducción de acero que se enfría por el exterior mediante aire a temperatura ambiente. En la Figura 5.7 se esquematiza dicho equipo.

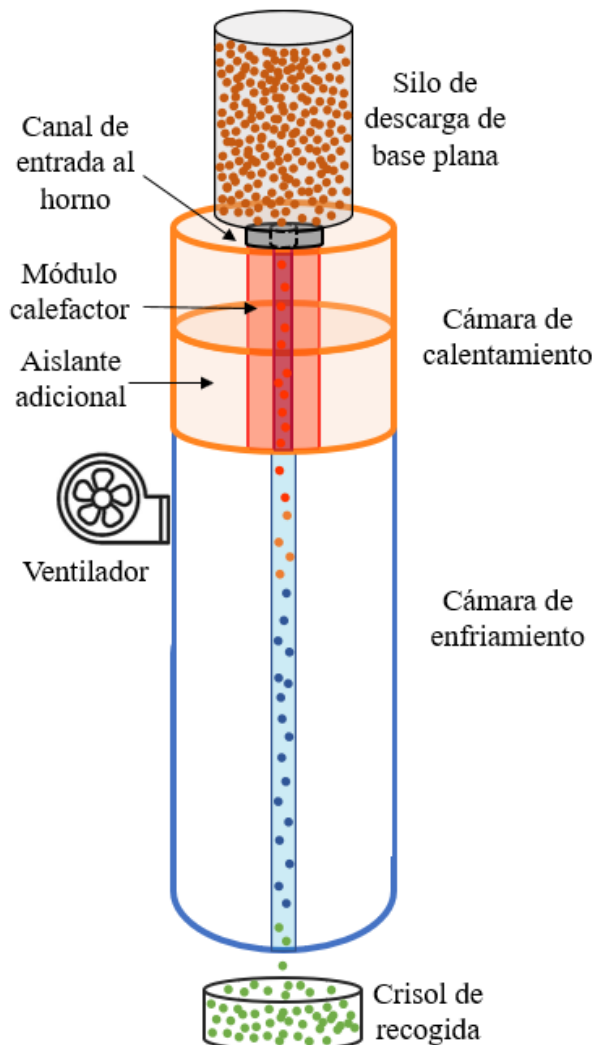


Figura 5.7. Esquema del horno de fusión vertical.

Al tratarse de un horno de fusión de configuración vertical el tiempo de permanencia se rige por las ecuaciones de movimiento que definen la evolución temporal de un sistema físico en el espacio.

Para el caso de caída libre se trata de un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado en el que se supone una trayectoria rectilínea y una aceleración constante. En este caso, la velocidad varía de forma lineal en el tiempo mientras que la posición varía de forma cuadrática. Esto se define en la Ecuación 20 y Ecuación 21.

$$v(t) = v_0 + g \cdot t \quad (20)$$

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (21)$$

Donde:

- v_0 (m/s) = velocidad en la posición 0 del material.
- $v(t)$ (m/s) = velocidad en un instante de tiempo t del material.
- g (9,81 m/s²) = constante gravitacional.
- t (s) = tiempo de caída libre.
- y_0 (m) = posición 0 del material
- $y(t)$ (m) = posición en un instante de tiempo t .

El diseño del horno de fusión vertical se divide en dos apartados, el aporte energético para llegar a la fusión y el enfriamiento de los gránulos para obtener una masa vítrea sólida.

El aporte energético para fundir los gránulos debe cumplir la Ecuación 22:

$$q_{\text{aporte}} \left(\frac{J}{s} \right) \geq q_{\text{fusión}} \left(\frac{J}{s} \right) + q_{\text{pérdidas}} \left(\frac{J}{s} \right) \quad (22)$$

Esta condición es la que marca el diseño del equipo.

Para conocer el flujo de calor necesario a aportar para fundir los gránulos se debe calcular la Ecuación 23:

$$q_{\text{fusión}} \left(\frac{J}{s} \right) = W \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right) \cdot \Delta T (K) \quad (23)$$

Donde:

- $q \left(\frac{J}{s}\right)$ = flujo de calor a aportar para conseguir la fusión del gránulo.
- $W \left(\frac{kg}{s}\right)$ = caudal másico de gránulos.
- $C_p \left(\frac{J \cdot kg}{K}\right)$ = calor específico del material que se está calentado.
- ΔT (K) = diferencia de temperaturas del sistema.

En cuanto a las pérdidas de calor de la cámara de calentamiento, se pueden calcular teniendo en cuenta que una superficie que pierde calor por **conducción**, **convección** y **radiación** puede representarse como una analogía de resistencias eléctricas en serie y paralelo según la Figura 5.8:

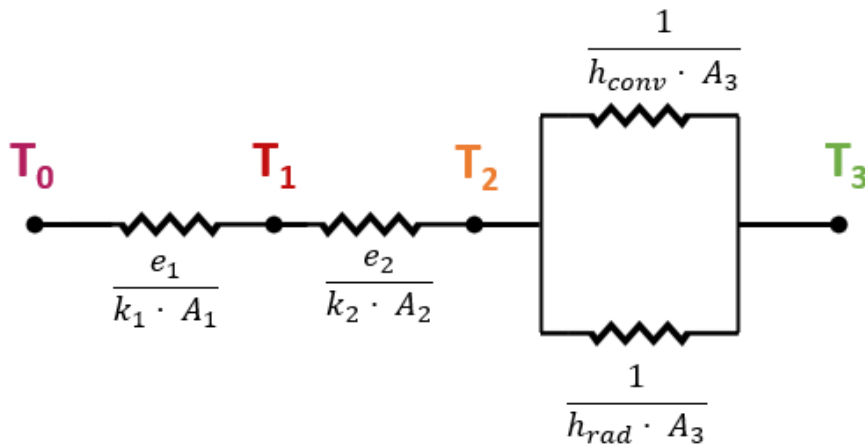


Figura 5.8. Esquema de la analogía eléctrica de un horno de geometría cilíndrica y pared compuesta.

Para un horno de geometría cilíndrica se puede representar según la Figura 5.9, donde los espesores son la resta de los radios de las diferentes capas (A y B) y en verde se representa una superficie suficientemente lejos del sólido.

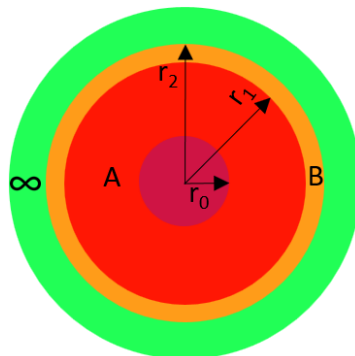


Figura 5.9. Esquema de la vista de sección de una geometría cilíndrica que pierde calor por conducción a través de su espesor y por convección y radiación hacia el ambiente.

Se pierde calor en forma de conducción a través de las paredes y espesores del horno (zona A y B de la Figura 5.9) y a continuación por radiación y convección natural hacia la atmósfera, por lo que la suma de todos estos mecanismos será la pérdida total de calor.

Para poder cuantificar las pérdidas de calor totales, debe expresarse cada mecanismo de transmisión de calor de forma que el flujo de calor sea el cociente entre una diferencia de temperaturas y una resistencia al paso, tal y como en la Ecuación 24:

$$Q_{\text{pérdidas}} = \frac{\Delta T}{R} \quad (24)$$

Para cuantificar las pérdidas de calor a través de la pared por **conducción** debe partirse de la Ley de Fourier, Ecuación 25:

$$Q_{\text{conducción}} \left(\frac{J}{s} \right) = -k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \cdot A \text{ (m}^2\text{)} \cdot \frac{dT}{dx} \left(\frac{K}{m} \right) \quad (25)$$

Donde:

- $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ = conductividad térmica del material.
- $A \text{ (m}^2\text{)}$ = área de la superficie isoterma normal o perpendicular al flujo de calor.
- $dT/dx \left(\frac{K}{m} \right)$ = diferencia de temperaturas en un espacio diferencial.

Se introduce el término densidad de flujo de calor por unidad de área que es:

$$\frac{q}{A} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

A partir de la Ley de Fourier se puede llegar a la expresión que define la densidad de flujo de calor para una geometría de pared cilíndrica compuesta por dos capas (A, B) esquematizada en la Figura 5.9, según la Ecuación 26:

$$\frac{Q_{\text{conducciónA}}}{A_A} = \frac{q_A}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = \frac{k_A \cdot (T_0 - T_1)}{r \cdot \ln(r_1/r_0)} \quad (26a)$$

$$\frac{Q_{\text{conducciónB}}}{A_B} = \frac{q_B}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = \frac{k_B \cdot (T_1 - T_2)}{r \cdot \ln(r_2/r_1)} \quad (26b)$$

Simplificando la Ecuación 26 para cada pared:

$$Q_{\text{conducciónA}} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{k_A \cdot (T_0 - T_1)}{\ln(r_1/r_0)}$$

$$Q_{\text{conducciónB}} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{k_A \cdot (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}$$

Se debe cumplir que la diferencia de temperaturas entre las dos caras opuestas de la pared compuesta ha de ser:

$$T_0 - T_2 = (T_0 - T_1) + (T_1 - T_2)$$

Si se combina la Ecuación 26 simplificada y este requerimiento, se puede entender que el flujo de calor que circula por ambas paredes es el mismo y que, por tanto, Ecuación 27:

$$Q_{\text{conducción}} = \frac{T_0 - T_2}{R_{\text{condA}} + R_{\text{condB}}} = \frac{T_0 - T_2}{\frac{\ln(r_1/r_0)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_A} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_B}} \quad (27)$$

Por lo que, atendiendo a la Ecuación 24, la resistencia al paso por conducción es la Ecuación 28:

$$R_{\text{conducción}} = \frac{\ln(r_1/r_0)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_A} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_B} \quad (28)$$

En cuanto a la convección y la radiación, ocurren de forma paralela por lo que debe obtenerse una resistencia entre ambas.

Para el flujo de calor por **convección** se debe recurrir a la Ley de Enfriamiento de Newton, Ecuación 29:

$$q_{\text{convección}} \left(\frac{J}{s}\right) = h_{\text{convección}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right) \cdot A_s (m^2) \cdot (T_s - T_\infty)(K) \quad (29)$$

Donde:

- $h_{\text{convección}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ = coeficiente de transferencia de calor por convección.
- $A_s (m^2)$ = área superficial de transferencia de calor, se encuentra a temperatura T_s .
- $T_s (K)$ = temperatura de la superficie. De la Figura 5.8 coincide con T_2 .
- $T_\infty (K)$ = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie. De la Figura 5.8 coincide con T_3 .

El coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{\text{convección}}$, se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial por unidad de diferencia en la temperatura. Depende de varias variables y para cuantificarlo se utiliza el número adimensional de Nusselt, Ecuación 30.

$$\text{Nu} = \frac{h_{\text{convección}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot \text{Lc}(\text{m})}{k_{\text{fl}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right)} \quad (30)$$

Donde:

- Nu (ad.) = coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección.
- Lc (m) = longitud característica, que para un cilindro es un tercio de su radio.
- $k_{\text{fl}} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$ = conductividad térmica del fluido, en la mayoría de los casos aire. Su valor está tabulado para una temperatura y presión determinada y se puede leer en la Figura A. 9.10 de los *Anexos*.

El número adimensional de Nusselt es la correlación empírica más sencilla para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección y depende de la geometría de la superficie y del régimen de flujo del fluido. Para una geometría de cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando el efecto del parámetro de curvatura es pequeño. Esto se cumple cuando la relación entre el diámetro y la longitud cumple la inecuación de la Ecuación 31:

$$D_{\text{Hcc}} \geq \frac{35 \cdot L_{\text{Hcc}}}{G_r^{0,25}} \quad (31)$$

Donde:

- D_{Hcc} (m) = diámetro de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.
- L_{Hcc} (m) = longitud de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.
- G_r (ad.) = número adimensional que representa los efectos de la convección natural. Se calcula según la Ecuación 32.

$$G_r = \frac{g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \beta \left(\text{K}^{-1} \right) \cdot (T_s - T_\infty) (\text{K}) \cdot L_c^3 (\text{m})^3}{\nu^2 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)^2} \quad (32)$$

Las propiedades del fluido se evalúan en la temperatura de película, T_p (K), que se calcula como en la Ecuación 33.

$$T_p(K) = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (33)$$

Las nuevas variables de la Ecuación 32 son:

- G_r (ad.) = número de Grashof.
- g ($9,81 \frac{m}{s^2}$) = constante gravitacional.
- β (K^{-1}) = coeficiente de expansión volumétrica.
- ν ($\frac{m^2}{s}$) = viscosidad cinemática del fluido.

Si se cumple la Ecuación 31, se puede calcular el Nusselt de una lámina plana según la Ecuación 34.

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2 \quad (34)$$

Donde:

- Ra (ad.) = número adimensional de Rayleigh, que caracteriza el régimen de flujo y es el producto entre el número adimensional de Grashof y Prandtl.
- Pr (ad.) = número adimensional de Prandtl, que es una propiedad del fluido a una determinada presión y temperatura y cuyo valor se puede leer en la Figura A. 9.10 de los *Anexos*.

Teniendo el coeficiente individual de transferencia de calor por convección en una geometría tubular horizontal y atendiendo a la Ecuación 24, se puede expresar que la resistencia al paso por convección es la Ecuación 35.

$$R_{convección} = \frac{1}{h_{convección} \cdot A_s} \quad (35)$$

En caso de no cumplirse la restricción de la Ecuación 31, A. Barba [11] propone calcular el número de Nusselt según la Ecuación 36 si $1 < Pr < 40$ y $Gr > 10^9$.

$$Nu = 0,638 \cdot Gr^{0,25} \cdot Pr^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{0,25} \quad (36)$$

Para el flujo de calor por **radiación** se debe recurrir a la Ley de Stefan-Boltzmann, que determina la relación entre el poder de emisión de un cuerpo negro y la temperatura absoluta de la superficie según la Ecuación 37.

$$E_b \left(\frac{W}{m^2} \right) = \sigma \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) \cdot T^4 \cdot (K)^4 \quad (37)$$

Donde:

- $E_b \left(\frac{W}{m^2} \right)$ = poder de emisión de un cuerpo negro.
- $\sigma (5,67037 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4})$ = constante de Stefan Boltzmann.
- $T (K)$ = temperatura absoluta de la superficie.

Si añadimos la emisividad del material a estudiar, que no se trata de un cuerpo negro, y multiplicamos la Ecuación 37 por el área que se encuentra a la temperatura superficial podemos obtener el flujo de calor por radiación como en la Ecuación 38.

$$q_{\text{rad}} \left(\frac{J}{s} \right) = \varepsilon \cdot \sigma \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) (K)^4 \cdot A_s (m^2) \quad (38)$$

Donde las nuevas variables son:

- ε = emisividad, radiación que emite una superficie debida a su temperatura (ad.)

Atendiendo a la Ecuación 24 se obtiene la resistencia al paso de flujo de calor que ofrece la radiación, Ecuación 39:

$$R_{\text{radiación}} = \frac{1}{h_{\text{radiación}} \cdot A_s} \quad (39)$$

Donde el coeficiente individual de transferencia de calor por radiación se puede expresar como en la Ecuación 40, donde se ha separado la resta de temperaturas a la cuarta:

$$h_{\text{radiación}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) = \varepsilon \cdot \sigma \left(\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) \cdot (T_s^2 + T_\infty^2) \cdot (T_s + T_\infty) (K)^3 \quad (40)$$

Con todo esto se puede obtener la resistencia al paso que ofrecen la convección natural y la radiación de forma paralela según la Ecuación 41:

$$R_{\text{convección+radiación}} = \frac{1}{(h_{\text{convección}} + h_{\text{radiación}}) \cdot A_s} \quad (41)$$

Y el flujo de calor, Ecuación 42:

$$Q_{\text{convección+radiación}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{1}{(h_{\text{convección}} + h_{\text{radiación}}) \cdot A_s}} \quad (42)$$

6. NORMATIVA APLICADA

La normativa aplicada durante la realización del proyecto ha sido:

- Norma UNE 157001:2014. Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- Norma UNE EN ISO 5455:1996. Dibujos técnicos. Escalas.
- Norma UNE 1026-2:1983 (ISO 5457). Dibujos técnicos. Formatos y presentación de los elementos gráficos de las hojas de dibujo.
- Norma UNE 1035:1995 (ISO 7200). Dibujos técnicos. Cuadro de rotulación.
- Norma UNE 1102. Dibujos técnicos. Simbología.
- ASTM E1980-11(2019). Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.
- Real Decreto Legislativo 1777/2004, de 30 de julio , por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre Sociedades. Boletín Oficial del Estado, n.189 , de 6 de agosto de 2004.

7. REQUISITOS DE DISEÑO Y ESTUDIOS PREVIOS

Para conocer las condiciones iniciales y el fundamento de las principales operaciones que ocurren en el proceso (granulación, secado y fusión) se realizaron ensayos en la Planta Piloto del Instituto de Tecnología Cerámica.

El principal requisito es lograr el funcionamiento del proceso. La productividad deseada se ha fijado en 500.000 kg/año – 600.000 kg/año, puesto que es aproximadamente el 10 % de la producción anual de un horno de fusión de fritas. Para conocer los requisitos de diseño de los equipos se han hecho ensayos con la granuladora EIRICH RV02, de caracterización del producto obtenido, ensayos de secado en un secadero por infrarrojos y ensayos de fundencia en un horno de cámara de alta temperatura.

7.1. ENSAYOS DE GRANULACIÓN EN PLANTA PILOTO

Se realizaron cinco ensayos de granulación en los que se partió de 1,5 kg de una composición de materias primas para la obtención de una frita cerámica. La composición se eligió de tal forma que no tuviese compuestos solubles en agua, por lo que se cambió en un principio el ácido bórico por dolomita. La fórmula de carga que se granuló se puede observar en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Composición a granular, fracción másica (% en peso).

Cuarzo	Feldespatopotásico	Carbonato Cálculo	Colemanita	Óxido de Cinc	Dolomita	Silicato de Circonio
39,4	25,3	8	7	10,9	10,4	9

Los ensayos que se realizaron se muestran en la Tabla 7.2. Como la composición de la que se partía era no arcillosa, debían seleccionarse aditivos que actuaran de ligantes. Tras consultar en bibliografía [33] se decidió granular con polivinilalcohol, PVA, y carboximetilcelulosa, CMC. Se prepararon disoluciones de estos en agua al 20 % en peso de PVA y al 10 % en peso de CMC.

Cada ensayo consistía en cargar la granuladora (que opera en discontinuo) de materia prima, seleccionar que tipo de ligante utilizar (CMC o PVA) y la cantidad, y también la cantidad de agua. Esto se debía cargar a la granuladora vertiéndolo directamente o mediante una pistola de pulverización.

Por otro lado, de las diferentes configuraciones disponibles del pin que se acopla al rotor, se decidió utilizar el de microgranulación, el que se muestra en la anterior Figura 5.2.

El tiempo de granulación, comprendido entre 2 min y 7 min en el mayor de los casos, se decidía durante el experimento, puesto que a cada minuto de granulación se recogía muestra y se determinaba de forma visual y cualitativa la formación de microgránulos. La velocidad se ajustó tal y como se recomendaba en bibliografía y se ha explicado en la introducción.

Tabla 7.2. Ensayos realizados con la granuladora EIRICH RV02. La cantidad de agua y ligante está referida a la masa pulverulenta.

Ensayo	Tiempo (min)	Adición de agua	Cantidad de agua (% en peso)	Ligante	Cantidad de ligante (% en peso)
1	6	Vertido directo	15	CMC	0,5
2	2	Vertido directo	16	CMC	1
3	7	Vertido directo	13	PVA	2
4	4 y 5	Pulverizada directa	12	CMC	0,5
5	4 y 5	Pulverizada fuera	12	CMC	0,5

De los ensayos descritos en la Tabla 7.2, en un principio únicamente fueron de interés el 1, el 4 y el 5. El experimento 2, con una adición de agua del 15 % para granular y, además, la excesiva adición de ligante (1 % en peso de CMC) dio lugar a una masa plástica más que a unos gránulos, por lo que se obvió su estudio. Por el contrario, con el experimento 3, no fue suficiente para obtener gránulos una adición de PVA del 2 %, por lo que el resultado final fue prácticamente polvo.

Del primer ensayo se determinó que el CMC daba buenos resultados porque se observaban gránulos a simple vista, por lo que se decidió estudiar su distribución de tamaño de gránulo. Los gránulos obtenidos en este experimento eran de un tamaño superior al deseado por lo que para el 4 y el 5 se decidió disminuir el contenido en agua y el tiempo de granulación. Además, las condiciones del ensayo 4 y 5 se replicaron, variando únicamente el tiempo de granulación en 4 min (4.1 y 5.1) y 5 min (4.2 y 5.2). Lo que diferencia el ensayo 4 del 5 es que en el 4 se humectó el material en el primer minuto de granulación con la pistola

directamente en la granuladora mientras que, en el 5, intentando repartir mejor la disolución de cola en agua, se decidió humectarlo antes de granular, no teniendo el resultado esperado.

De estos ensayos se midió la distribución de tamaño de gránulo comprendido entre 0 μm y 1000 μm y se observó la distribución de la Figura 7.1. Los datos de la Figura 7.1 se muestran en la Tabla A. 4.1 de los *Anexos*.

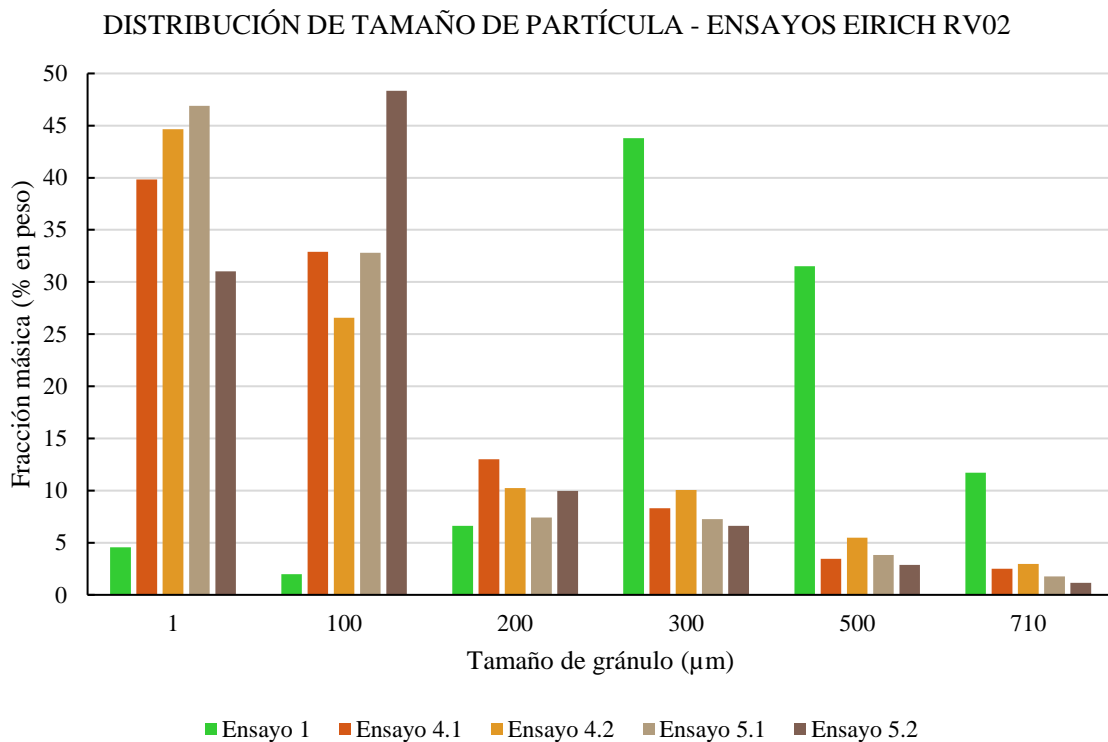


Figura 7.1. Distribución de tamaño de gránulos de los ensayos con la granuladora EIRICH RV02. Las barras coloreadas marcan el % en peso que hay de gránulos con un tamaño comprendido entre cada marca de clase. El eje x, tamaño de gránulo, es el extremo que delimita el intervalo de cada clase.

Con estos datos, se decidió que el ensayo que mejor se ajustaba a las especificaciones era el 4.1, por lo que estas condiciones serán los requisitos de diseño para diseñar una granuladora para producción, escalada a partir de los ensayos de laboratorio.

Para poder diseñar la granuladora escalada es necesario conocer las condiciones iniciales y la productividad que se quiere conseguir.

7.2. CONDICIONES INICIALES PARA LOGRAR LA PRODUCTIVIDAD DESEADA

Para el ensayo 4.1 con la granuladora EIRICH RV02 se utilizaron las condiciones de la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Condiciones de operación de la granuladora EIRICH RV02 de Planta Piloto en el ensayo 4.1.

Tiempo de granulación (min)	4
Cantidad de H₂O (% en peso respecto al material pulverulento)	12
Cantidad de ligante (% en peso respecto al material pulverulento)	0,5
Carga de material pulverulento (kg)	1,5
Carga de la granuladora (H₂O + ligante + material pulverulento) (kg)	1,6875
Velocidad angular de la cuba (rpm)	42
Velocidad angular del rotor (rpm)	2500/5000

Las especificaciones más relevantes del modelo de Planta Piloto necesarios para el escalado son el diámetro de la cuba y del rotor, siendo estos 43 cm y 13 cm, respectivamente. La capacidad de trabajo adecuada de la cuba es de 10 L con un peso máximo de 12 kg.

De este ensayo se obtuvieron las características finales de producción :

Tabla 7.4. Características del producto obtenido del ensayo de granulación 4.1 con la granuladora EIRICH RV02 cargada con 1,6875 kg de material.

Masa de la carga inicial para granular (kg)	1,6875
Humedad en base seca de los gránulos (% en peso)	0,1006
Material pegado en las paredes húmedo (% en peso)	25,9
Gránulos secos obtenidos* (kg)	1,124

*Gránulos obtenidos se refiere a todo el material granulado 1,124 kg (que es aquel que no se ha quedado adherido a las paredes de la cuba y, por tanto, no se ha granulado si no que se ha quedado en forma pulverulenta y se ha secado)

A los gránulos secos obtenidos, que representan un 66,6 % de la producción total, se les realizó un ensayo de distribución de tamaño de gránulo y se obtuvieron los resultados de la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Distribución de tamaño de gránulo del ensayo 4.1 del total de gránulos secos obtenidos.

Gránulos con tamaño > 300 µm secos (% en peso)	32,65
Gránulos con tamaño 100 µm- 300 µm secos (% en peso)	36,21
Gránulos con tamaño < 100 µm secos (% en peso)	31,14

Si estos ensayos se hubiesen realizado con la máxima capacidad de carga de la cuba, que son 12 kg, el material que se perdería por las paredes serían de nuevo 0.437 kg puesto que la rasqueta deja el mismo espesor de capa. El espesor de material pegado en las paredes de la cuba se puede observar en la Figura 7.2.



Figura 7.2. Ensayo de granulación. Imagen detallada del interior de la cuba al finalizar el ensayo. Se observa la capa de material pulverulento adherido a las paredes no granulado.

Este hecho, haría aumentar la productividad de la operación del 66,6 % de gránulos obtenidos a partir de la carga inicial hasta el 86,6 %. Al aumentar la productividad aumenta también la cantidad de gránulos obtenidos con un tamaño igual a la fracción de interés, comprendida entre 100 µm- 300 µm.

7.3. ENSAYOS DE SECADO

Los ensayos de secado se realizaron en la Planta Piloto Hipocarbónica del ITC de la sede Almassora.

Dicho secadero consiste en un tapete de rodillos giratorios sobre los cuales se han posicionado un par de lámparas de infrarrojos de longitud de onda media de 1 kW de potencia, situadas a 10 cm de distancia del tapete. Tanto la distancia de las lámparas al tapete como la potencia de estas es regulable. Además, tiene instalados un par de pirómetros que miden la temperatura de la superficie irradiada. Para entender mejor el funcionamiento se puede observar la Figura 7.3.



Figura 7.3. Secadero por infrarrojos de la Planta Piloto Hipocarbónica.

Tras varias pruebas, se deciden elegir como óptimas las condiciones que se detallan a continuación. Se creó una capa muy delgada de gránulos que ocupaba $0,078 \text{ m}^2$ con una masa de 0,2 kg de gránulos húmedos sobre un soporte de vidrio. Estos gránulos se secaron en una de las lámparas del secadero trabajando a máxima potencia y se obtuvieron los datos de la posterior Tabla 7.6. Los gránulos iniciales del ensayo tenían una humedad en base seca

de 10,67 kg H₂O/kg ss, asumiendo que es aceptable la mínima diferencia entre esta y la que tienen realmente los gránulos a la salida de la granuladora.

Tabla 7.6. Datos de secado de los gránulos con el secadero por Infrarrojos.

t (s)	m(t) (kg H ₂ O + kg ss)		Y (kg H ₂ O/kg ss)
0	m _i	199,2	10,67
30		197,0	9,42
60		194,7	8,17
90		191,7	6,50
120		188,2	4,57
150		186,0	3,33
180		183,0	1,67
210		181,3	0,73
240	m _f	180,0	0,00

Con los datos de la Tabla 7.6 fue posible trazar la curva de secado característica del material y las condiciones descritas. Esta curva está representada en la Figura 7.4.

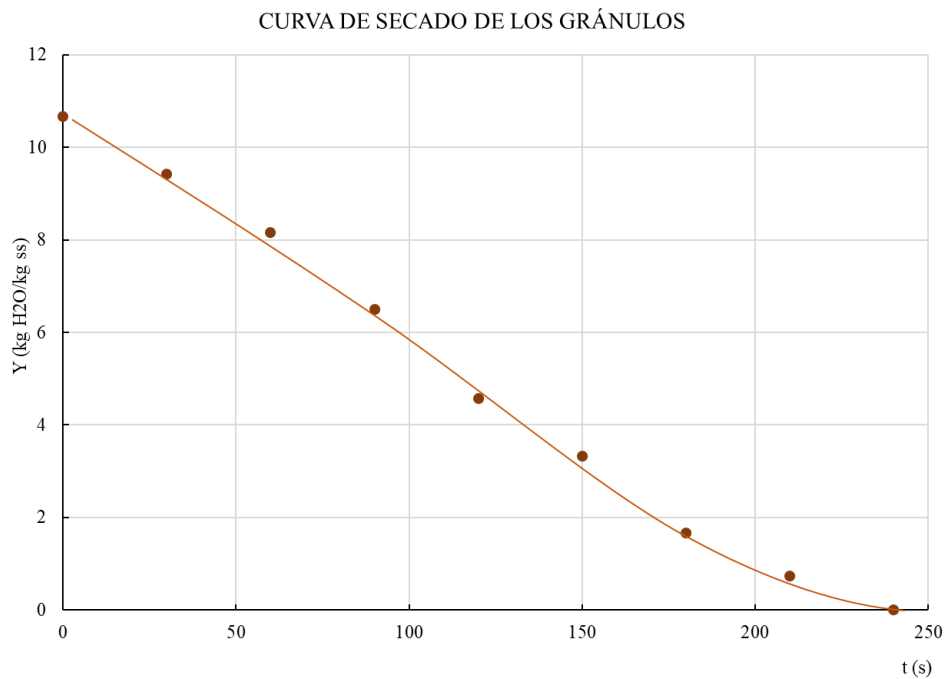


Figura 7.4. Curva de secado de los gránulos.

Por lo que gracias a los ensayos en planta piloto se ha podido determinar que los 0,2 kg de gránulos dispuestos sobre una superficie de 0,078 m² se secan en lámparas infrarrojas de 1 kW de potencia en un tiempo de secado de 4 min.

7.4. ENSAYOS DE TEMPERATURA DE FUSIÓN

Para conocer la temperatura de fusión de los gránulos se realizaron dos ensayos de fusión de la composición. El material se dispuso en un horno de cámara de alta temperatura primeramente a 1400 °C dentro de un crisol, puesto que no era posible realizar un ensayo de fusión en caída vertical.

En la Figura 7.5 se observan tres crisoles en los que inicialmente se encontraban gránulos de las tres fracciones en los que se separan en el proceso, fundidos a 1400 °C y enfriados lentamente dentro del recipiente al terminar el ciclo.



Figura 7.5. Ensayo de temperatura de fusión de la composición a 1400 °C.

El color azul se debe a un enfriamiento muy lento del crisol que dio lugar a separación de fases.

El segundo ensayo se dio de igual forma, pero calentando la masa hasta 1350 °C. Esta vez el enfriamiento se hizo vertiendo el contenido fundido a la salida del ciclo para conseguir un enfriamiento más rápido. Se comprobó que enfriando la masa rápidamente desaparecía el tono azulado y que a 1350 °C no había infundidos en el vidrio.

8. RESULTADOS

8.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS GRÁNULOS

Los gránulos obtenidos en el ensayo 4.1 se caracterizaron mediante varias pruebas de laboratorio con el fin de obtener datos de interés para el posterior diseño.

Se hizo un ensayo de distribución de tamaño de gránulo mediante difracción láser por vía seca utilizando un equipo de difracción MASTERSIZER 3000 de MALVERN. Los cálculos los realiza el software del equipo. Los resultados de la distribución de tamaño de gránulo se observan en la Tabla A. 4.2 de los *Anexos*.

Para conocer el diámetro medio, se ajustaron los datos de la Tabla A. 4.2 a la ecuación empírica de Rossin-Rammler-Sperlig, Ecuación 1. La ecuación da un diámetro estadístico que, en este caso es el volumétrico (el diámetro de una esfera que ocupa el mismo volumen que el gránulo) por los datos obtenidos en la difracción láser.

$$D_R = 197,54 \mu\text{m}$$

Tras el ensayo del Índice de Hausner, se determinó que, con las condiciones de granulación citadas, se obtenían unos gránulos con:

$$IH = 1,07$$

Esto indica una buena fluidez con un comportamiento de flujo libre según la Tabla 5.1.

Además, la densidad de estos gránulos es:

$$\rho_g = 1,79 \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}}\right)$$

Y la densidad aparente:

$$\rho_{ap} = 1,08 \left(\frac{\text{kg}}{\text{L}}\right)$$

Para conocer la forma de los gránulos se visualizaron el microscopio óptico. En la Figura 8.1 se pueden observar los gránulos en un aumento del 5 y 11 respectivamente. Generalmente los gránulos tienen una geometría irregular y alargada, se consiguen algunos gránulos esféricos.

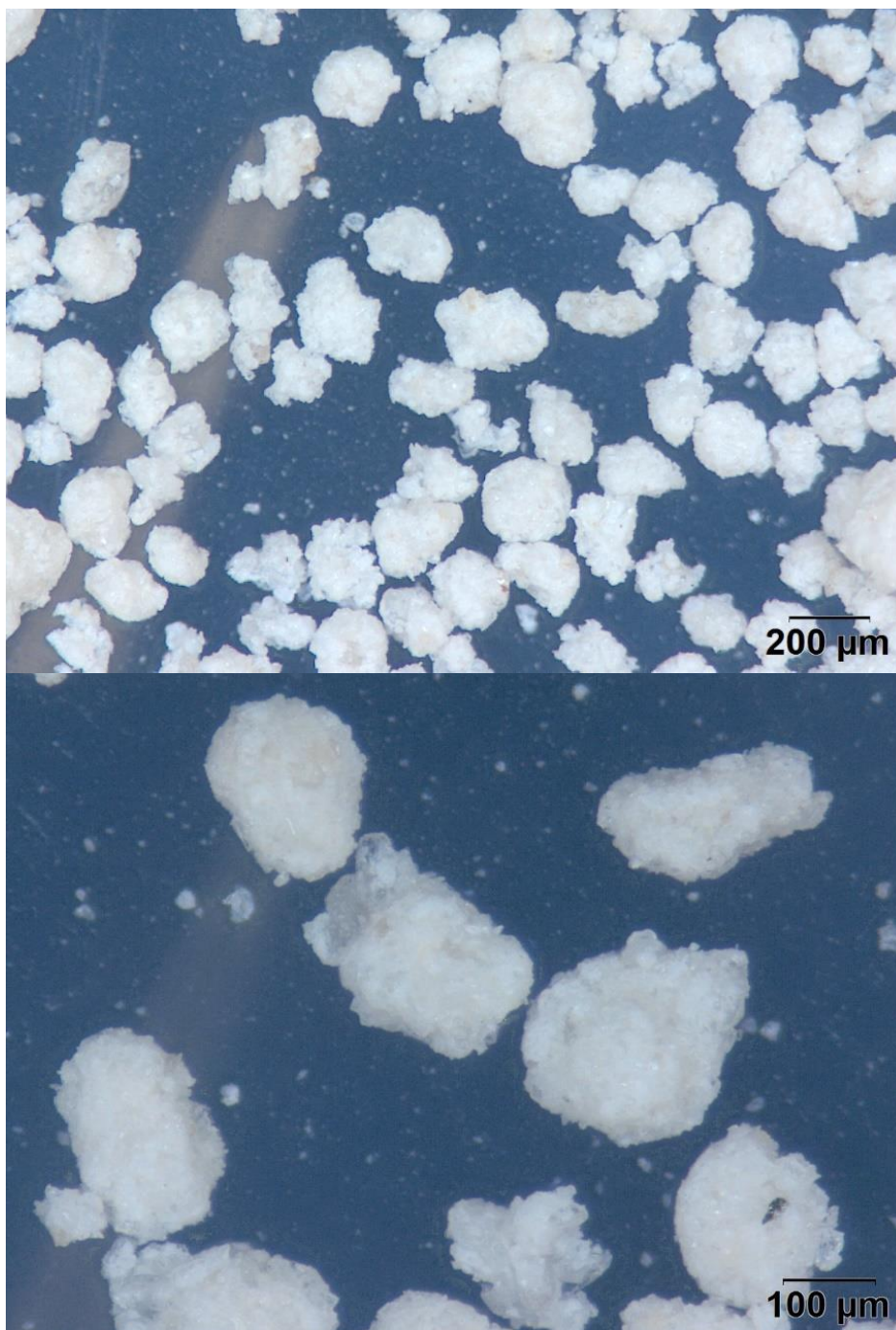


Figura 8.1. Gránulos visualizados en el microscopio óptico con 5 y 11 aumentos.

Tras el secado de estos gránulos se pudo obtener la curva de secado como se muestra en la Figura 7.4. Los datos se obtuvieron a partir de un ensayo en Planta Piloto a pequeña escala. Por último, se han calculado las características de los gránulos que se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Características de los gránulos.

Característica (Unidades)	Valor
r_g (m)	$9,877 \cdot 10^{-5}$
V_g (m ³)	$4,036 \cdot 10^{-12}$
m_g (kg)	$7,225 \cdot 10^{-12}$
A_{sg} (m ²)	$1,226 \cdot 10^{-7}$
L_{cg} (m)	$3,292 \cdot 10^{-5}$

8.2. DISEÑO DE LA GRANULADORA

Para iniciar el diseño, se ha considerado la producción anual de 500.000 kg/año- 600.000 kg/año de gránulos vítreos. Para esta productividad, se debió escalar una granuladora a partir de la utilizada en los ensayos y descrita en el apartado 7.2.

La granuladora de alta cizalla en discontinuo debe tener una cuba con una capacidad de 150 L y con una carga máxima de 240 kg para cumplir los requerimientos de producción de 75 kg/h que suponen 600.000 kg/año.

La rasqueta en forma de “L” se situará a una distancia 1,5 mm de la base y 5 mm del lateral dejando unas pérdidas de material iguales a la granuladora EIRICH RV02 que supone un 3,65 % del material cargado inicialmente.

La cuba debe girar a una velocidad angular, n_{c2} , de 20,07 rpm mientras que el rotor debe girar a una velocidad variable, siendo estas de 1250 rpm y 2500 rpm. Para conseguir este giro, se han seleccionado un par de motores asíncronos, consultando las características de estos en bibliografía. [38]

El motor de la cuba debe tener una potencia de 3 kW y se instala junto a él un reductor que consiga bajar la velocidad de giro desde 750 rpm hasta 21 rpm. El motor del rotor debe tener una potencia de 15 kW y un variador de frecuencia capaz de hacer girar el rotor a la velocidad deseada de 2500 rpm y 1250 rpm.

Se ha añadido por último en el diseño, una envolvente eléctrica, una pantalla de control de operaciones y velocidad, un par de interruptores y un apagado de emergencia.

Con este diseño, se obtiene una producción de gránulos húmedos de 231,24 kg/operación, que, al trabajar una vez a la hora, supone 231,24 kg/h.

El modelo detallado se puede observar en el *Plano 1*, *Plano 2* y *Plano 3*.

8.3. DISEÑO DEL SECADERO POR INFRARROJOS

Para secar hasta humedad nula el caudal de gránulos necesarios obtenidos tras la etapa de granulación, 231,24 kg/h es necesario instalar un secadero por infrarrojos como el esquematizado en la Figura 8.2.

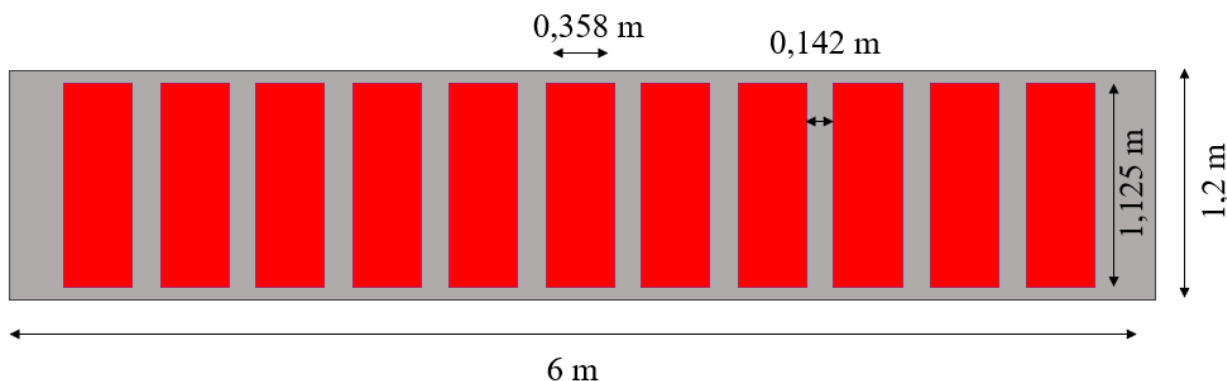


Figura 8.2. Esquema secadero por infrarrojos.

Dicho equipo está formado por una banda sinfín que alberga una fina capa de gránulos que permanecen 4 min en el secadero. Para realizar la operación de secado se han instalado en la parte superior, a 10 cm de la capa de gránulos, 11 lámparas infrarrojas de onda media con una potencia de 1 kW cada una.

Las dimensiones de las lámparas y de la banda sinfín son las que se muestran en la Figura 8.2.

La banda sinfín está fabricada de un acero al carbono que resiste el esfuerzo térmico y mecánico, pudiendo trabajar hasta 400 °C (situación límite que no ocurre en el proceso) y es que están diseñadas para hornos de cocción alimentarios, por lo que su uso en el secadero está justificado. La banda tiene instalado un motor de 90 W.

Los gránulos una vez secos se separan en fracciones con un vibrotamiz cuyas especificaciones quedan descritas en el apartado 7 de los Anexos. Se obtienen 75,36 kg/h de gránulos de interés, habiendo un excedente de 0,36 kg/h por los requerimientos de los hornos de fusión vertical. En el apartado 8.6 de la Memoria queda detallado de forma extensa el funcionamiento del proceso.

Las dimensiones y geometría del secadero quedan detallados en el Plano 4, Plano 5 y Plano 6.

8.4. DIMENSIONADO DEL SILO DE DESCARGA DE BASE PLANA

A partir del caudal de producción fijado (75 kg/h) se decide que son necesarios 5 hornos de fusión vertical para cubrir la demanda. Eso supone $4,17 \cdot 10^{-3}$ kg/s que deben entrar al horno de forma continua y libre, sin apelmazarse.

Para conseguir este efecto se decide dimensionar un silo de descarga para cada horno de fusión utilizando la Ecuación 14. De esta, se conoce el caudal másico a tratar, la densidad aparente de los gránulos y el diámetro medio. Se decide utilizar un valor de 0,58 para la constante C (el más bajo de todos suponiendo que la superficie de los gránulos es rugosa y por tanto tienen elevado coeficiente de fricción) y un valor de 1,5 para la constante kb.

Haciendo los cálculos que se pueden consultar en los *Anexos*, se obtiene un diámetro del orificio del silo de base plana de descarga de:

$$D_o = 5,6788 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,68 \text{ mm}$$

Con el diámetro del orificio y siguiendo las restricciones del modelo matemático para no modificar el flujo, se puede calcular la altura y diámetro de cada uno de los silos mediante una optimización gráfica. Se considera que debían tener una capacidad de 30 kg, que corresponden a aproximadamente 30 L de volumen (por la densidad aparente de los gránulos del apartado 8.1 de la *Memoria*). Las dimensiones de cada silo son, por tanto:

$$H_{sd} = 0,63 \text{ m}$$

$$D_{sd} = 0,25 \text{ m}$$

8.5. DISEÑO DEL HORNO DE FUSIÓN VERTICAL

El horno de fusión vertical tiene una entrada a la cámara por medio de un tubo de diámetro 0,04 m y de fibra cerámica aislante. Este tubo tiene una longitud de 0,03 m que tiene como objetivo separar el silo de la cámara de calentamiento

La cámara del horno está formada por dos módulos consecutivos de resistencias calefactoras recubiertas de fibra aislante cerámica de la marca *Kanthal* [35] que proporcionan un flujo de calor total de 5520 W. Estos módulos calefactores tienen unas dimensiones, cada uno de

$$r_0 = 0,04 \text{ m}$$

$$r_1 = 0,14 \text{ m}$$

$$H_m = 0,25 \text{ m}$$

Además, se ha añadido manta de fibra cerámica aislante adicional para conseguir llegar a una temperatura a la pared del horno de 60 °C. La fibra es de la marca *Morgan* [3] y se ha calculado que se necesita un espesor adicional de manta de:

$$r_2 - r_1 = 0,44 - 0,14 = 0,3 \text{ m}$$

Se ha calculado que se necesitan 2293,5 W para fundir los gránulos y que, con esta configuración, se pierden por las paredes por conducción, convección y radiación un total de 482,24 W, por lo que el flujo de calor que suministran ambos módulos es suficiente para fundir el material.

Se ha calculado el tiempo de residencia para la configuración. Los gránulos están en la cámara de calentamiento 0,2505 s, tiempo necesario para alcanzar la temperatura de fusión, hasta 1350,87 °C, ya que con las características del interior del horno y del gránulo, se ha podido calcular el tiempo de calentamiento necesario y trazar la evolución de la temperatura del gránulo con el tiempo.

Al abandonar la cámara de calentamiento los gránulos en estado fundido atraviesan la cámara de enfriamiento, formada por un tubo de acero inoxidable AISI 316. Se ha calculado que es necesaria una longitud de 1,04 m de tubo, que permite el tiempo de residencia necesario para enfriar el material hasta una temperatura permitida de 600 °C, temperatura a la que salen los gránulos ya en forma vítrea y se recogen en un recipiente de tipo crisol.

Para conseguir disipar el calor que emiten los gránulos al enfriarse se ha instalado un ventilador de aire a temperatura ambiente sobre el tubo de la cámara de enfriamiento. Dicho ventilador trabaja a una potencia de 3 kW para emitir un caudal de $5275,33 \frac{m^3}{h}$.

Para entender mejor el funcionamiento del horno de fusión vertical se puede consultar la Figura 8.3.

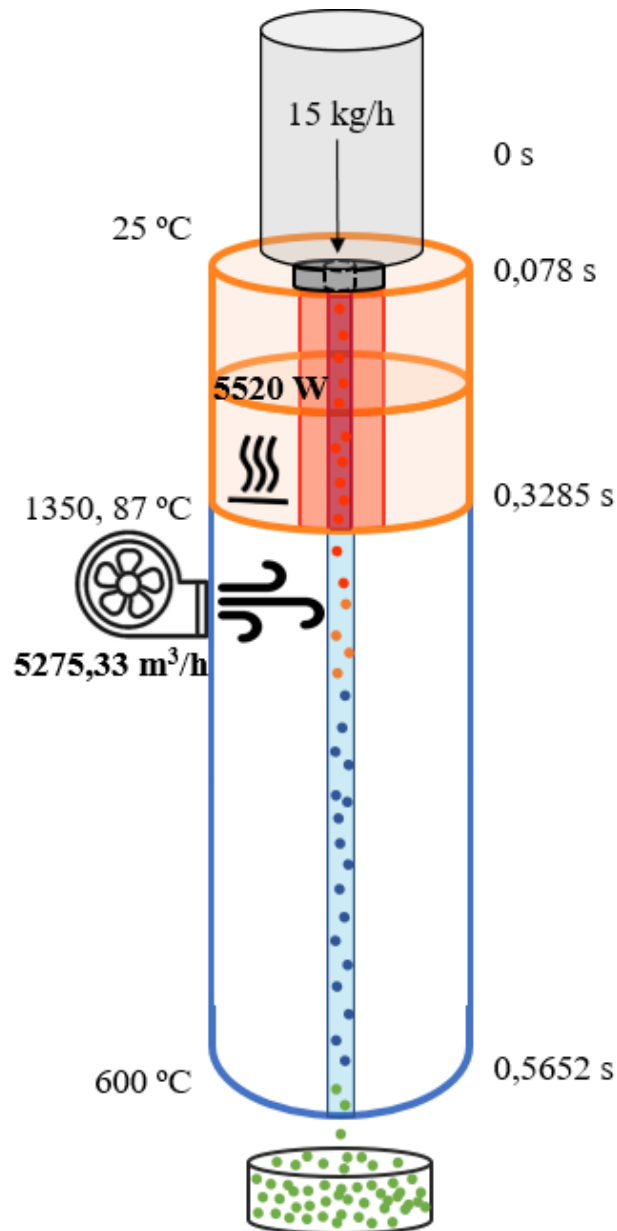


Figura 8.3. Funcionamiento del horno de fusión vertical, esquema.

Se puede consultar su diseño detallado en el *Plano 7* y *Plano 8*.

8.6. FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO

El proceso empieza en unos silos de almacenamiento de materia prima capaces de almacenar la demanda de veinte días. Una vez a la hora se lleva a cabo la granulación, que opera de forma discontinua. En esta operación, se vierten 213,34 kg de material pulverulento en la cuba y se añade con una pistola de pulverización y durante un minuto, la cantidad necesaria de disolución con ligante, 26,67 kg de disolución. Esta disolución de cola en agua se encuentra en un tanque agitado.

El pin de la granuladora gira durante 1 min a máxima velocidad (mientras se dosifica la disolución del ligante) y, a continuación, 3 min más a baja velocidad. Mientras tanto la cuba gira durante 4 min a velocidad fijada.

Tras los 4 min de granulación se descargan los gránulos, se vuelve a cerrar la granuladora y la cuba gira 1 min más con la rasqueta pegada a su superficie que elimina el material pegado no granulado que se vuelca a continuación y se recircula, tratándose como materia prima de nuevo.

Los gránulos caen sobre un secadero por infrarrojos, formado por una cinta sinfin en la que se depositan los gránulos y se secan gracias a unas lámparas infrarrojas de onda media situadas sobre esta, a 10 cm. El secadero, que opera durante todo el tiempo y de forma continua, es capaz de secar el caudal necesario, 231,24 kg/h.

Tras el secado, todos los gránulos obtenidos se separan gracias a la interposición de un tamiz, que consigue separar todo el caudal en media hora, por lo que el tamiz trabaja la mitad del tiempo de operación.

La fracción de interés que se obtiene es de 75,36 kg/h de gránulos secos, por lo que, como se ha comentado, hay un excedente en granulación a la hora.

En los silos de descarga de base plana se almacenan 30 kg por silo. Hay 5 hornos y cada horno funde 15 kg/h, que se recogen por la parte inferior en un crisol.

Las materias primas tienen una pérdida por calcinación del 10 %, calculada en el apartado 10 de los *Anexos*, que hace se disminuya el caudal de producción, siendo finalmente el de cada horno de 13,5 kg/h.

Para transportar los gránulos entre las operaciones que no son continuas se necesita un carro de transporte de sólidos, siendo los mismos operarios los encargados de dicha tarea.

Para entender mejor el funcionamiento del proceso, se ha calculado la demanda de materias primas teniendo en cuenta la recirculación de finos, el gasto que supone eso en fungibles (agua y CMC) atendiendo al % en peso necesario. También el excedente de granulacón que hace disminuir el tiempo anual de operación de la granuladora. Las cantidades granuladas de cada fracción en las que se separan los gránulos y el agua que se elimina en el secado .

De los 240 kg/h que se granulan durante todo el año se distribuyen según los datos de la Tabla 8.2. Recordando que los recuperados se recirculan como materia prima, los de interés son los que se deben fundir (sobrante es el excedente de granulacón) y vítreos los que se obtienen tras fusión y eliminar las pérdidas por calcinación.

Tabla 8.2. Distribución anual del material.

Recuperados	Gruesos	Interés	Entrada horno	Sobrante	Vítreos	
591.506	546.340	605.910	603.000	2.910	542.700	(kg/año)

Estas cantidades se obtienen por tener en cuenta los porcentajes de la Tabla 8.3.

El material granulado es el que se divide en gruesos, finos e interés tras eliminar el agua de secado. El no granulado es el % en peso que se recircula y el fundido tiene en cuenta las pérdidas por calcinación.

Tabla 8.3. Porcentajes de distribución de material en el proceso.

Granulado (% en peso)	0,9635	1
No granulado (% en peso)	0,0365	
Seco (% en peso)	0,9	
Gruesos (%en peso)	0,3265	1
Finos (% en peso)	0,3114	
Interés (% en peso)	0,3621	
Fundido (% en peso)	0,9	

Al tener en cuenta el material recirculado y los requerimientos de granulacón se puede conocer la compra anual de materias primas, que asciende a 1.123.748 kg/año y se distribuye en cada materia prima como se observa en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4. Compra anual de materias primas.

Materia Prima	(% en peso)	kg anuales de compra (kg)
Cuarzo	29,4	330.382
Feldespatos	25,3	284.308
Carbonato Cálcico	8	89.900
Silicato de Circonio	7	78.662
Dolomita	10,9	122.488
Colemanita	10,4	116.870
Caolín	9	101.137

La de fungibles que les corresponde a estas materias primas son los de la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Compra anual de fungibles.

Materia Prima	(% en peso)	kg anuales de compra (kg)
Agua	10,7	182.953
CMC	0,4	7.647

Debido al excedente de granulación se pueden ahorrar operaciones anuales, Tabla 8.6.

Tabla 8.6. Organización de la operación de granulación.

Venta de gránulos vítreos anuales (kg/año)	542.700,00
Requerimientos de entrada a los hornos (kg/año)	603.000,00
Excedente de granulación (kg/año)	2.910,03
Veces que se granula	8040
Veces que se ahorra de granulación	39
Veces totales que se debe granular	8001

Se puede saber que si cada vez que se granula se obtienen 75,36 kg de gránulos de interés y que sobran 2190 kg/año de gránulos, se pueden ahorrar 39 veces de operación de granulación reduciendo así el tiempo de uso de la granuladora.

9. PLANIFICACIÓN

La planificación en un proyecto es un paso importante porque permite actuar de forma ordenada siguiendo una secuencia lógica de actividades. Para planificar la puesta en marcha de un proyecto debe hacerse un listado con las tareas a realizar, anotando el tiempo de duración de cada una y cuál es la dependencia o precedencia de unas con las otras. Para llevar a cabo el proyecto “Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos” se ha realizado en listado de tareas de la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Listado de duración y precedencia de las actividades o tareas del proyecto.

	Descripción	Precedencia	Duración (días)
A	Planteamiento, búsqueda de una necesidad y definición de objetivos	-	15
B	Estudio de viabilidad técnica, búsqueda de documentación y aprendizaje en materia	A	35
C	Pruebas en Planta Piloto del ITC	A	75
D	Proyecto: cálculos	B,C	45
E	Proyecto: diseño de detalle y redacción del documento	B,C	69
F	Compra y envío de los equipos	D,E	21
G	Montaje de los equipos	F	20
H	Conexiones entre equipos e instalación eléctrica	G	20
I	Pruebas, aprendizaje de los empleados y puesta en marcha	H	10

El período laboral se ha fijado contemplando únicamente una jornada laboral de lunes a viernes de 8 horas de trabajo diarias.

La duración de las actividades es un valor aproximado que podría sufrir alteraciones o imprevistos. Las causas y las consecuencias de estas modificaciones quedan redactadas en el *Pliego de Condiciones*.

Para la organización del proyecto se construye un Diagrama de Gantt, que permite tener una vista general de las actividades programadas. En la Figura 9.1 aparecen las barras de colores indicando la duración temporal de cada actividad. Están coloreadas en rosa aquellas actividades que pertenecen al camino crítico y que su demora haría alargar la duración total del proyecto.

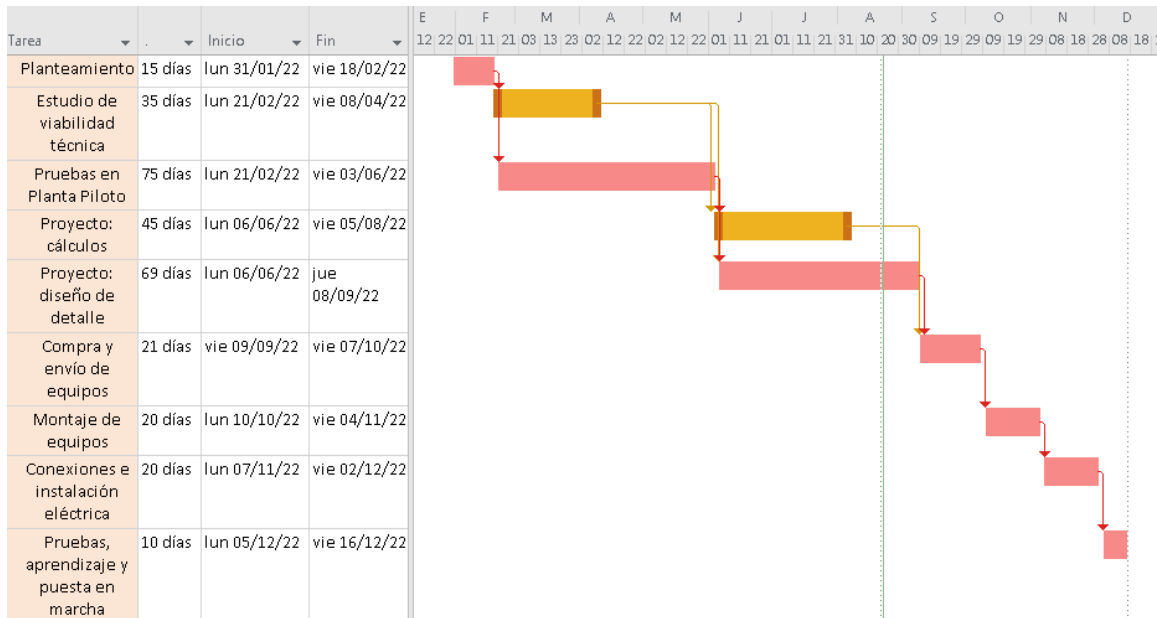


Figura 9.1. Diagrama de Gantt del "Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos".

Atendiendo a la organización del Diagrama de Gantt se puede saber que trabajando según el horario laboral descrito y cumpliendo con los datos de la Tabla 9.1, el proyecto tendrá una duración de 230 días laborables y empezará la fase de explotación el viernes 16 de diciembre de 2022.

10. ORDEN DE PRIORIDAD DE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS

Tal y como marca la norma UNE 157001-2014 “Criterios generales para la elaboración de documentos que constituyen un proyecto técnico” deben presentarse, siguiendo este orden de prioridad, los siguientes documentos básicos del proyecto.

1. Memoria
2. Anexos
3. Planos
4. Pliego de Condiciones
5. Estado de Mediciones
6. Presupuesto

11. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Se va a estudiar la viabilidad económica del proceso. Este paso es un factor clave porque determina si la puesta en marcha del proceso estudiado va a ser factible.

11.1. Resumen del presupuesto

Se resumen en este apartado las principales partes del presupuesto. El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) consta de tres apartados principales que quedan detallados en el documento *Presupuesto* y se denominan partidas presupuestarias. Son las que se observan en la Tabla 11.1.

Tabla 11.1. Resumen Presupuesto Ejecución Material.

Partida	Coste (€)
Equipos	127.436,00
Obra Civil	19.115,40
Seguridad y Salud	14.655,14
TOTAL PEM	161.206,54 €

El PEM es la suma de las tres partidas individuales. Una vez determinado el PEM, debe calcularse el Presupuesto de Ejecución por Contrata, PEC. Este incluye, además, los Gastos Generales, que suponen el 20 % del PEM y el Beneficio Industrial, que es un 6 % del PEM. En la Tabla 11.2 queda calculado el PEC.

Tabla 11.2. Resumen Presupuesto de Ejecución Por Contrata.

Ítem	Coste (€)
Presupuesto de Ejecución Material	161.206,54
Gastos Generales	32.241,31
Beneficio Industrial	9.672,39
TOTAL PEC	203.120,24 €

Por último, se puede calcular el Presupuesto Total. Este supone el coste total que valdría llevar a cabo y hacer realidad el objeto del proyecto. Este se define como la suma del PEC, el valor del 21 % de IVA de este, y la dirección de la obra, que es el 7 % del PEC. El Presupuesto Total suma el valor final de la Tabla 11.3.

Tabla 11.3. Resumen Presupuesto Total.

Ítem	Coste (€)
Presupuesto de Ejecución Por Contrata	203.120,24
IVA (21 %)	42.655,25
Dirección de obra (7 %)	14.218,42
PRESUPUESTO TOTAL	259.993,91 €

Por lo que, el Presupuesto Total del proyecto “Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos” asciende a un valor de DOSCIENTOS CINCUENTA Y NUEVE MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y TRES EUROS CON NOVENTA Y UN CÉNTIMOS.

11.2. Presupuesto de Explotación

Para la realización del Presupuesto de Explotación se estudian los ingresos y gastos que va a tener el proceso en un periodo de tiempo definido, un año natural, suponiendo que se cumplen sus objetivos de explotación.

11.2.1. Ingresos

En primer lugar, se estiman los ingresos que va a tener el proceso anualmente. Estos son los provenientes de las ventas anuales de gránulos gruesos crudos y gránulos vítreos producidos, de forma que se realiza una previsión de las ventas y la valorización de estas. Esto se detalla en la Tabla 11.4.

Tabla 11.4. Ingresos anuales por la venta de productos acabados.

Producto	Cantidad (t/año)	Precio (€/t)	Beneficio (€/año)
Gránulos crudos	546,34	400	218.535,90
Gránulos vítreos	542,70	650	352.755,0
TOTAL INGRESOS			571.290,90 €/año

El producto acabado son los gránulos gruesos crudos destinados a la venta en diferentes aplicaciones como esmalte en seco, para fundir como frita, para prensar placas de vidrio o para hacer perlas de vidrio de alta refracción, usadas como arena de desbaste o para la señalización vial y pintura de carreteras. Estos se venden por un valor de 400 €/t. Los gránulos vítreos para aplicarlos como recubrimientos cerámicos tienen un precio de venta de 650 €/t.

11.2.2. Gastos totales

Para poder realizar un estudio de la viabilidad económica del proceso, una vez se han definido y cuantificado los ingresos, es necesario hacer lo mismo con los gastos. Los gastos del proceso medios anuales se dividen en directos e indirectos.

11.2.2.1. Gastos directos

Los gastos directos son aquellos que están fuertemente relacionados con la actividad del proceso, es decir, que son proporcionales a la producción y se imputan directamente sobre el producto. En estos se contempla la compra de materia prima pulverulenta, la necesaria para la disolución de CMC en agua y el coste energético que deriva del proceso productivo.

Los gastos directos de compra de materia prima quedan reflejados en la Tabla 11.5.

Tabla 11.5. Compra de materia prima anual.

Producto	Cantidad (t/año)	Precio (€/t)	Coste (€/año)
Cuarzo	330,38	65	21.474,82
Feldespató Potásico	284,31	90	25.587,73
Carbonato Cálculo	89,90	40	3.595,99
Silicato de Circonio	7,66	2400	188.789,61
Dolomita	122,49	50	6.124,42
Colemanita	116,87	450	52.591,39
Caolín	101,137	175	17.699,03
TOTAL MATERIAS PRIMAS			315.863,00 €/año

Además de la materia prima pulverulenta, se utiliza también en el proceso agua y ligante para la operación de granulación. El precio del agua se ha consultado en las tarifas de *FACSA* [24]. La compra de CMC ocurre en sacos de 25 kg en proveedores como *AditivosCerámicos* [2] por un precio aproximado de 2,5 €/kg aproximadamente. El consumo y gasto de estos se detalla en la Tabla 11.6.

Tabla 11.6. Compra de fungibles.

Producto	Cantidad (ud/año)	Precio (€/ud)	Coste (€/año)
Agua	182,95 (m ³ /año)	0,57 (€/m ³)	104,28
CMC	7.646,85 (kg/año)	2,5 (€/kg)	19.117,13
TOTAL FUNGIBLES			19.221,42 €/año

El precio de la electricidad se ha determinado a partir del Barómetro Energético en España de la *AEGE, Asociación de Empresas con Gran Consumo de Energía* [5] que siguen la evolución del coste de la energía eléctrica y el resto de los combustibles en Europa. En fecha

de agosto de 2022 queda publicado el estudio realizado a 31 de julio de 2022, que muestra un valor medio del mercado hasta la fecha y el promedio para el resto del año en España, con un precio de la energía eléctrica para las industrias de 241,52 €/MW·h.

El coste eléctrico del proceso es el que se detalla en la Tabla 11.7. Las horas de operación quedan calculadas según el proceso detallado en el apartado 8.6.

Tabla 11.7. Coste energético del proceso.

Unidad	Potencia (kW)	Tiempo (h/año)	Consumo (kW·h)	Coste (€/año)
Motor Tanque Agitado	0,25	8.040,0	2.010,00	482,40
Motor Cuba	3	666,8	2.000,35	480,08
Motor Rotor	15	533,4	8.001,39	1920,33
Motor Banda Secadero	0,09	8.040,0	723,60	173,66
Lámparas Infrarrojas (11)	1 (ud)	88.440,0	88.440,00	21.225,60
Vibrotamiz	0,525	4.020,0	2.110,50	506,52
Módulos calefactores (10)	2,76 (ud)	80.400,0	221.904,00	53.256,96
Ventilador (5)	3 (ud)	40.200,0	120.600,00	28.944,00
TOTAL COSTE ELÉCTRICO				106.989,56 €/año

Por lo que la suma de gastos directos totales asciende al detalle de la Tabla 11.8.

Tabla 11.8 Gastos directos totales.

Tipo	Coste (€/año)
Materias primas	315.863,00
Fungibles	19.221,42
Electricidad	106.989,56
GASTOS DIRECTOS TOTALES	
	442.03,98 €/año

11.2.2.2. Gastos indirectos

Los gastos indirectos son aquellos que no están ligados directamente al producto, sino que son necesarios para la producción. El valor de estos no depende, en cierto modo, de la cantidad que se produce.

La plantilla necesaria para llevar a cabo el proceso está formada por cuatro empleados para poder cubrir las 24 horas de trabajo diarias durante los 335 días laborales. El sueldo de cada operario es 9 €/hora, un valor superior al salario mínimo interprofesional. Como se trabaja 24 horas/día durante 335 días laborales, esto hace un total de 8040 horas/anuales, que supone 2010 horas/anuales por cada operario.

Además del sueldo, se deben pagar también gastos sociales a los trabajadores. Esto asciende a un 32,6 % del sueldo y van destinados a contingencias comunes, contingencias profesionales, formación y desempleo.

Debe pagarse la cuota de *FACSA* de servicio de agua y, por último, se decide externalizar las pruebas de calidad de producto acabado al Instituto de Tecnología, que realizará una prueba mensual por un precio de 250 €/prueba. Se decide también contratar un servicio anual de auditoria medio ambiental para cuantificar y valorar la contaminación atmosférica del proceso por un valor de 2000 €/servicio.

Los gastos indirectos del proceso se detallan en la Tabla 11.9.

Tabla 11.9. Gastos indirectos totales.

Gasto	Cantidad (unidad)	Precio (€/unidad)	Coste (€/año)
Empleados	8040 (horas/año)	9 (€/hora)	72.360,00
Cuota servicio agua	1	174,48	174,48
Gastos Sociales	1	0,326 · Empleado	23.589,36
Ensayo producto acabado	12	400	4.800,00
Auditoria	1	2000	2.000,00
GASTOS INDIRECTOS TOTALES			102.923,84 €/año

Los gastos totales se calculan sumando los gastos directos y los indirectos, valor de la Tabla 11.10.

Tabla 11.10. Gastos Totales.

Gasto	Coste (€/año)
Gastos directos	442.03,98
Gastos Indirectos	102.923,84
GASTOS TOTALES	544.997,82 (€/año)

11.2.3. Amortizaciones

La amortización es la pérdida de valor que sufre un bien físico amortizable en el tiempo. Las pérdidas de valor de la maquinaria están reguladas por legislación. Cuando un bien físico pierde valor en el tiempo, se va reservando la parte equivalente a esta pérdida anual de modo que, en caso de cambio por fin de su vida útil, se pueda comprar un segundo bien que valga, al menos, lo que costaba el primero.

La amortización se ha calculado según Real Decreto Legislativo 1777/2004, del que se han obtenido los coeficientes lineales de amortización y el periodo máximo para cada bien amortizable. Estos son los que se recogen en la Tabla 11.11.

Tabla 11.11. Coeficientes lineales de amortización y período máximo.

Equipo	Coste total (€)	Coefficiente lineal máximo (%)	Período máximo (años)	Amortización (€/año)	Período de amortización (años)
Carro de transporte	1664,00	4	50	66,56	25
Silo babyrac	10.500,00	4	50	420,00	25
Eurosilo (7,5 m ³)	3.500,00	4	50	140,00	25
Eurosilo (21 m ³)	4.700,00	4	50	188,00	25
Tanque agitado	1.600,00	4	50	64,00	25
Granuladora	12.762,00	10	18	1.276,20	10
Secadero por infrarrojos	11.720,00	10	18	1.172,00	10
Vibrotamiz	17.000,00	10	18	1.200,00	10
Silo de descarga de base plana	12.500,00	4	50	500,0	25
Hornos de fusión vertical	51.140,00	10	18	5.614,00	10
Crisol de recogida de gránulos	350,00	10	18	35,00	10

Cogiendo el valor máximo que puede tomar el coeficiente lineal se observa que en ninguno de los equipos el período de amortización supera el período máximo permitido. La amortización durante los quince años de horizonte de estudio de la viabilidad económica será variable. Des del año uno hasta el año diez tendrá el valor de la suma de todos los bienes amortizables, que es 10.675,76 €/año, mientras que a partir del onceavo año y hasta el último de estudio (quedando aun bienes por amortizar hasta los veinticinco años tras el inicio de la actividad industrial) la amortización disminuirá hasta un valor de 1.378,56 €/año.

11.2.4. Beneficio

Obtener beneficios es el principal objetivo de una empresa. Se debe distinguir entre:

- Beneficio bruto (BB): es la diferencia entre los ingresos menos los gastos totales y la amortización.
- Beneficio neto (BN): es el beneficio bruto tras eliminarle el 25 % que supone el impuesto de sociedades.

11.2.5. Flujo de Caja

Flujo de Caja (FC): es el flujo económico circulante, entradas y salidas, en un periodo fijado. Se calcula con la Ecuación 43.

$$FC = BN + \text{Amortización} \quad (43)$$

11.3. Estudio de Viabilidad Económica

El estudio económico se va a realizar en un horizonte de quince años. Para comprobar la viabilidad económica se calculará el Período de Retorno (PR), el Valor Actual Neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

Se desea obtener un periodo de retorno de quince años como máximo. El “payback period” es el tiempo que se tardará en recuperar el dinero que se había invertido inicialmente. Es un primer indicador de si un proceso es viable o no. Se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo de caja medio, Ecuación 44, cuando el flujo de caja es constante en los años.

$$PR = \frac{I_0}{FC_{\text{medio}}} \quad (44)$$

El Valor Actual Neto, se calcula mediante el cálculo del flujo de caja que se va a obtener cada año desde el principio y durante los quince años de horizonte si se empieza desde cero, es un indicador de rentabilidad.

Se calculan los gastos e ingresos anuales, teniendo en cuenta el Índice de Rentabilidad (i_r). El Índice de Rentabilidad depende del interés nominal (i_n), un indicador que mide el porcentaje de beneficios que genera el dinero depositado y el Índice de Precios al Consumidor (IPC) que mide la inflación. El Índice de Rentabilidad o Interés Real se calcula restando el IPC al i_n y supone la cantidad de dinero generado por invertir dinero en un negocio (lo que se genera por invertir menos lo que se devalúa la moneda). Los valores

utilizados para hacer el Estudio de Viabilidad Económica son los que se muestran en la Tabla 11.12.

El IPC se ha determinado a partir del informe trimestral del IPC y su previsión en España que realiza *Bankinter* [23]. Debido al estado de inestabilidad por la reapertura de la economía tras la pandemia mundial y el problema de suministro, agravado por la situación bélica ucraniana, se está viviendo una tendencia al alza de los precios que se prevé que se modere en los próximos años. Por ello, se ha tomado un valor medio de IPC comprendido entre 2018 y la previsión del estudio hasta 2024.

Tabla 11.12. Valores del Interés nominal, Interés real e IPC.

i_n (%)	IPC (%)	i_r (%)
3	2,6	0,4

El VAN se calcula desde año cero y cuando este empieza a tomar valores positivos, significa que el negocio funciona económicamente, que va a generar ingresos habiendo recuperado ya la Inversión Inicial. Se calcula según la expresión Ecuación 45.

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^{15} \frac{FC}{(1+i_r)^n} \quad (45)$$

La Tasa Interna de Retorno o rentabilidad es el porcentaje de beneficio (o pérdida) que tendrá una determinada inversión. Se calcula haciendo el VAN 0, Ecuación 46, y son de interés aquellos proyectos que tienen un TIR (%) superior al Interés nominal.

$$0 = -I_0 + \sum_{n=1}^{15} \frac{FC}{(1+i)^n} \quad (46)$$

Los valores necesarios para realizar el estudio de viabilidad económica son los de la Tabla 11.13.

Tabla 11.13. Valores para el estudio de Viabilidad Económica.

Inversión Inicial (€)	259.993,91
Ingresos Anuales (€)	571.290,90
Gastos Anuales (€)	544.997,82
Amortización año 1-10 (€/año)	10.675,76 €
Amortización año 1-25, en su defecto, 15 (€/año)	1.378,56

Con todo lo expuesto, puede realizarse un estudio de Viabilidad Económica como el que se muestra en la Tabla 11.14.

Tabla 11.14. Estudio de Viabilidad Económica.

	Gastos (€)	Ingresos (€)	Amort (€)	BB (€)	BN (€)	FC (€)	$\frac{FC}{(1+i_r)^n}$	$\frac{FC}{(1+i)^n}$	VAN
1	544.998	571.291	10.676	15.617	11.713	22.389	22.300	21.297	-237.694
2	559.168	586.144	10.676	16.301	12.226	22.901	22.719	20.722	-214.975
3	573.706	601.384	10.676	17.002	12.752	23.428	23.149	20.164	-191.826
4	588.622	617.020	10.676	17.722	13.291	23.967	23.588	19.622	-168.239
5	603.927	633.063	10.676	18.460	13.845	24.521	24.036	19.097	-144.202
6	619.629	649.522	10.676	19.218	14.413	25.089	24.495	18.586	-119.707
7	635.739	666.410	10.676	19.995	14.996	25.672	24.965	18.090	-94.742
8	652.268	683.737	10.676	20.793	15.594	26.270	25.444	17.609	-69.298
9	669.227	701.514	10.676	21.611	16.208	26.884	25.935	17.141	-43.363
10	686.627	719.753	10.676	22.450	16.838	27.513	26.437	16.687	-16.926
11	704.480	738.467	1.379	32.609	24.456	25.835	24.725	14.905	7.799
12	722.796	757.667	1.379	33.492	25.119	26.498	25.258	14.541	33.057
13	741.589	777.366	1.379	34.399	25.799	27.178	25.803	14.187	58.860
14	760.870	797.578	1.379	35.329	26.497	27.875	26.360	13.842	85.221
15	780.653	818.315	1.379	36.284	27.213	28.591	26.929	13.505	112.150
Promedio						25.641	-	-	
Sumatorio						-	372.144	259.994	

Con la Ecuación 44 se calcula el Periodo de Retorno:

$$PR = \frac{259.993,91}{25.640,78} = 10,14 \text{ años}$$

Con la Ecuación 45 puede calcularse el VAN:

$$VAN = -259.993,91 + 372.144,02 = 112.150,11 \text{ €}$$

Por último, el valor de i que hace que el VAN sea cero, es decir, el TIR, con la Ecuación 46:

$$0 = -259.993,91 + 259.993,91$$

Siendo $i = 0,512$, por lo que $TIR (\%) = 5,1$

12. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ECONÓMICO

En la Tabla 12.1 muestran los indicativos económicos del proyecto.

Tabla 12.1 Indicativos económicos del proyecto.

VAN (€)	112.150
TIR (%)	5,1
PR (años)	10,14

En la Tabla 12.1 se puede apreciar como el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto “Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos” tiene un valor de 112.150 €, siendo este el valor del dinero generado por el proceso tras 15 años de actividad.

La Tasa Interna de Retorno tiene un valor del 5,1 %, es el valor que hace que el VAN sea cero. Este valor es superior al interés real, (0,4 %) que es la tasa mínima rentable exigida.

Para conocer en qué momento se recupera toda la inversión se calcula el Periodo de Retorno que tiene un valor de 10,14 años, momento en que la última columna de la Tabla 11.14 empieza a tomar valores positivos. Este PR es indicativo de la viabilidad del proyecto y demuestra que se necesita poco tiempo para recuperar la inversión inicial y empezar a obtener beneficio industrial.

Se ha calculado que el precio de compra de una tonelada de materia prima asciende a 281 €/t y que son necesarios 197 € para procesar dicha tonelada mediante energía eléctrica para obtener gránulos vítreos.

El proceso está fuertemente ligado al precio de la materia prima y al de la luz. Teniendo en cuenta la situación actual de inestabilidad se puede entender que el estudio de viabilidad económica está muy condicionado al precio de estas y que en otro momento temporal los resultados obtenidos podrían diferir mucho de los actuales.

13. NOMENCLATURA

Se describe en este apartado la nomenclatura y unidades utilizadas para nombrar variables de diseño, se definen también subíndices para los diferentes equipos y, por último, abreviaturas y siglas, por orden alfabético.

Nomenclatura

- A = área (m^2).
- b = parámetros agrupados de la Ecuación 19 (ad.).
- C = constante de la rugosidad de la Ley de Beverloo (ad.).
- C_p = calor específico de un material ($J /kg \cdot K$).
- d = elemento diferencial (ad.)
- D = diámetro (m).
- e = espesor (m).
- E_b = poder de emisión de un cuerpo negro (W/m^2).
- g = constante gravitacional ($9,81 m/s^2$).
- h = coeficiente individual de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$).
- H = altura (m).
- I = inversión.
- k = conductividad térmica de un material ($W/m \cdot K$).
- k_b = constante de esfericidad de la Ley de Beverloo (ad.).
- L = longitud (m).
- m = masa (kg).
- n = velocidad angular (rpm o min^{-1}).
- p = pendiente de una recta (ad.).
- q = flujo de calor (J/s).
- r = radio (m).
- R = resistencia al paso térmico (K/W).
- t = tiempo (s).
- T = temperatura (K).
- v = velocidad lineal o periférica (m/s).
- V = volumen (m^3).
- W = caudal másico de gránulos (kg/s).
- y = posición (m).

- Y = humedad en base seca ($\text{kgH}_2\text{O}/\text{kgSólidoSeco}$).
- β = coeficiente de expansión volumétrica (K^{-1}).
- ε = emisividad de una superficie (ad.).
- ν = viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).
- ρ = densidad (kg/m^3).
- σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67037 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$).

Subíndices

- a_p = aparente.
- c = característico.
- cc = cámara de calentamiento del horno de fusión vertical
- ce = cámara de enfriamiento.
- $c1$ = cuba de la granuladora inicial.
- $c2$ = cuba de la granuladora escalada.
- e = elevada, referido a la velocidad del rotor.
- f = final.
- fl = fluido.
- g = gránulo.
- H = horno de fusión vertical.
- i = inferior.
- m = moderada, referida a la velocidad del rotor.
- M = módulo calefactor de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.
- o = orificio del silo de descarga de base plana.
- p = película.
- r = estadístico.
- $r1$ = rotor de la granuladora inicial.
- $r2$ = rotor de la granuladora escalada.
- s = superficial.
- S = silo de almacenamiento.
- sd = silo de descarga de base plana.
- t = instante de tiempo.
- v = vibrotamiz
- 0 = inicial o interior de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.

- 1 = primera capa de aislante de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.
- 2 = segunda capa de aislante de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical.
- 3 = interacción de la pared exterior de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical con el exterior.
- ∞ = situado en el infinito, en el ambiente o superficie suficientemente lejos.

Abreviaturas

- Bi = Número de Biot.
- Cond = conducción.
- conv = convección.
- Gr = número adimensional de Grashof.
- Nu = número adimensional de Nusselt.
- Pr = número adimensional de Prandtl.
- Ra = número adimensional de Rayleigh.
- rad = radiación.

Acrónimos y Siglas

- AISI = American Iron and Steel Institute.
- AEGE = Asociación de Empresas con Gran Consumo de Energía.
- ANFFECC = Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos.
- ASCER = Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos.
- BB = Beneficio Bruto.
- BN = Beneficio Neto.
- CMC = Carboximetilcelulosa.
- FC = Flujo de Caja.
- IH = Índice de Hausner.
- i_n = Interés Nominal.
- IPC = Índice de Precios al Consumidor.
- i_r = Índice de Rentabilidad.
- ITC = Instituto de Tecnología Cerámica.
- IVA = Impuesto sobre Valor Añadido.

- rpm = revoluciones por minuto.
- PEC = Presupuesto de Ejecución Por Contrata.
- PEM = Presupuesto de Ejecución Material.
- PR = Período de Retorno.
- PVA = Polivinilalcohol.
- TIR = Tasa Interna de Retorno.
- VAN = Valor Actual Neto.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adajusa. (2022). *Reductores Adajusa*. <https://adajusa.es/es/587-reductores>
- [2] Aditivos Cerámicos. (2022). Productos - CMC. <http://www.aditivosceramicos.com/productos/>
- [3] Advancing materials science | Morgan Advanced Materials. (2022). Cerachem Blanket. <https://www.morganadvancedmaterials.com/>
- [4] AEG Electric Motors. (2020). *Technical Catalogue*.
- [5] AEGE. (2022). Barómetro Energético en España. Asociación de Empresas con Gran Consumo de Energía. <https://www.aege.es/>
- [6] Amorós Albaro, J. L. (2000). *Vidriados para pavimentos y revestimientos cerámicos. Evolución y perspectivas*. Instituto de Tecnología Cerámica. Universitat Jaume I. Castellón. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (A. I.C. E.). Castellón.
- [7] Amorós, J. L. (2013b). *Notas de clase - Tema 12. Prensado*. Universitat Jaume I.
- [8] ARVEN. (2022). Panel Radiante por Infrarrojos Industrial. <https://www.arven.es/producto/ir-panel-radiante-infrarrojos-industrial/>
- [9] *Ascer alerta del «insostenible» aumento del precio del gas*. (2022, 17 agosto). ELMUNDO. <https://www.elmundo.es/comunidadvalenciana/castellon/2022/08/17/62fc0ac2e4d4d871258b45a1.html>
- [10] *Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos*. (2022). ANFECC. <https://www.anffecc.com/es/>
- [11] Barba Juan, A. (2003). 155. *Operaciones básicas de transmisión de calor. N23 (Departament d'Enginyeria Química)*. Publicacions de la Universitat Jaume I.
- [12] Berndorf. (2020). *Bandas de acero*. Berndorf Band Group. <https://www.berndorfband-group.com/es/productos/bandas-de-acero/>
- [13] Blasco, A. (1992). Tratamiento de emisiones gaseosas, efluentes líquidos y residuos sólidos de la industria cerámica. Instituto de Tecnología Cerámica-AICE.

- [14] Boix, J. (2021). Curso de Experto en Procesado de Materiales Cerámicos - M 5.1 Prensado y conformado de la pieza. ITC.
- [15] Bonnet. (2022). Bonnet Suministros y Maquinarias S.L. *Catálogo de productos 2022. Acero Inoxidable*. <https://www.bonnet.es/Inoxidable.aspx#>
- [16] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2019). Ciencia e ingeniería de materiales (2.a ed.). Reverte.
- [17] Cantavella, M. (2010). *Desarrollo de fritas, esmaltes y pigmentos cerámicos*. IES Caminàs.
- [18] Casanovas, B. (2022, 13 enero). *¿En que consiste el proceso de granulación?* CHUMILLAS TECHNOLOGY. De : <https://www.chumillastechnology.com/blog/en-que-consiste-el-proceso-de-granulacion/>
- [19] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones* (4.a ed.). McGraw-Hill.
- [20] Cervantes, E., García, F. J., Segarra, C., & Vicente, M. J. (2014). Análisis de las variables de proceso en una granuladora-mezcladora de alta cizalla mediante diseño de experimentos. Qualicer.
- [21] Cervantes, E., García, F. J., Segarra, C., & Vicente, M. J. (2014). *Análisis de las variables de proceso en una granuladora-mezcladora de alta cizalla mediante diseño de experimentos*. Qualicer.
- [22] Cervantes, E., García-Ten, F. J., Segarra, C., & Quereda, M. F. (2014). *Estudio de la influencia de las variables de proceso sobre las propiedades de los gránulos de arcilla obtenidos en una mezcladora-granuladora de alta cizalla*. Qualicer.
- [23] Departamento de Análisis de Bankinter. (2022). Previsión IPC España para 2022, 2023 y 2024. Bankinter. <https://www.bankinter.com/blog/economia/previsiones-ipc-espana>
- [24] FACSA. (2022). Facsa Ciclo Integral del Agua. Tarifas de abastecimiento de agua potable. <https://www.facsa.com/>

- [25] Ferrer, S., Mezquita, A., Monfort, E., & Vedrí, J. (2022). *Guía de Tecnologías Hipocarbónicas para la Industria de Baldosas Cerámicas*. Generalitat Valenciana - IVACE - ITC.
- [26] *Filtra Vibración – Fabricantes de tamices, tamizadoras industriales y de laboratorio*. (2022). ZEUS-FTI 0550. <https://filtra.com/>
- [27] *Fit for 55*. (2022, 30 junio). European Council. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [28] Howell, J. R., Siegel, R., K., & R. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer* (4th ed.). Taylor & Francis.
- [29] ITC. (2022). *Análisis granulométrico por difracción láser vía seca - Trabajo contratado*. Laboratorio de Análisis.
- [30] EdrawMax. (2022). [Software de diseño de ordenador]. Wondershare.-
- [31] Equipo Co., Ltd del paquete de TRUSTAR Pharma. (2019, 3 agosto). *Una guía definitiva para el proceso de granulación de lecho fluido (actualizado) - CONOCIMIENTO - TRUSTAR Pharma Pack Equipment Co., Ltd*. <http://www.trustarpack.com/info/a-definitive-gui>
- [32] *Eurosilos (SES) – Bupolsa*. (2022). Bupolsa. <https://www.bupolsa.com/producto/eurosilos/>
- [33] García-Ten, F. J., Moreno, A., Quereda, M. F., Sanz, V., & Saburit, A. (2003). *Use of binders for presing non-plastic materials. L'industrie céramique & verrière*, 988, 28-39.
- [34] Jarque, J. (2020). *Notas de EQ 1038 Operaciones de Separación II*. UJI.
- [35] Kanthal® — Inicio. (2022). Superthal. <https://www.kanthal.com/es-es/>
- [36] *La rebaja del Gobierno en el coste del gas deja fuera a la cerámica de Castellón*. (2022, 3 abril). El Periódico del Azulejo. <https://www.elperiodicodelazulejo.es/industria/la-rebaja-del-gobierno-en-el-coste-del-gas-deja-fuera-a-la-ceramica-de-castel>

- [37] Litster, J., & Ennis, B. (2013). *The Science and Engineering of Granulation Processes (Particle Technology Series Book 15) (English Edition)* (2004.a ed.). Springer.
- [38] Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG,. (s. f.). EIRICH RV Intensive Mixer.
- [39] Moreno, A. (2021). Notas de *EQ 1038 Materias Primas para la Industria Cerámica*. UJI.
- [40] Pablo Mankoc, C. (2007). *Programa de Doctorado: Inestabilidades en Sistemas Disipativos. Flujo de medios granulares en la descarga de silos bajo la acción de la gravedad*. Universidad de Navarra.
- [41] Pérez, L., Cardero, Y., & Garcell, L. (2009). *Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita*. Tecnología Química. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543761010.pdf>
- [42] Prenitor | TINSMACAL | *Acero inoxidable e ingeniería de laboratorio para sectores como la industria farmacéutica, cosmética, alimentaria y química*. (2022). Agitador 35 L. <https://prenitor.com/>
- [43] RS Components. (2022). Variador de frecuencia Omron serie V1000. https://es.rs-online.com/web/p/variadores-de-velocidad/0385156?cm_mmc=ES-PPC-DS3A--google--DSA_ES_ES_Automatizaci%C3%B3n+y+Control+de+Procesos_Index--Variadores+de+Velocidad%7C+Product
- [44] Sancho Sotelo, J. L. (2002). Secado. Cartagena99. https://www.cartagena99.com/recursos/tuneapdf/index.php?archivo=alumnos/apuntes/SECADO_pdf.pdf
- [45] Sanz, V. (2021). Notas de *EQ 1033 Operaciones Básicas de Tratamiento de Sólidos*. UJI.
- [46] Segarra, C., Cervantes, E., García-Ten, F. J., & Quereda, M. F. (2014). Influencia de algunas variables de operación sobre las características de gránulos obtenidos en una granuladora de alta cizalla. Qualicer.
- [47] Segarra, C., Quereda, M. F., Escrig, P., & Saburit, A. (2014). *Estrategias para una industria cerámica hipocarbónica. Granulación vía seca*. Qualicer.

- [48] Sinnott, R., & Towler, G. (2012). *Diseño en Ingeniería Química* · Serie de Ingeniería Química Coulson & Richardson (Edición en español, 5 ed.). Editorial Reverté.
- [49] SODECA. (2022). SODECA. *Fabricante de ventiladores y extractores industriales*. CMP. <https://www.sodeca.com/es/>
- [50] Tencante, A. (2018). FUNDAMENTOS DE SECADO, EXTRACCION SOLIDO · PDF file FUNDAMENTOS DE SECADO, EXTRACCION SOLIDO-LIQUIDO Y DESTILACION: A. TECANTE 3 Análisis de la operación y algunos criterios de diseño. fdocuments.es. <https://fdocuments.es/document/fu>
- [51] Z. ul- Islam, R. Dhib, and Y. Dahman, “*Modeling of Infrared Drying of Polymer Solutions*,” *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 5, no. 1, 2010, doi: 10.2202/1934-2659.1488.

3. ANEXOS

ÍNDICE ANEXOS

1.	SELECCIÓN DE SILOS DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA	3
2.	ELECCIÓN DEL TANQUE AGITADO PARA LA DISOLUCIÓN DE CMC EN AGUA.....	5
3.	FICHAS TÉCNICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS	6
4.	CARACTERIZACIÓN DE LOS GRÁNULOS.....	13
5.	CÁLCULO DEL ESCALADO Y CONSUMO DE LA GRANULADORA.....	17
6.	ELECCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SECADERO	24
7.	SELECCIÓN DEL VIBRO TAMIZ DE SEPARACIÓN DE GRÁNULOS.....	27
8.	DIMENSIONADO DEL SILO DE DESCARGA	29
9.	DISEÑO DEL HORNO DE FUSIÓN VERTICAL	32
9.1.	Cámara de calentamiento – pérdidas de calor y dimensionado	32
9.2.	Cámara de calentamiento – tiempo de permanencia y calentamiento del gránulo	39
9.3.	Cámara de enfriamiento – enfriamiento y dimensionado	44
9.4.	Cámara de enfriamiento – calor a disipar	50
10.	CÁLCULO TEÓRICO DE LAS PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	53

1. SELECCIÓN DE SILOS DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA

Se quiere cubrir la necesidad de como mínimo veinte días de producción para almacenar las materias primas pulverulentas. Para ello son necesarios siete silos, uno para cada materia prima. Atendiendo a la masa de materia prima diaria necesaria y a la densidad aparente que proporcionan las Fichas Técnicas del apartado 3 de los *Anexos* del material a granular, es posible conocer la capacidad mínima de los silos.

Para llegar a abastecer el caudal de 75 kg/h la compra anual de materia prima pulverulenta debe de ser de 1.123.748 kg totales.

Se muestra en la Tabla A. 1.1 la demanda de materia prima y la capacidad de los silos.

Tabla A. 1.1. Silos de almacenamiento de materias primas pulverulentas.

Materia Prima	Consumo diario (kg)	Consumo en 20 días (kg)	ρ_{ap} materias primas (kg/m ³)	Volumen mínimo (m ³)	Volumen silo (m ³)
Cuarzo	986	19.724	1000	19,7	21
Feldespató Potásico	849	16.974	2600	6,5	7,5
Carbonato Cálcico	268	5.367	2700	2,0	6
Silicato de Circonio	235	4.696	4700	1,0	6
Dolomita	366	7.313	1500	4,9	6
Colemanita	349	6.977	2500	2,8	6
Caolín	302	6.038	1600	5,2	6

Por lo que se decide comprar 7 silos de la casa *Bupolsa* [32]. Concretamente 5 unidades del modelo *Babyrac*, un *Eurosilo* de 7,5 m³ y un *Eurosilo* de 21 m³. El material de construcción es poliéster y fibra de vidrio. Las características se muestran a continuación en la Figura A. 1.1.



Figura A. 1.1 Silos de almacenamiento Bupolsa. [32]

Las dimensiones de los silos se detallan en la Tabla A. 1.2.

Tabla A. 1.2. Dimensiones de los silos de almacenamiento de materia prima. [32]

	Ds (m)	Hs (m)
Babyrac – 6 m³	2,33	3,84
Eurosilo – 7,5 m³	1,86	4,83
Eurosilo 21 m³	2,37	7,07

2. ELECCIÓN DEL TANQUE AGITADO PARA LA DISOLUCIÓN DE CMC EN AGUA.

Cada vez que se granula, atendiendo a los datos de la Tabla 7.3, se utiliza un 0,5 % en peso en ligante y un 12 % en peso de H₂O respecto a la carga de material pulverulento. Esto significa, preparar una disolución en agua al 4 % en peso de CMC.

Para granular 213,34 kg de material pulverulento son necesarios 25,6 kg de H₂O y 1,067 kg de CMC. Se midió la densidad de dicha disolución y resultó tener un valor de 1 kg/L.

Para dosificar la disolución a la granuladora se necesita un tanque agitado de 27 L como mínimo. Se ha seleccionado un tanque agitado de 35 L de la marca comercial *Prenitor Inoxidables* [42] cuyos requerimientos de trabajo son:

- Temperatura de trabajo: hasta 90 °C.
- Presión atmosférica.
- 35 L de volumen útil.
- Densidad máxima del proceso, 1,1 kg/m³.

Por lo que el modelo se ajusta a los requerimientos del proceso.

El equipo está hecho con acero inoxidable AISI-316L y trabaja en un rango de operación de 100 rpm – 400 rpm, con un variador de frecuencia, consumiendo una potencia eléctrica de 0,25 kW.

La entrada de material es superior y la de salida es por el inferior por un conducto. La agitación es con una pala de tipo doble hélice.

El conducto lleva a un pulverizador que dosifica el caudal necesario a la granuladora.

3. FICHAS TÉCNICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las fichas técnicas de las materias primas a granular (Figura A. 3.1, Figura A. 3.2, Figura A. 3.3, Figura A. 3.4, Figura A. 3.5, Figura A. 3.6) han sido proporcionadas por una empresa privada.

Producto: Cuarzo		
Product:		Quartz
Análisis Químico (%)		
Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Oxido de silicio Silicon Oxide	SiO ₂	99,0
Óxido de alumina Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃	0,60
Óxido de Hierro Iron oxide.	Fe ₂ O ₃	0,03
Óxido de titanio Titanium oxide	TiO ₂	0,02
Óxido de potasio Potassium oxide	K ₂ O	0,10
Óxido de magnesio Magnesium oxide	MgO	0,01
Óxido de sodio Sodium oxide	Na ₂ O	0,01
Pérdida por calcinación Loss on ignition		0,23
Caracterización Químico Física		
Physic - Chemical Characterisation		
Aspecto: Appearance:		Blanco White
Residuo sobre tamiz 40 μ Residue on sieve:		35 %
Densidad aparente: Bulk density:		1 gr/cc
Dureza (escala Mohs) Hardness (Mohs Scale)		7
Otras informaciones.		
Other informations.		
Nº CAS: 68476-25-5		Nº EINECS: 270-666-7
TOXICIDAD: Toxicity:	NO None	
ECOTOXICIDAD: Ecotoxicity:	NO None	

Figura A. 3.1. Ficha técnica Cuarzo.

Producto: Feldespato Potásico Mixto		
Product:		Potassium Feldspar
Análisis Químico (%)		
Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Oxido de silicio Silicon Oxide	SiO ₂	68,0
Oxido de alumina Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃	17,2
Oxido de potasio Potassium oxide	K ₂ O	11,0
Oxido de sodio Sodium oxide	Na ₂ O	2,3
Oxido de Hierro Iron oxide.	Fe ₂ O ₃	0,15
Oxido de titanio Titanium oxide	TiO ₂	0,04
Pérdida por calcinación Loss on ignition		0,4
Caracterización Químico Física		
Physic – Chemical Characterisation		
Aspecto: Appearance:	Polvo amarillento Yellowish dust.	
Residuo sobre tamiz 45 µ Residue on sieve:	28 – 40 %	
Densidad relativa: Relative density:	2,6	
Temperatura de fusión: Melting point.	1.100 °C	
Otras informaciones.		
Other informations.		
N° CAS: 68476-25-5		N° EINECS: 270-666-7
TOXICIDAD: Toxicity:	NO None	
ECOTOXICIDAD: Ecotoxicity:	NO None	

Figura A. 3.2 Ficha técnica Feldespato Potásico.

Producto: Carbonato cálcico		
Product:	Calcium carbonate	
Análisis Químico (%)		
Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Óxido de calcio Calcium oxide	CaO	56
Óxido de silicio Silicon Oxide	SiO ₂	0,4
Óxido de alumina Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃	0,2
Óxido de Hierro Iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,06
Óxido de Magnesio Magnesium oxide	MgO	0,2
Pérdida por calcinación Loss on ignition		43,2
Caracterización Químico Física		
Physic – Chemical Characterisation		
Aspecto: Appearance:	Polvo amarillento Yellowish dust.	
Densidad relativa: Relative density:	2,7 -2,9	
Tamaño medio de partícula Average particle size	5 – 12 µm	
Temperatura de fusión: Melting temperature.	825 °C	
Otras informaciones.		
Other informations.		
Nº CAS: 471-34-1	Nº EINECS: 207-439-9	
TOXICIDAD: Toxicity:	NO None	
ECOTOXICIDAD: Ecotoxicity:	NO None	

Figura A. 3.3 Ficha Técnica Carbonato Cálcico.

Producto: Harina de Zirconio		
Product:	Zircon Flour	
Análisis Químico (%)		
Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Oxido de zirconio Zirconium Oxide	ZrO ₂	64,8
Oxido de silicio Silicon Oxide	SiO ₂	32,8
Oxido de alúmina Aluminum oxide	Al ₂ O ₃	0,2
Oxido de Hierro Iron oxide	Fe ₂ O ₃	0,07
Oxido de titanio Titanium oxide	TiO ₂	0,22
Oxido de calcio Calcium Oxide	CaO	0,12
Oxido de hafnio Hafnium Oxide	HfO ₂	1,30
Fósforo Phosphorus	P	0,13
Ytrio Yttrium	I	0,14
Caracterización Químico Física		
Physic - Chemical Characterisation		
Aspecto: Appearance:	Polvo amarillento Yellowish dust	
Densidad relativa: Relative density:	4,7	
Residuo sobre tamiz 45 µm Residue on sieve of 45 µm	3,5 %	
Punto de fusión Melting point:	2.200 °C	
Otras informaciones.		
Other informations.		
Nº CAS:	239-019-6	Nº EINECS: 14940-68-2
TOXICIDAD: Toxicity:	NO None	
ECOTOXICIDAD: Ecotoxicity:	NO None	

Figura A. 3.4. Ficha Técnica Silicato de Zirconio Micronizado.

Producto: Dolomita micronizada

Product: Micronized Dolomite

Análisis Químico (%) Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Calcio Calcium	CaO	30,0
Magnesio Magnesium	MgO	21,0
Silicio Silicon	SiO ₂	0,5
Aluminio Aluminum	Al ₂ O ₃	0,6
Hierro Iron	Fe ₂ O ₃	0,1
Pérdida por calcinación. Loss on ignition		48,0

Caracterización Químico Física Physic – Chemical Characterisation	
Aspecto: Appearance:	polvo blanco white dust.
Densidad aparente: Apparent density:	1,5 g/cm ³
Temperatura de fusión: Melting temperature:	1.340 °C
Tamaño medio de partícula Average particle size.	D ₉₀ ≤ 20 µm D ₅₀ ≤ 7 µm

Otras informaciones. Other informations.		
Nº CAS:	16389-88-1	Nº EINECS: 240-440-2
TOXICIDAD: Toxicity:	NO None.	
ECOTOXICIDAD: Ecotoxicity:	NO None.	

Figura A. 3.5 Ficha Técnica Dolomita.

Producto: Colemanita		
Product:		Colemanite
Análisis Químico (%)		
Chemical Analysis (%)		
		Valor típico Typical value
Óxido de boro. Boron oxide	B ₂ O ₃	39
Óxido de calcio Calcium oxide	CaO	23,6
Óxido de silicio Silicium oxide	SiO ₂	8
Oxido de magnesio Magnesium oxide	MgO	3
Azufre Sulphur	S	0,3
Arsenico Arsenic	As ₂ O ₃	0,4
Estroncio Strontium	Sr	1,2
Caracterización Físico Química		
Physic - Chemical Characterisation		
Humedad: Moisten	< 1,0 %	
Impurezas: Magnesizable:	< 1.500 ppm	
Análisis granulométrico		
Granulometric analysis.		
	% Rechazo acumulado Accumulated residue %	
75 um	3,5 ± 2,0	
45 um	3,5 ± 2,0	
Otras informaciones.		
Other informations.		
Nº CAS:	Nº EINECS: 233-139-2	
TOXICIDAD:	NO	
Toxicity:	None.	
ECOTOXICIDAD:	NO	
Ecotoxicity:	None.	

Figura A. 3.6. Ficha Técnica Colemanita.



ADICEL C-50 / P
Carboximetilcelulosa sódica de alta pureza

PROPIEDADES

ADICEL C-50 / P produce soluciones acuosas, transparentes y viscosas sin que se forme gran cantidad de espuma. Está indicado como ligante y regulador de la viscosidad en esmaltes y engobes, favoreciendo la adición e impidiendo el retiro en esmaltes y engobes. Aumenta la resistencia en crudo.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

ASPECTO:	Polvo
CONTENIDO EN CMC:	> 99%
GRADO DE SUSTITUCIÓN:	0.60-0.85
VISCOSIDAD (sol.2%):	150 - 350 cp (a 20°C)
pH (sol.2%):	6 - 8 (a 20°C)

APLICACIONES

En función de sus propiedades ligantes, aumenta la adherencia del esmalte y su fijación al soporte, además regula la viscosidad y confiere al esmalte y engobe unas características ideales de escurrimiento.

MODO DE EMPLEO

ADICEL C-50 / P puede adicionarse directamente al molino, durante la última fase de la molturación o bien, de forma sucesiva, utilizando una solución acuosa del 2,5%.

DOSIFICACIÓN

Para esmaltes la dosis varía entre 0'05 y el 1% calculado sobre seco.

PRESENTACIÓN Y ALMACENAJE

En sacos de 25 Kg. El producto es estable a un almacenaje prolongado en condiciones normales.

Nota informativa. ADITIVOS CERAMICOS, S.L. certifica que los datos contenidos en esta ficha técnica son ciertos, pero advierte que las condiciones de aplicación del producto pueden variar dependiendo de la naturaleza y composición de los productos junto con los cuales se utiliza. Es responsabilidad del receptor de nuestros productos observar las reglamentaciones y normativas correspondientes. Esta ficha anula otras revisiones de fecha anterior.

REV.01.Fecha revisión Enero 2016.
Pág. 1 de 1

Figura A. 3.7. Ficha técnica Carboximetilcelulosa. [2].

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS GRÁNULOS

Se muestra primeramente en la Tabla A. 4.1 la distribución de tamaño de gránulos que se obtuvo de los ensayos con la granuladora EIRICH RV02, cuyo diagrama de barras está representado en la Figura 7.1 de la *Memoria*.

Tabla A. 4.1. Distribución de tamaño de gránulo de los ensayos con la granuladora EIRICH RV02. Tamaño de gránulo son los extremos del intervalo que delimita cada clase. En las celdas, el % en peso de dicha cantidad.

Tamaño de gránulo (μm)	1	4.1	4.2	5.1	5.2
1	4,57	39,82	44,65	46,91	31,02
100	1,97	32,89	26,57	32,79	48,35
200	6,62	13,00	10,25	7,43	9,98
300	43,78	8,30	10,07	7,27	6,63
500	31,53	3,47	5,49	3,82	2,87
710	11,70	2,52	2,97	1,78	1,16

El ensayo que se elige como condiciones iniciales para la operación de granulación es el 4.1 porque, de entre todos, es el que maximiza la producción de gránulos de la fracción de interés 100 μm - 300 μm .

La distribución de tamaño de gránulo de la que era la fracción de interés 100 μm - 300 μm analizada por difracción láser en vía seca se sometió a un ajuste con la ecuación empírica de Rossin-Rammler-Sperling. Se seleccionaron los valores comprendidos entre la fracción de interés que se ajustaban a la recta. Además, se sabe que esta ecuación empírica no ajusta bien los extremos. La primera columna de la Tabla A. 4.2 es el diámetro volumétrico, la segunda columna, F, es la fracción volumétrica que tiene un diámetro inferior a D_i . F' es la resta de 100 – F expresada en tanto por uno y las dos siguientes columnas son lo que se representa en el eje de coordenadas y abscisas para ajustar a la Ecuación 2.

Tabla A. 4.2. Distribución acumulada de tamaño de gránulo de la fracción de interés por Difracción Láser.

D (μm)	F (100)	F' = 100-F	LOG (D)	LOG(LN(1/F'))
400	100	0		
352	99,16	0,0084	2,5465	0,6793
310	95,97	0,0403	2,4914	0,5066
272	90,42	0,0958	2,4346	0,3702
240	82,18	0,1782	2,3802	0,2368
211	72,10	0,2790	2,3243	0,1060
186	60,34	0,3966	2,2695	-0,0340
163	48,24	0,5176	2,2122	-0,1815
144	36,30	0,6370	2,1584	-0,3458
127	25,21	0,7479	2,1038	-0,5369
111	15,46	0,8454	2,0453	-0,7748
98,1	7,06	0,9294	1,9917	-1,1355
86,4	0	1	1,9365	

Al ajustar los valores sombreados de la Tabla A. 4.2 a una recta (las dos últimas columnas), se obtiene el ajuste que se muestra en la Figura A. 4.1.

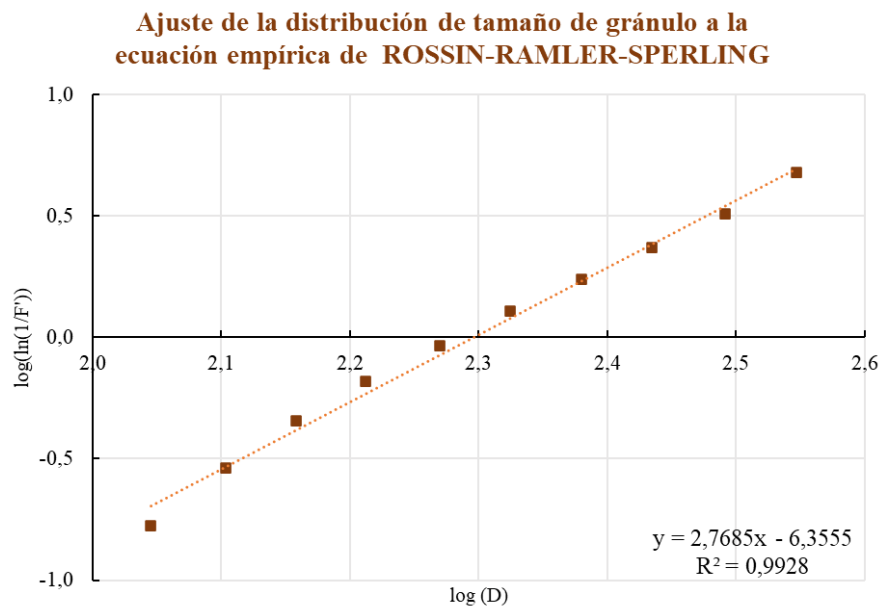


Figura A. 4.1. Ajuste de la distribución de tamaños de gránulo.

De la ecuación de la recta de la Figura A. 4.1 se pueden obtener los parámetros característicos del modelo, p y D_R , según la Ecuación 2.

$$p = \text{pendiente de la recta de ajuste} = 2,7685$$

$$-p \cdot \log D_R = -6,3555$$

$$\log D_R = \frac{-6,3555}{-2,7685}$$

$$D_R = 10^{\frac{-6,3555}{-2,7685}} = 197,54 \mu m = 1,9754 \cdot 10^{-4} m$$

Con el ensayo del Índice de Hausner se ha determinado la fluidez y calculado la densidad de los gránulos. Se llenó una probeta de 14,22 cm³ de gránulos con un tamaño de gránulo comprendido entre 100 μm- 300 μm y se midió su masa, siendo esta 13,69 g. A continuación, se vibró y quedaron la misma cantidad de gránulos empaquetados en un volumen de 13,32 cm³. Con estos datos se puede calcular la densidad inicial del lecho como:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} = \frac{13,69 (g)}{14,22 (cm^3)} = 0,96 \left(\frac{kg}{L}\right)$$

Tras la vibración se obtuvo una densidad final de:

$$\rho_f = \frac{m_0}{V_f} = \frac{13,69 (g)}{13,32 (cm^3)} = 1,03 \left(\frac{kg}{L}\right)$$

Con la Ecuación 8 y esos datos se puede calcular el Índice de Hausner:

$$IH = \frac{1,03 \frac{g}{cm^3}}{0,96 \frac{g}{cm^3}} = 1,07$$

Para calcular la densidad del lecho se rellenó hasta que ya no podían cabían más gránulos. La masa final de gránulos en la probeta fue de 15,30 g. Por lo que la densidad del lecho o densidad aparente es:

$$\rho_{ap} = \frac{m_f}{V_0} = \frac{15,30 (g)}{14,22 (cm^3)} = 1,08 \left(\frac{kg}{L}\right)$$

Considerando el empaquetamiento del 60 %, se puede calcular la densidad real de los gránulos :

$$\rho_g = \frac{m_f}{V_0 \cdot 0,6} = \frac{15,30 (g)}{14,22 \cdot 0,6 (cm^3)} = 1,79 \left(\frac{kg}{L}\right)$$

A partir de la densidad y diámetro del gránulo esférico se han podido calcular el resto de las características con la Ecuación 3, Ecuación 4, Ecuación 5, Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$r_g = \frac{1}{2} \cdot 1,9754 \cdot 10^{-4} = 9,877 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$V_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (9,877 \cdot 10^{-5})^3 = 4,036 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3$$

$$m_g = 1,79 \cdot 4,036 \cdot 10^{-12} = 7,225 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

$$A_{sg} = 4 \cdot \pi \cdot (9,877 \cdot 10^{-5})^2 = 1,226 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$L_{cg} = \frac{1}{3} \cdot 9,877 \cdot 10^{-5} = 3,292 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

5. CÁLCULO DEL ESCALADO Y CONSUMO DE LA GRANULADORA.

Producir 500.000 kg/año- 600.000 kg/año, supone una producción diaria de :

$$600.000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cong 1800 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 75 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Si se toman 335 días laborables anuales. Se debe considerar que se granulará una vez cada hora, ya que esta etapa del proceso no es la limitante ni se quiere un equipo sobredimensionado.

De los ensayos de granulación se sabe que para una carga de 1,687 kg se pierde por las paredes 0,437 kg. Si se carga la cuba de la granuladora con la carga máxima que son 12 kg, se añadiría la carga que se muestra en la Tabla A. 5.1.

Tabla A. 5.1 Carga de la granuladora EIRICH RV02 si se ensaya al máximo de capacidad, 12 kg.

Materia prima	Carga (kg)
Material pulverulento	10,667
CMC	0,0533
H ₂ O	1,28

La cuba tiene un diámetro de $D_{c1} = 0,43$ m y una altura de $H_{c1} = 0,27$ m.

La rasqueta, situada en la parte lateral de la cuba de la granuladora EIRICH RV02 deja una masa de 437 g de material pegado a la pared. Si se considera una densidad aparente de todo el material pulverulento pegado de $1,5 \text{ g/cm}^3$.

$$0,437 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1500 \text{ kg}} = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Se puede calcular el volumen de la cuba 1.

$$\text{Volumen cuba 1} = \frac{\pi}{4} \cdot 0,43^2 \cdot 0,27 = 0,039 \text{ m}^3$$

Si se resta el volumen pegado, se podrá conocer el diámetro que eso genera (D'_1) y al restarlo al diámetro interno de la cuba, la distancia a la que está la rasqueta o lo que es lo mismo, el espesor de la capa pegada.

$$0,039 - 2,91 \cdot 10^{-4} = \frac{\pi}{4} \cdot (D'_1)^2 \cdot 0,27 \rightarrow D'_1 = 0,4272 \text{ m}$$

Es decir, la rasqueta está a una distancia de $0,43 - 0,4272 = 0,00275 \text{ m} = 0,275 \text{ cm}$.

Al incrementar la carga de la cuba no se incrementa el material pulverulento húmedo que se pierde en las paredes (la rasqueta está en la misma posición), por lo que se aumenta el rendimiento de la operación.

$$\frac{(12 - 0,437) \text{ kg}}{12 \text{ kg}} = 0,9635 = 96,35 \% \text{ de material granulado}$$

Al cargar la cuba con 12 kg de material, se obtienen 11,5625 kg de gránulos húmedos con 0,112 kg H₂O/kg gránulo. Al aumentar el porcentaje de material granulado, aumentan también los porcentajes de gránulos de cada tamaño. Si se elimina toda el agua, se quedan 10,40 kg de gránulos secos. Los datos de la referencia de la Tabla 7.5 de la *Memoria* son válidos al estar expresados en porcentaje. Para la nueva cantidad de gránulos, se calcula la cantidad másica que corresponde a cada fracción :

- 3,40 kg de gránulos con un tamaño $> 300 \mu\text{m}$.
- 3,77 kg de gránulos con un tamaño entre $100 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$.
- 3,24 kg de gránulos con un tamaño $< 100 \mu\text{m}$ o pulverulento.

Es decir, si se cargase la granuladora EIRICH RV02 a su máxima capacidad, 12 kg, se obtendrían 3,77 kg de gránulos de la fracción de interés. Si la producción, como ya se ha comentado, debe de ser de 75 kg/h y teniendo en cuenta que se granulará una vez a la hora, se necesita una granuladora con una capacidad mayor a la actual, tanto como :

$$\frac{75 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ necesarios}}{3,77 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ actuales}} = 19,89 \cong 20$$

Se necesita un equipo con una capacidad 19,89 veces a la actual para producir con exactitud. Como se quiere tener un mínimo margen se decide escalar la granuladora a una 20 veces mayor, que se corresponden a 240 kg de capacidad en la cuba. Atendiendo a estos valores, se calcula que es necesaria una granuladora de alta cizalla en discontinuo con una capacidad de cuba de 150 L con una carga máxima de 240 kg (20 veces mayor a la actual) para cubrir la demanda de producción de 75 kg/h de gránulos con un tamaño entre $100 \mu\text{m}$ – $300 \mu\text{m}$.

Atendiendo a los datos de la Tabla A. 5.1, para cargar 240 kg de material se necesitan 213,34 kg de material pulverulento, 25,60 kg de agua y 1,07 kg de CMC.

Se demuestra a continuación que si se multiplica el rendimiento de la operación de granulación, se elimina el agua y se selecciona el % de fracción de interés:

$$240 \text{ kg} \cdot 0,9635 = 231,24 \text{ kg gránulos húmedos}$$

Y con los datos de la Tabla 7.5:

$$207,95 \cdot 0,9 \cdot 0,3621 = 75,36 \text{ kg gránulos secos de la fracción de interés}$$

Se obtienen 75,36 kg de gránulos secos de la fracción de interés.

La cuba de la granuladora escalada tendrá un diámetro de $D_{c2} = 0,9 \text{ m}$ y una altura de $H_{c2} = 0,54 \text{ m}$, mientras que el rotor seguirá la proporcionalidad del diseño anterior, esto supone un diámetro de $D_{r2} = 0,26 \text{ m}$.

La rasqueta tendrá forma de L para eliminar también el material pegado de la base de la cuba. Haciendo el cálculo análogo a la granuladora EIRICH RV02:

- Pérdidas de material por la pared

$$240 \text{ kg} \cdot (1 - 0,9635) \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1500 \text{ kg}} = 5,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

- Volumen de la cuba

$$\text{Volumen cuba 2} = \frac{\pi}{4} \cdot 0,9^2 \cdot 0,54 = 0,344 \text{ m}^3$$

Si se resta el volumen pegado y se mantiene la proporcionalidad, se podrá conocer el diámetro que eso genera (D'_{c2}) y la altura (H'_{c2}).

$$0,344 - 5,84 \cdot 10^{-3} = \frac{\pi}{4} \cdot (D'_{c2})^2 \cdot H'_{c2}$$

$$\frac{0,9}{0,54} = \frac{D'_{c2}}{H'_{c2}}$$

Resolviendo se obtienen unos valores de:

$$D'_{c2} = 0,895 \text{ m}$$

$$H'_{c2} = 0,537 \text{ m}$$

Por lo que la distancia de la rasqueta desde el suelo y desde la pared de la granuladora escalada son:

Desde la pared lateral: $\frac{0,9-0,895}{2} = 0,0025 \text{ m}$

Desde el suelo: $0,54 - 0,537 = 0,003 \text{ m}$

Los datos necesarios para calcular el escalado de la cuba y del rotor de la nueva granuladora son los de la Tabla A. 5.2.

Tabla A. 5.2. Datos para el cálculo de escalado de la granuladora.

	Granuladora 1	Granuladora 2
D_c (m)	0,43	0,9
n_c (min⁻¹)	42	-
D_r (m)	0,13	0,26
n_r (min⁻¹)	2500/5000	-
Capacidad (L)	10	150
Carga máxima (kg)	12	240

Con los datos de la Tabla A. 5.2 y la Ecuación 11 y Ecuación 12 se puede calcular la velocidad angular de la cuba y el rotor.

Para la cuba:

$$v_{c1} = \frac{\pi \cdot 0,43 \cdot 42}{60} = 0,9456 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Considerando que debe ser constante la velocidad periférica, $v_{c1} = v_{c2}$.

$$n_{c2} = \frac{0,9456 \cdot 60}{\pi \cdot 0,9} = 20,07 \text{ min}^{-1}$$

Para el rotor, que puede girar a 2500 rpm (moderada) y 5000 rpm (elevada):

$$v_{r1m} = \frac{\pi \cdot 0,13 \cdot 2500}{60} = 17,02 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Considerando que debe ser de nuevo constante la velocidad periférica, $v_{r1m} = v_{r2m}$.

$$n_{r2m} = \frac{17,02 \cdot 60}{\pi \cdot 0,26} = 1250 \text{ min}^{-1}$$

Del mismo modo a velocidad elevada:

$$v_{r1e} = \frac{\pi \cdot 0,13 \cdot 2500}{60} = 34,03 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Considerando que debe ser de nuevo constante la velocidad periférica, $v_{r1e} = v_{r2e}$.

$$n_{r2e} = \frac{34,03 \cdot 60}{\pi \cdot 0,26} = 2500 \text{ min}^{-1}$$

Para conseguir estos giros se han seleccionado dos motores de la marca *AEG Electric Motors*. Concretamente el modelo AM 160M XA de 3000 rpm y 15 kW de potencia y el modelo AM 132M ZA de 750 rpm y 3 kW. Estas características se muestran en la Figura A. 5.1.

Motores de rendimiento normal - EFF2													Calentamiento clase B				
Cálculo de rendimiento estándar IEC 60034-2; 1996																	
Tipo	kW	HP	min ⁻¹	M _N Nm	EFF2 η			cos φ	I _N 400V 380-420V		I _N /I _N	M _v /M _N	M _j /M _N	M _r /M _N	J 10 ⁴ kgm ²	kg	
					50%	75%	100%										
3000 min⁻¹ (2 polos)																	
AM 56Z AA	2	0.09	0.12	2810	0.3	49	53	59	0.67	0.35	0.40	3.9	3.8	3.8	3.9	0.09	3.4
AM 56Z BA	2	0.12	0.16	2800	0.4	51	56	62	0.68	0.40	0.45	3.5	3.4	3.4	3.5	0.1	3.5
AM 63Z AA	2	0.18	0.25	2790	0.6	54	58	63	0.73	0.60	0.65	3.7	3.0	3.0	3.1	0.14	3.6
AM 63Z BA	2	0.25	0.33	2790	0.9	57	62	68	0.70	0.80	0.75	4.5	3.2	3.2	3.3	0.17	4.1
AM 63Z CA	2*	0.37	0.50	2800	1.3	54	58	65	0.70	1.20	1.25	4.6	3.4	3.3	3.4	0.20	4.4
AM 71Z AA	2	0.37	0.50	2820	1.3	58	64	70	0.78	1.0	1.2	4.7	3.6	3.4	3.6	0.36	5.8
AM 71Z BA	2	0.55	0.75	2830	1.9	57	64	71	0.77	1.5	1.6	4.8	3.2	3.1	3.3	0.42	6.2
AM 71Z CA	2*	0.75	1.0	2800	2.6	60	67	74	0.77	1.9	2.0	5.2	3.1	3.2	3.1	0.61	7.2
AM 80Z AA	2	0.75	1.0	2840	2.5	67.7	73.0	74.5	0.78	1.9	2.0	5.0	2.8	2.8	2.9	0.75	8.4
AM 80Z BA	2	1.1	1.5	2810	3.7	74.3	77.3	77.6	0.82	2.5	2.6	4.6	2.4	2.8	2.9	0.89	9.5
AM 80Z CA	2*	1.5	2.0	2825	5.1	76.5	79.4	79.1	0.83	3.3	3.4	5.0	2.9	3.0	3.3	1.05	11.1
AM 90S AA	2	1.5	2.0	2830	5.1	75.4	78.4	78.6	0.82	3.4	3.5	5.0	3.1	2.9	3.0	1.37	12.7
AM 90S BA	2*	1.8	2.5	2805	6.1	75.2	78.3	78.5	0.80	4.2	4.3	4.5	2.6	2.4	2.5	1.37	12.7
AM 90L CA	2	2.2	3.0	2860	7.3	78.6	81.4	81.8	0.81	4.9	4.9	7.1	4.1	3.6	4.0	1.8	16.0
AM 90L DA	2*	3	4.0	2860	10.0	78.8	81.9	82.3	0.80	6.5	6.8	7.2	3.9	3.4	3.8	2.09	18.7
AM 100L AA	2	3	4.0	2860	10.0	81.7	82.2	82.6	0.85	6.4	6.7	6.0	3.1	3.1	3.3	2.80	19.3
AM 100L BA	2*	4	5.5	2835	13.5	82.4	83.8	83.0	0.88	8.0	8.1	6.2	2.9	2.5	2.9	3.35	19.7
AM 100L CA	2*	5.5	7.5	2865	18.3	83.5	85.3	85.0	0.85	10.8	11.0	7.2	3.5	3.4	4.1	4.5	25.9
AM 112M AA	2	4	5.5	2880	13.3	80.9	84.2	85.0	0.82	8.3	8.7	8.0	3.4	3.5	3.6	5.20	24.3
AM 112M BA	2*	5.5	7.5	2900	18.1	85.6	86.7	87.0	0.85	10.8	11.2	7.7	3.5	3.4	3.6	6.48	27.4
AM 112M CA	2*	7.5	10	2900	24.7	86.8	88	88	0.87	14.3	14.8	8.7	4	3.9	4.0	8.58	33.6
AM 132S YA	2	5.5	7.5	2890	18.2	84.7	86.2	86.5	0.82	11.3	11.4	6.0	2.2	2.1	2.3	10.63	37.0
AM 132S ZA	2	7.5	10.0	2880	24.9	86.5	87.6	87.0	0.87	14.3	14.9	6.4	2.9	2.7	3.1	13.83	42.6
AM 132M ZA	2*	9.2	12.5	2900	30.3	84.5	86.6	86.7	0.84	18.4	19.5	7.0	2.8	2.4	3.2	15.00	48.0
AM 132M RA	2*	11	15.0	2880	36.5	88.2	89.2	88.7	0.84	21.3	21.7	6.9	3.2	2.8	3.8	17.13	52.5
AM 132M TA	2*	15	20.0	2920	49.1	88.0	89.0	89.1	0.82	29.5	30.5	7.0	3.2	2.8	3.7	20.30	59.0
AM 160M VA	2	11	15	2940	35.7	86.4	88.3	88.4	0.82	21.9	22.7	7.4	2.5	2.3	3.1	40.00	77.0
AM 160M XA	2	15	20	2940	48.1	87.8	89.4	89.4	0.85	28.5	29.6	8.1	3.1	2.6	3.7	51.75	94.0
AM 160L XA	2	18.5	25	2950	59.9	88.6	90.1	90.0	0.87	34.1	34.8	8.5	3.6	3.0	4.2	64.00	107.8
AM 160L RA	2*	22	30	2940	71.5	88.8	90.6	90.5	0.90	39.0	39.1	8.4	3.0	2.6	3.7	64.00	108.7

Cálculo de rendimiento estándar IEC 60034-2; 1996													Calentamiento clase B				
Tipo	kW	HP	min ⁻¹	M _N Nm	η			cos φ	I _N 400V 380-420V		I _N /I _N	M _v /M _N	M _j /M _N	M _r /M _N	J 10 ⁴ kgm ²	kg	
					50%	75%	100%										
750 min⁻¹ (8 polos)																	
AM 71Z AA	8	0.12	0.16	670	1.7	40	44	50	0.55	0.65	0.7	2.4	2.5	2.4	2.5	0.82	6.0
AM 80Z AA	8	0.25	0.33	680	3.5	40	47	51	0.62	1.1	1.2	2.2	1.8	1.9	2.0	1.97	8.0
AM 90S AA	8	0.37	0.50	680	5.2	52	58	59	0.53	1.7	1.8	2.1	1.4	1.3	1.6	3.18	11.4
AM 90L BA	8	0.55	0.75	680	7.7	52	58	59	0.54	2.5	2.7	2.1	1.4	1.3	1.6	4.78	15.0
AM 100L AA	8	0.75	1.0	690	10.4	59	64	65	0.65	2.6	2.8	3.0	1.6	1.5	1.7	6.72	17.6
AM 100L BA	8	1.1	1.5	690	15.2	59	67	68	0.62	3.9	4.0	3.0	1.9	1.3	1.6	15.93	22.6
AM 112M AA	8	1.5	2.0	696	20.6	66	69	70	0.66	4.6	4.8	4.0	1.8	2.0	2.4	16.70	35.0
AM 132S ZA	8	2.2	3.0	710	29.6	79.3	80.5	78.8	0.63	6.4	6.6	3.4	1.7	1.6	1.7	29.50	45.5
AM 132M ZA	8	3.0	4.0	710	40.4	81.3	82.0	79.8	0.67	8.1	8.4	3.6	1.7	1.6	1.9	37.75	54.9

Figura A. 5.1. Características de los motores de la granuladora. Arriba el motor seleccionado (en azul) para el rotor y abajo (en azul) el motor seleccionado para la cuba. [4].

Tal y como se ha descrito, la cuba trabaja 5 min a la hora, que se refieren a 4 min de operación y 1 min de limpieza. Como a cada granulación se tiene un excedente para cubrir la demanda de los hornos de 75 kg/h, se puede calcular las veces necesarias que se deberá granular anualmente.

De forma ideal sería:

$$24 \text{ veces al día} \cdot 335 \text{ días de trabajo} = 8040 \text{ operaciones de granulación al año}$$

Si a estas le eliminamos lo que corresponde el excedente de gránulos producidos (39 veces), se puede conocer que se necesitará granular 8001 veces.

$$8001 \frac{\text{operaciones}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{min}}{\text{operación}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 666,78 \text{ horas}$$

Lo que supone un trabajo anual de 666,78 horas.

Para reducir la velocidad de giro hasta las 21 rpm se ha seleccionado un motorreductor de la marca *ADAJUSA* [1], con las características de la Figura A. 5.2, con una relación de reducción de 30.

**REDUCTOR SIN FIN CORONA
TAMAÑO 75 BRIDA PAM
200/19 - MOTOR CARCASA
80 B5**

Con eje de salida hueco de Ø28mm, y brida de entrada PAM 200/19 (Ø Ext 200mm y Ø Eje entrada 19mm) tipo B5, adecuada para motores con carcasa tamaño 80.

Relaciones de reducción: 25-30-40-50-60-80-100.

Tipo	Reductor
Tipo de reductor	Sinfin corona
Tamaño reductor	T-75
Diámetro eje entrada	19 mm
Diámetro brida motor	200 mm
Diámetro salida	28 mm

Figura A. 5.2. Características técnicas del motorreductor.[1]

Del mismo modo para el motor del rotor, que trabaja 4 min a la hora, siendo esto 533,43 horas, para el motor de 15 kW de potencia, esto es un consumo de 8001,39 kW·h.

Para variar la velocidad se ha elegido un variador de frecuencia de la marca *Omron*, Figura A. 5.3, que se ajusta a las especificaciones deseadas.

VZ
V1000

Mejor rendimiento y calidad en menos espacio

- Control vectorial de corriente
- Alto par de arranque (200% / 0,5 Hz)
- Rango de control de velocidad 1:100
- Doble valor nominal: HD de 150%/1min y ND de 120%/1 min.
- Control de motores IM y PM (asíncrono y síncrono)
- Ajuste en marcha
- Nueva tecnología de portadora y ruido bajo
- 10 años de vida útil sin mantenimiento
- Filtro incorporado
- Terminales sin tornillos
- Tarjeta de terminales extraíble con memoria de parámetros
- Fuente de alimentación opcional de 24 V c.c. para la placa de control
- Comunicaciones de bus de campo: Modbus, Profibus, CanOpen, DeviceNet, Lonworks, CompoNet, Ethernet
- Seguridad incorporada (EN954-1, categoría de seguridad 3)
- CE, UL, cUL y TUV

Valores nominales

- Monofásico clase 200 V: 0,1 a 4 kW
- Trifásico clase 200 V: 0,1 a 15 kW
- Trifásico clase 400 V: 0,2 a 15 kW



The image shows an Omron V1000 frequency converter. It is a vertical, rectangular unit with a grey and black color scheme. The top section features a digital display showing 'F50.00' and several control buttons including 'ESC', 'FWD', 'REV', 'STOP', and 'ENTER'. Below the display, the Omron logo and 'V1000' model name are printed. The bottom section has a terminal block with various connection points labeled for power and control signals. A warning label is visible at the bottom of the unit.

Figura A. 5.3. Características técnicas del variador de frecuencia. [43]

La estructura a medida de la granuladora está construida en acero inoxidable AISI 316 y el diseño del equipo detallado se puede observar en el *Plano 1*, *Plano 2* y *Plano 3*.

6. ELECCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SECADERO

Tras los ensayos de Planta Piloto se decide elegir un secadero por infrarrojos capaz de secar un caudal de 231,24 kg/h y de las mismas características que el del ensayo descrito en el apartado 7.3 de la *Memoria*.

Partiendo de los datos obtenidos del ensayo, se seleccionan lámparas de 1,125 m de longitud que se colocarán separadas entre los centros de ellas 0,5 m, por lo que cada lámpara infrarroja cubrirá una superficie de 0,5625 m². Con esta nueva configuración se puede calcular la masa que cabe en el área de 0,5625 m².

$$\frac{0,2 \text{ kg de gránulos}}{0,078 \text{ m}^2} \cdot 0,5625 \text{ m}^2 = 1,44 \text{ kg de gránulos por cada lámpara}$$

Como únicamente se ha aumentado el área superficial, se puede considerar que de nuevo se necesitan 4 min para secar por completo dichos gránulos. Con ello, se puede calcular el caudal másico a secar por cada lámpara:

$$\frac{1,44 \text{ kg de gránulos}}{4 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} = 21,63 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para poder secar el caudal másico requerido se van a necesitar:

$$\frac{231,24}{21,63} = 10,69 \approx 11 \text{ tubos radiantes}$$

Las lámparas infrarrojas de onda media seleccionadas son de la marca *ARVEN* [8] y se muestran en la Figura A. 6.1 y Figura A. 6.2, concretamente el modelo IR3000 de potencia variable, trabajando a 1 kW de potencia. Los reflectores son de aluminio anodizado, llevan una rejilla de protección y la carcasa del panel es de acero revestido de anticorrosivo. Tienen soportes articulados para anclarlos a las superficies fijas.

Especificaciones técnicas

Panel de infrarrojos industrial IR (IP44)

Tipo	Niveles de potencia [kW]	Tensión [V]	Intensidad [A]	Temperatura máx. del elemento [°C]	Dimensiones LxHxA [mm]
IR3000	1/2/3	400V3N~*	4,3	700	1125x83x358
IR4500	1,5/3/4,5	400V3N~*	6,5	700	1500x83x358
IR6000	2/4/6	400V3N~*	8,7	700	1875x83x358

Figura A. 6.1. Paneles radiantes para el secadero por infrarrojos. [8]

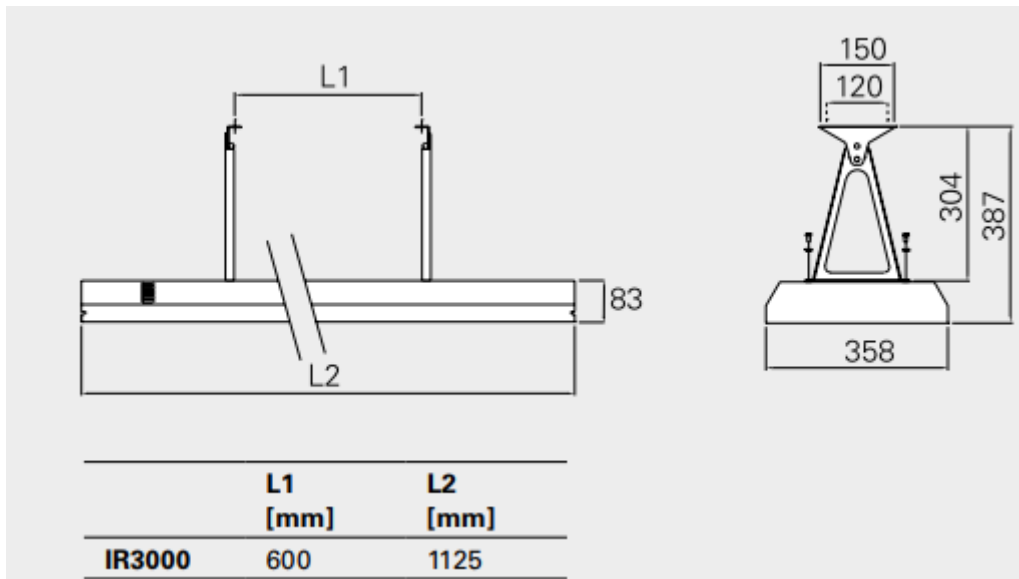


Figura A. 6.2. Paneles radiantes para el secadero por infrarrojos, dimensiones. [8]

Eligiendo dicha configuración las lámparas ocupan una superficie total de 6,19 m² dispuestas de forma rectangular con unas dimensiones de 5,5 x 1,125 m², por lo que se necesita un tapete de como mínimo esas dimensiones.

Se decide seleccionar una de banda de acero sinfín motorizada de la marca comercial *Berndorf* [12] capaz de trabajar hasta 400 °C y cuyas características se muestran en la Figura A. 6.3.

Propiedades físicas y mecánicas de las bandas de acero			
Material			CARBO 13
Tipo			Ck 67
Nº de material similar		DIN	1.1231
Resistencia a la tracción a 20 °C		N/mm ²	1.200
0,2 % de límite elástico respecto al nominal			970
Dureza	Rockwell HRC		36
	Vickers HV 10		350
Elongamiento 50 mm		%	8
Factor de soldadura			0,80
Resistencia a la fatiga bajo tensión inversa de flexión*	a 20 °C	N/mm ²	450
Módulo de elasticidad	a 20 °C	N/mm ²	210.000
Densidad		kg/dm ³	7,85
Coeficiente medio de expansión térmica	a 20-100 °C	10 ⁻⁶ m/m °C	11,1
	a 20-200 °C	10 ⁻⁶ m/m °C	11,9
	a 20-300 °C	10 ⁻⁶ m/m °C	12,5
	a 20-400 °C	10 ⁻⁶ m/m °C	12,9
Calor específico			0,46
Conductividad térmica	a 20 °C		46
Resistencia eléctrica específica	a 20 °C	Ohmios mm ² /m	0,13
Temperatura máx. admisible de operación		°C	400
		°F	750
Resistencia a la tracción a temperatura máx. admisible de operación		N/mm ²	850
0,2 % de límite elástico a temperatura máx. admisible de operación		N/mm ²	720

Figura A. 6.3. Características banda de acero motorizada sinfín. [12]

Y como cabe la posibilidad de elegir un diseño a medida, se elige de unas dimensiones un poco superiores al área que abarcan las lámparas infrarrojas, 6 x 1,2 m² y un espesor de banda de 1,2 mm.

Para cumplir con el tiempo de residencia la velocidad lineal debe de ser muy baja. Se calcula:

$$\frac{6 \text{ m}}{4 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 0,025 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para conseguir este movimiento ha elegido un motorreductor recomendado por el fabricante para la bandeja sinfín que trabaja con una potencia de 90 W.

7. SELECCIÓN DEL VIBROTAMIZ DE SEPARACIÓN DE GRÁNULOS

Tras el secadero, se deben separar los gránulos en tres fracciones: los de diámetro equivalente mayor a 300 µm, los comprendidos entre 100 µm y 300 µm y, por último, el polvo fino menor a 100 µm.

Para ello se ha seleccionado una tamizadora vibratoria industrial. Tras consultar las especificaciones de los modelos disponibles de la marca *FILTRA VIBRACIÓN*, [26], Figura A. 7.1, se ha decidido elegir el modelo FTI-0550, capaz de separar el caudal necesario (231, 24 kg/h) en las granulometrías requeridas.

PRODUCTO	LUZ DE MALLA	FTI-0550	FTI-0800	FTI-1200	FTI-1500
Leche en polvo	400µ	350Kg/h	800Kg/h	1.800Kg/h	2.800Kg/h
Zumo de naranja	1000µ	1.600l/h	3.500l/h	8.000l/h	12.000l/h
Espicias (orégano, tomillo, canela...)	600µ	400Kg/h	1.000Kg/h	1.500Kg/h	1.800Kg/h
Pimenton	1000µ	180Kg/h	350Kg/h	1.000Kg/h	1.300Kg/h
Suero lacteo	50µ	1.000l/h	2.200l/h	5.000l/h	7.500l/h
Azucar glas	150µ	800 Kg/h	2.000 Kg/h	3.000 Kg/h	3.500Kg/h
Harina trigo	300µ	300 Kg/h	600 Kg/h	1.350 Kg/h	2.100Kg/h
Grana de polietileno	3000µ	600Kg/h	1.300Kg/h	3.000Kg/h	4.500Kg/h
Sulfato amonico	350µ	400Kg/h	900Kg/h	2.000Kg/h	3.100Kg/h
Polvo de toner	100µ	90Kg/h	170Kg/h	400Kg/h	600Kg/h
Polvo de cristal (envas)	100µ	270Kg/h	500Kg/h	1.300Kg/h	2.000Kg/h
Neumatico triturado	1000µ	300Kg/h	650Kg/h	1.500Kg/h	2.200Kg/h
Purines	125µ	2.000l/h	4.000l/h	10.000l/h	15.000l/h
Pet reciclado	5000µ	400Kg/h	850Kg/h	2.000Kg/h	3.000Kg/h
Aceite biocombustible	200µ	800l/h	1.600l/h	4.000l/h	6.100l/h
Pintura acrílica	80µ	500l/h	1.200l/h	2.700l/h	4.200l/h

Figura A. 7.1. Filtra Vibración. Vibro tamices industriales. [26]

Las especificaciones de dicho modelo se muestran en la Figura A. 7.2.

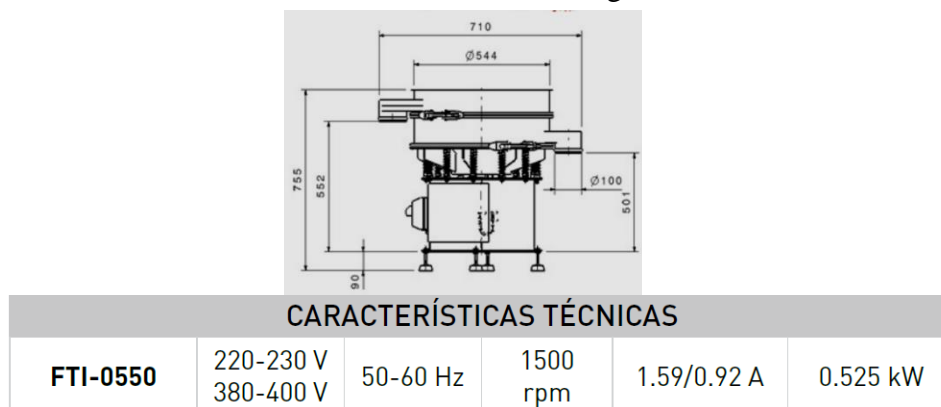


Figura A. 7.2 Filtra Vibración. Vibro tamiz FTI-0550.

Atendiendo a la Figura A. 7.1 la granulometría más similar a la de trabajo es la de 150 μm , por lo que se estima que el equipo es capaz de separar los 231,24 kg/h necesarios en media hora, dato que será necesario para calcular el consumo eléctrico del equipo.

El material de construcción es acero inoxidable AISI 304 y cuenta con un motor de 0,525 kW. El equipo puede funcionar en continuo (se añade una salida de producto a cada tamiz) o en discontinuo. Se han elegido 3 tamices para separar las fracciones con luz de malla 500 μm (para evitar problemas de obturación), 300 μm y 100 μm (los que comprenden la fracción de interés).

Las dimensiones del equipo son las que se muestran en la Figura A. 7.2 y específicamente para el modelo seleccionado, en la Tabla A. 7.1.

Tabla A. 7.1. Dimensiones vibrotamiz.

	Dv , exterior (m)	Dv, tamiz (m)	Hv (m)
Vibrotamiz FTI-0550	0,71	0,54	0,73 + 0,21 por cada tamiz (3)

8. DIMENSIONADO DEL SILO DE DESCARGA

A partir de la Ecuación 14:

$$W \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = C \cdot \rho_{\text{ap}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \sqrt{g \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \cdot (D_o(\text{m}) - k_b \cdot d(\text{m}))$$

Son conocidos todos los datos a excepción del diámetro del orificio, por lo que:

$$4,17 \cdot 10^{-3} = 0,58 \cdot 1080 \cdot \sqrt{9,81} \cdot (D_o - 1,5 \cdot 1,9754 \cdot 10^{-4})$$

Que despejando y calculando, da un valor de diámetro del orificio de:

$$D_o = 5,6788 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,68 \text{ mm}$$

Se debe cubrir la capacidad de 30 kg/h de material granulado, que, con la densidad aparente de los gránulos se puede calcular que ocupan un volumen de:

$$30 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1,08 \text{ kg}} \cdot \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{1 \text{ L}} = 0,027 \hat{m}^3 \cong 0,03 \text{ m}^3$$

Con la restricción de volumen y las tres restricciones que propone el modelo matemático, se diseña un sistema de inecuaciones para calcular la altura (H_{sd}) y el diámetro (D_{sd}) del silo de descarga de base plana del modelo de Beverloo:

- Volumen mayor o igual a $0,03 \text{ m}^3$.
- Altura mayor a dos veces y medio el diámetro.
- Diámetro mayor a dos veces y medio el diámetro del orificio, o, diámetro mayor al diámetro del orificio más treinta veces el diámetro de los gránulos.

$$0,03 \leq \frac{\pi}{4} \cdot D_{sd}^2 \cdot H_{sd}$$

$$H_{sd} > 2,5 D_{sd}$$

$$D_{sd} > 2,5 \cdot 5,68 \cdot 10^{-3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{sd} > 5,68 \cdot 10^{-3} + 30 \cdot 1,9754 \cdot 10^{-4} \end{array} \right.$$

De las dos últimas restricciones la más restrictiva es la penúltima, por lo que la última se cumplirá en todos los casos.

Para resolver el sistema de inecuaciones se recurre al método de optimización gráfico. Consiste en representar las tres inecuaciones de la forma $H_{sd} = f(D_{sd})$ dando valores a una variable y calculando la otra. En la Tabla A. 8.1 se observan los datos fijados y calculados de ambas variables para posteriormente hacer la representación gráfica.

Tabla A. 8.1. Datos para la resolución gráfica de la Ley de Beverloo.

D_{sd} (m)	H_{sd} (m)
Restricción 1	
0,1	3,8
0,15	1,7
0,2	1,0
0,25	0,6
0,3	0,4
0,35	0,3
0,4	0,2
0,45	0,2
0,5	0,2
Restricción 2	
0	0
0,5	1,25
Restricción 3	
0,0142	0
0,0142	1

A partir de los datos de la Tabla A. 8.1 se puede trazar $H_{sd} = f(D_{sd})$, Figura A. 8.1.

En la Figura A. 8.1 se ha marcado en color sombreado el área que elimina cada restricción, es decir, aquella que no cumple con la inecuación (tomando puntos en ambas zonas para saber que pareja de valores cumple la restricción). El plano queda dividido en dos secciones cada vez que se añade una restricción. Por una curva (restricción 1) o por una recta (restricción 2 y 3). La restricción 1 al ser de tipo menor o igual tiene la línea trazada en continuo, significativo de que el valor óptimo puede estar sobre la línea. La restricción 2 y 3 al ser de tipo mayor que, el valor óptimo no puede estar sobre ellas y quedan pintadas en trazo discontinuo.

El área sin fondo coloreado es aquella que cumple con todas las restricciones por lo que se decide que el punto más próximo al cruce entre la restricción 1 y 2 (sobre 1) es aquel que cumple los requisitos y minimiza el volumen del silo de descarga. Estos valores son:

$$D_{sd} = 0,25 \text{ m}$$

$$H_{sd} = 0,63 \text{ m}$$

Resolución gráfica del sistema de inecuaciones, dimensionado del silo de descarga

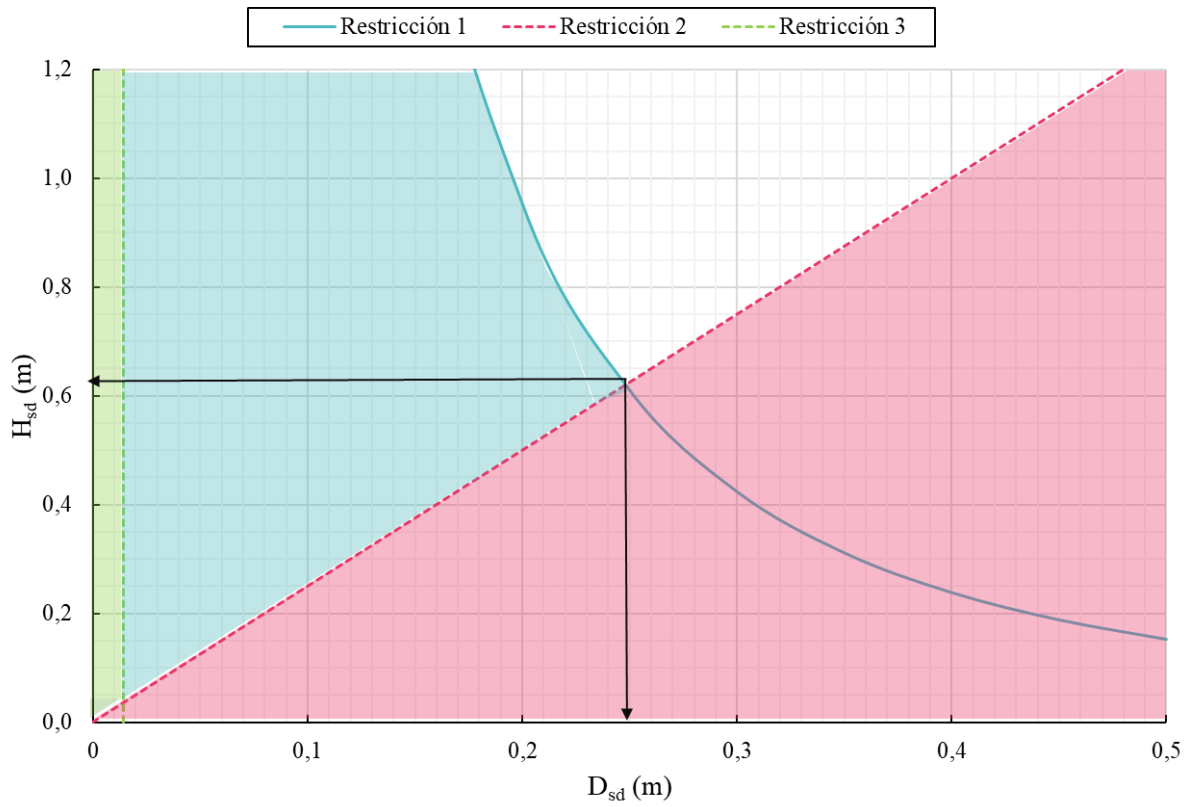


Figura A. 8.1. Representación gráfica de la inecuación de la Ley de Beverloo.

9. DISEÑO DEL HORNO DE FUSIÓN VERTICAL

9.1. CÁMARA DE CALENTAMIENTO – PÉRDIDAS DE CALOR Y DIMENSIONADO

Asunciones:

- El interior de la cámara tubular se encuentra a 1400 °C y es el valor al que van a referirse los cálculos, sabiendo que al alcanzar los 1350 °C los gránulos ya se encuentran fundidos.
- Para conocer el calor específico de la mezcla de materias primas se ha consultado a expertos cerámicos. En estudio privados se ha determinado que para una composición de características similares el calor específico es $400 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$, en el que se contempla el aumento de temperatura de la masa y el calor necesario a aportar para que ocurran las reacciones de descomposición de la materia prima.
- Se va a calentar mediante resistencias eléctricas, módulos calefactores de la marca *Kanthal* [35] cuyas especificaciones pueden observarse en la posterior Figura A. 9.1.
- La conductividad de la fibra cerámica de los módulos calefactores de *Kanthal* [35], operando a 1400 °C puede observarse en la posterior Figura A. 9.2.
- Se debe calcular el espesor adicional de fibra cerámica para llegar a una temperatura fijada en la superficie exterior del horno de 60 °C. Para ello se añade más recubrimiento, en este caso, manta de fibra cerámica de la marca *Morgan* [3], Figura A. 9.3.
- El módulo de Nusselt para convección natural se ha fijado en $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{k}}$ según la normativa ASTM E1980-11(2019), aunque más adelante se ha calculado su valor según autores para cerciorarse de la correcta aproximación.
- La emisividad de la fibra cerámica se ha fijado en 0,7 y la emisividad de las resistencias eléctricas de disiliciuro de molibdeno de alta emisividad es 0,95.
- El aire del exterior del horno se encuentra a 1 atm y 25 °C.
- Las pérdidas de calor se calculan por toda la longitud del tubo de la cámara de calefacción.

TYPE	OPTIONS	OPTIONS AND DIMENSIONS								DATA AT FURNACE TEMPERATURE:			
		LENGTH				DIAMETER				1400°C (2550°F)		1550°C (2820°F)	
		OVERALL, L _T		ELEMENT, L _E		INNER, D _I		OUTER, D _O		POWER	VOLTAGE	POWER	VOLTAGE
MM	IN	MM	IN	MM	IN	MM	IN	W	V	W	V		
SMU 40	A, B	250	9.84	209	8.23	40	1.57	240	9.45	1440	34.3	1050	30.4
SMU 60	A, B	250	9.84	209	8.23	60	2.36	260	10.23	2100	50.0	1520	44.1
SMU 80	A, B	250	9.84	209	8.23	80	3.15	280	11.02	2760	65.7	2000	58.0
SMU 100	A, B	250	9.84	209	8.23	90	3.54	300	11.81	3420	81.4	2480	71.9
SMU 125	A, B	250	9.84	209	8.23	115	4.53	325	12.80	4240	101	3070	89.0
SMU 150	A, B	250	9.84	209	8.23	140	5.51	350	13.78	5040	120	3670	106
SMU 200	A, B	250	9.84	209	8.23	190	7.48	400	15.75	6720	160	4860	141

Superalloy™ Muffle modules, SMU

Option A

Option B

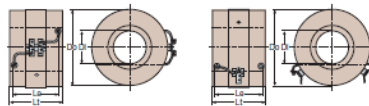


Figura A. 9.1. Especificaciones módulos Kanthal.

TECHNICAL DATA OF CERAMIC FIBER MODULES

	F-3/LS	F-17/LS	F-19	F-14	F-B10
Classification temp. °C (°F)*	1260 (2300)	1400 (2550)	1500 (2730)	1600 (2910)	1300 (2370)
Maximum continuous duty temperature, °C (°F)	1150 (2100)	1300 (2370)	1400 (2550)	1550 (2820)	1000 (1830) (in clean air)**
Density approx. kg/m ³ (lb/ft ³)	200 (12.48)	200 (12.48)	200 (12.48)	250 (15.61)	180–200 (11.24–12.48)
Linear shrinkage, % (24 hours at max. continuous duty temperature)	3/-1	4.5/-2	4.5	3.5	<2
Guide analysis, %:	Al ₂ O ₃ SiO ₂	46 54	50 50	67 33	77 23
					CaO+MgO 18–20 70–80 others <3
Thermal conductivity, W/m·K***					
at 200°C (390°F)	0.07	0.07	0.07	–	0.08
at 400°C (750°F)	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10
at 600°C (1110°F)	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14
at 800°C (1470°F)	0.21	0.21	0.20	0.19	0.21
at 1000°C (1830°F)	0.28	0.29	0.28	0.24	0.28
at 1200°C (2190°F)	–	0.41	0.39	0.35	–
at 1300°C (2370°F)	–	0.49	0.46	0.39	–
at 1400°C (2550°F)	–	–	0.54	0.46	–
at 1500°C (2730°F)	–	–	–	0.54	–
at 1600°C (2910°F)	–	–	–	–	–

Figura A. 9.2. Aislante térmico de fibra cerámica Kanthal. [35].

Thermal Conductivity, W/m·K, per ASTM C201					
	Cerablanket			Cerachem Blanket	
Density, kg/m ³ (pcf)	64 (4)	96 (6)	128 (8)	96 (6)	128 (8)
200°C	0.06	0.06	0.05	0.07	0.05
400°C	0.11	0.09	0.08	0.1	0.08
600°C	0.19	0.16	0.13	0.16	0.14
800°C	0.31	0.25	0.19	0.24	0.19
1000°C	0.45	0.36	0.27	0.36	0.27
1200°C	–	–	–	0.51	0.36

Figura A. 9.3. Manta de fibra cerámica Morgan [3].

Los gránulos deben poder considerarse como un sistema concentrado. Para ello se comprueba con la Ecuación 15 que el módulo de Biot es menor a 0,1. La longitud característica de los gránulos y su conductividad térmica son:

$$L_{cg} = \frac{1}{3} \cdot 9,877 \cdot 10^{-6} = 3,292 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$k = 3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Bi = \frac{3,29 \cdot 10^{-5} \cdot h_{\text{convección+radiación}}}{3} = 0,1$$

$$h_{\text{convección+radiación}} = 9,119 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

No se conoce aún cual es el coeficiente individual de transmisión de calor por convección y radiación dentro de la cámara de calentamiento del horno, pero se puede saber que para incumplir que el módulo de Biot fuera igual o mayor a 0,1, el coeficiente debería tomar, al menos, valores del orden de varios miles. Como este valor no es posible, se acepta tratar a los gránulos como un modelo de sistema concentrado.

Con todas las asunciones se puede hacer un listado de datos para resolver el problema, Tabla A. 9.1.

Tabla A. 9.1. Datos para el diseño de la cámara de calefacción del horno de fusión vertical.

Parámetro (unidades)	Valor
r_0 (m)	0,04
r_1 (m)	0,14
k_A (W/m·K)	0,46
k_B (W/m·K)	0,19
T_0 (K)	1673,15
T_2 (K)	333,15
T_3 (K)	298,15
ϵ	0,7
σ (W/m ² ·K ⁴)	$5,67037 \cdot 10^{-8}$
L_{Hcc} (m)	0,5

Al seleccionar dos módulos como los marcados en azul en la Figura A. 9.1, se tiene una potencia suministrada por los módulos:

$$q_{\text{aporte}} = 2 \cdot 2760 = 5520 \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right)$$

Mientras que el calor necesario para fundir los gránulos es según la Ecuación 23:

$$q_{fusión} = 4,17 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot (1673,15 - 298,15) = 2293,5 \left(\frac{J}{s}\right)$$

Por último, falta calcular las pérdidas de calor por la pared. La Figura 5.8 para las asunciones tomadas queda de la siguiente manera, Figura A. 9.4.

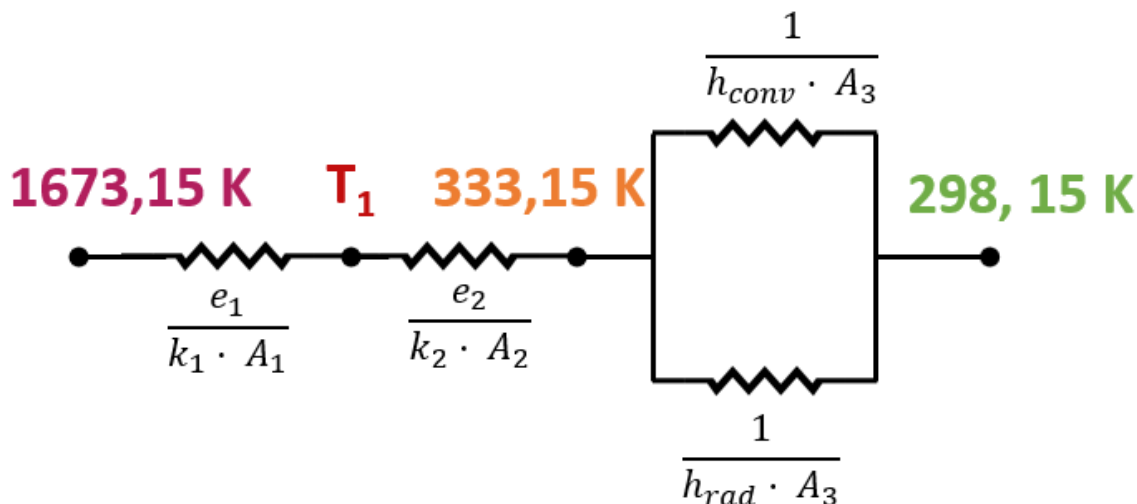


Figura A. 9.4. Resistencia térmicas horno de fusión vertical.

Como el flujo de calor que atraviesa el sistema debe ser el mismo en todo el esquema, partiendo de la Ecuación 24, se deben igualar la Ecuación 27 y la Ecuación 42:

$$q_{pérdidas} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_0 - T_2}{\frac{\ln(r_1/r_0)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot k_A} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot k_B}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{1}{(h_{convección} + h_{radiación}) \cdot A_{sc}}}$$

Donde, con las asunciones tomadas, todo es conocido a excepción de r_2 , que determinará el espesor de manta de fibra cerámica aislante y con ello, se podrá conocer la temperatura T_1 y el flujo de calor que se pierde por las paredes del horno.

El área superficial del cilindro:

$$A_{sc} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L_{cc} = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot r_2$$

El coeficiente de transmisión de calor por radiación, Ecuación 40:

$$h_{radiación} = 0,7 \cdot 5,67037 \cdot 10^{-8} \cdot (333,15^2 + 298,15^2) \cdot (333,15 + 298,15) = 5,0086 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Sustituyendo los datos de la Tabla A. 9.1:

$$\frac{1673,15 - 333,15}{\frac{\ln(0,14/0,04)}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,46} + \frac{\ln(r_2/0,14)}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,19}} = \frac{333,15 - 298,15}{\frac{1}{(5 + 5,0086) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot r_2}}$$

Resolviendo la igualdad se obtiene un valor de r_2 :

$$r_2 = 0,4382 \text{ m}$$

Por lo que el diámetro total del horno, D_H , será:

$$D_H = 2 \cdot r_2 = 2 \cdot 0,4382 = 0,8764 \text{ m}$$

Sustituyendo el valor de este radio en cualquiera de las partes de la igualdad se puede obtener las pérdidas de calor por la pared:

$$q_{p\acute{e}rdidas} = \frac{333,15 - 298,15}{\frac{1}{(5 + 5,0086) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,4382}} = 482,24 \left(\frac{J}{s}\right)$$

Y la temperatura a la que se encuentra la pared que separa ambos tipos de fibra cerámica:

$$q_{p\acute{e}rdidas} = 482,24 \left(\frac{J}{s}\right) = \frac{T_1 - 333,15}{\frac{\ln(r_2/0,14)}{2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,19}}$$

$$T_1 = 1254,99 \text{ K} = 981,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

El valor de conductividad elegido de la Figura A. 9.3 es para cuando la pared se encuentra entre $800 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que se considera que la elección es correcta.

El dimensionado de la cámara de calentamiento es correcto puesto que se cumple la Ecuación 22:

$$5520 \left(\frac{J}{s}\right) \geq 2293,5 \left(\frac{J}{s}\right) + 482,24 \left(\frac{J}{s}\right)$$

Para comprobar que con esta geometría se ha escogido una buena aproximación del coeficiente individual de transmisión de calor por convección va a calcularse su valor exacto.

Se comprueba la Ecuación 31 para saber si puede aproximarse el cilindro vertical a la placa plana.

$$D_H \geq \frac{35 \cdot L_H}{G_r^{0,25}}$$

Se necesita calcular el número adimensional de Grashof, Ecuación 32, pero para ello, primero se necesita calcular la temperatura de película y las propiedades del aire a esa temperatura.

$$T_{fl} = \frac{333,15 + 298,15}{2} = 315,65 \text{ K} = 42,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La viscosidad cinemática, la conductividad del aire a esa temperatura y el número adimensional de Prandtl se han calculado interpolando entre 40 °C y 45 °C los datos de las Propiedades del Aire a 1 atm de la Figura A. 9.10 al final de los *Anexos*.

$$\nu = 1,726 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$k_{fl} = 0,026805 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Pr} = 0,7248$$

Por último, se calcula β .

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{315,65 \text{ K}} = 3,1686 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con todo esto, el número adimensional de Grashof de una lámina plana vertical:

$$G_r = \frac{9,81 \cdot 3,1686 \cdot 10^{-3} \cdot (333,15 - 298,15) \cdot (0,5)^3}{(1,726 \cdot 10^{-6})^2} = 4,5649 \cdot 10^8$$

Sustituyendo en la Ecuación 31:

$$0,8764 \geq \frac{35 \cdot 0,5}{(4,5649 \cdot 10^8)^{0,25}} = 0,1197$$

Por lo que se puede calcular el número adimensional de Nusselt como en la Ecuación 30, donde el número adimensional de Rayleigh:

$$\text{Ra} = G_r \cdot \text{Pr} = 4,5649 \cdot 10^8 \cdot 0,7248 = 3,3086 \cdot 10^8$$

$$\text{Nu} = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot (3,3086 \cdot 10^8)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,7248)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2 = 87,65$$

Por último, despejando el valor del coeficiente individual de transferencia de calor por convección de la Ecuación 30:

$$h_{\text{convección}} = \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{fl}}}{L_c} = \frac{87,65 \cdot 0,026805}{0,5} = 4,70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Por lo que es correcto haber realizado los cálculos con la aproximación a $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$.

9.2. CÁMARA DE CALENTAMIENTO – TIEMPO DE PERMANENCIA Y CALENTAMIENTO DEL GRÁNULO

Una vez conocida la geometría de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical, se puede calcular el tiempo de permanencia y el aporte energético que recibe el material en este período.

Entre el silo de descarga y la entrada del material a la cámara, este recorre un tubo de 0,03 m de longitud hecho de fibra cerámica, por lo que en este espacio los gránulos ya adquieren una velocidad no nula. Con la Ecuación 21 se puede calcular el tiempo de permanencia en esta sección, teniendo en cuenta que la velocidad y la posición al inicio son nulas.

$$0,03 = 0 + \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot t^2 \rightarrow t = 0,078 \text{ s}$$

Este tiempo de permanencia permite saber la velocidad final que adquiere un gránulo al final del tubo de entrada, que será la velocidad inicial en la cámara de calentamiento. Con la Ecuación 20:

$$v(0,078) = 0 + 9,81 \cdot 0,078 \rightarrow v_{i,cc} = 0,7672 \text{ m/s}$$

Con esta velocidad y de nuevo, la Ecuación 21, se puede calcular el tiempo de permanencia del gránulo en la cámara de calentamiento de 0,5 m de longitud y cuál será su velocidad a la salida:

$$5 = 0,7672 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot t^2 \rightarrow t_{cc} = 0,2505 \text{ s}$$

$$v(0,2505) = 0,7672 + 9,81 \cdot 0,2505 \rightarrow v_{f,cc} = 3,2246 \text{ m/s}$$

Es decir, el gránulo debe de estar fundido (haber alcanzado los 1350 °C en el interior del horno) en un tiempo de permanencia de $t = 0,2505 \text{ s}$.

Para comprobarlo, se calcula la temperatura del gránulo a dicho tiempo con la Ecuación 19 donde los valores de las variables necesarios para el cálculo se muestran en la Tabla A. 9.2.

Tabla A. 9.2. Datos para conocer la temperatura del gránulo en un instante determinado.

Parámetro (Unidades)	Valor
T_{∞} (K)	1673,15
T_i (K)	298,15
L_{cg} (m)	$3,292 \cdot 10^{-5}$
ρ_g (kg/m ³)	1790
C_p (J/kg · K)	400
$h_{convección+radiación}$ (W/m ² ·K)	Desconocido

Se debe calcular la suma del coeficiente individual de transmisión de calor por convección y el de radiación en el interior de la cámara de calentamiento.

El coeficiente individual de transmisión de calor por radiación en el interior de la cámara de calentamiento del horno de fusión vertical se calcula con la Ecuación 40:

$$h_{radiación} = 0,95 \cdot 5,67037 \cdot 10^{-8} \cdot (1673,15^2 + 298,15^2) \cdot (1673,15 + 298,15) = 306,71 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para la convección natural se debe calcular según la Ecuación 30, en el que la longitud característica del cilindro es su propia longitud, 0,5 m, la conductividad térmica del aire debe evaluarse a la temperatura de película y debe calcularse también el número adimensional de Grashof.

$$T_{fl} = \frac{1673,15 + 298,15}{2} = 985,65 \text{ K} = 712,5 \text{ K}$$

Las propiedades del aire a dicha temperatura se interpolan de las Propiedades del aire a 1 atm, Figura A. 9.10.

$$v = 1,157 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}$$

$$k_{fl} = 0,06638 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$Pr = 0,7099$$

Por último, se calcula β .

$$B = \frac{1}{985,65} = 1,0146 \cdot 10^{-3}$$

Con la Ecuación 32 puede calcularse el número adimensional de Grashof:

$$G_r = \frac{9,81 \cdot 1,0146 \cdot 10^{-3} \cdot (1673,15 - 298,15) \cdot 0,5^3}{(1,157 \cdot 10^{-4})^2} = 1,2776 \cdot 10^8$$

Se comprueba que la geometría interior de la cámara de calentamiento no cumple la restricción de la Ecuación 31:

$$1,9754 \cdot 10^{-4} \geq \frac{35 \cdot 0,5}{(1,2776 \cdot 10^8)^{0,25}} = 0,1646$$

Por lo que el número de Nusselt del interior del cilindro debe calcularse con la Ecuación 36, que si que se cumple los requerimientos:

$$Nu = 0,638 \cdot (1,2776 \cdot 10^8)^{0,25} \cdot (0,7099)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,7099}{0,861 + 0,7099}\right)^{0,25} = 51,05$$

Ya se conocen todos los términos de la Ecuación 30, por lo que el coeficiente individual de transmisión de calor por convección es:

$$h_{\text{convección}} = \frac{51,05 \cdot 0,06638}{0,5} = 6,78 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

La suma de ambos coeficientes es:

$$h_{\text{convección+radiación}} = 306,71 + 6,78 = 313,50 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

La constante b de la Ecuación 19 y con los datos de la Tabla A. 9.2.

$$b = \frac{313,50}{1790 \cdot 400 \cdot 3,292 \cdot 10^{-5}} = 13,30$$

La Ecuación 19 queda expresada en función del tiempo:

$$T(t) = e^{-13,30 \cdot t} \cdot (298,15 - 1673,15) + 1673,15$$

Si se dan valores de tiempo muy pequeño a dicha expresión, se puede representar la evolución de la temperatura en el gránulo dentro de la cámara de calentamiento y conocer la temperatura al tiempo de residencia de 0,2505 s. Los datos representados en la Figura A. 9.5 son los de la posterior Tabla A. 9.3.

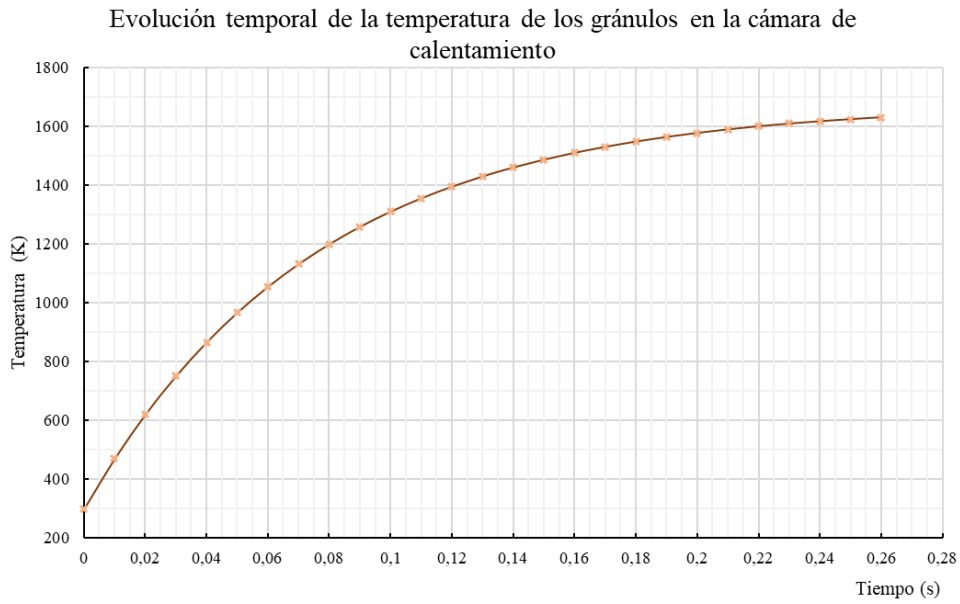


Figura A. 9.5. Evolución temporal de la temperatura en el gránulo dentro de la cámara de calentamiento.

Tabla A. 9.3. Evolución temporal de la temperatura en el gránulo dentro de la cámara de calentamiento.

t (s)	T (K)
0	298,15
0,01	469,39
0,02	619,30
0,03	750,54
0,04	865,43
0,05	966,02
0,06	1054,09
0,07	1131,18
0,08	1198,67
0,09	1257,76
0,1	1309,49
0,11	1354,78
0,12	1394,43
0,13	1429,14
0,14	1459,53
0,15	1486,13
0,16	1509,42
0,17	1529,81
0,18	1547,66
0,19	1563,29
0,2	1576,97
0,21	1588,95
0,22	1599,43
0,23	1608,61
0,24	1616,65
0,25	1623,69
0,26	1629,85

Para el valor exacto de tiempo de residencia de 0,2505 s la temperatura del gránulo es:

$$T(0,2505) = e^{-13,30 \cdot 0,2505} \cdot (298,15 - 1673,15) + 1673,15$$

$$T = 1624,02 \text{ K} = 1350,87 \text{ °C}$$

9.3. CÁMARA DE ENFRIAMIENTO – ENFRIAMIENTO Y DIMENSIONADO

Asunciones:

- Los gránulos fundidos salen de la cámara de calentamiento a 1350,87 °C (1624,02 K) y una velocidad de 3,2246 m/s.
- Al estar fundidos, cambia su calor específico y su densidad. Para los cálculos de la cámara de enfriamiento, el calor específico y la densidad se han tomado (por semejanza y de forma aproximada) los de la sílice fundida. Estos valores, tomados de la *Tabla B.1 (p.830)* y *Tabla B.8 (p.851)* de [16] son:

$$\rho_{s,f} = 2200 \text{ k} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad C_{p,s,f} = 740 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

- La emisividad del vidrio fundido se ha tomado de la *Tabla A.18 (p.889)* de [19] y tiene un valor de:

$$\epsilon_{\text{vidrio}} = 0,62$$

- Se considera que los gránulos a la salida del horno deben de estar como mínimo a 600 °C (873,15 K), temperatura permitida a la que ya se encuentran en estado sólido.
- La cámara de enfriamiento se compone de un tubo de acero inoxidable AISI 316 austenítico, con un 2,5 % de molibdeno en su composición que permite trabajar a temperaturas elevadas y cuya ficha técnica se puede observar en la Figura A. 9.6. Debe calcularse la longitud mínima de tubo que permita el enfriamiento.
- Se va a considerar que la cámara de enfriamiento del horno de fusión vertical se encuentra a una temperatura constante de 25 °C (298,15 K) para enfriar los gránulos desde la temperatura de salida de la cámara de calentamiento hasta la temperatura permitida y que, el calor que desprenden los gránulos al enfriarse pasa al tubo de acero inoxidable. Este calor deberá disiparse mediante un ventilador de aire en el exterior del tubo.



Figura A. 9.6. Ficha técnica acero inoxidable AISI 316 para la cámara de enfriamiento del horno de fusión vertical.

Se calcula el tiempo necesario para el enfriamiento de los gránulos con la Ecuación 19 pero para ello, debe calcularse primeramente el parámetro b. Este, a su vez, depende del coeficiente individual de transmisión de calor por convección y radiación entre la pared de la cámara de enfriamiento y los gránulos fundidos.

El coeficiente individual de transmisión de calor por convección, de igual modo al anterior, se estima en $5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

El coeficiente individual de transmisión de calor por radiación se calcula con la Ecuación 40, donde todos los valores que toman las variables son conocidos y se han descrito en las asunciones.

$$h_{\text{radiación}} = 062 \cdot 5,67037 \cdot 10^{-8} \cdot (1624,02^2 + 298,15^2) \cdot (1624,02 + 298,15) = 184,24 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Por lo que el coeficiente individual de transmisión de calor entre el gránulo fundido y la pared de la cámara de enfriamiento es:

$$h_{\text{convección+radiación}} = 184,24 + 5 = 189,24 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

El valor de b de la Ecuación 19 es:

$$b = \frac{189,24}{2200 \cdot 740 \cdot 3,292 \cdot 10^{-5}} = 3,53$$

Por lo que la Ecuación 19, expresada en función del tiempo queda:

$$T(t) = e^{-3,53 \cdot t} \cdot (1624,01 - 298,15) + 298,15$$

Dando valores de tiempo a dicha expresión, puede representarse la evolución de la temperatura del gránulo dentro de la cámara de enfriamiento en el tiempo. Los valores de la Tabla A. 9.4 quedan representados en la Figura A. 9.7.

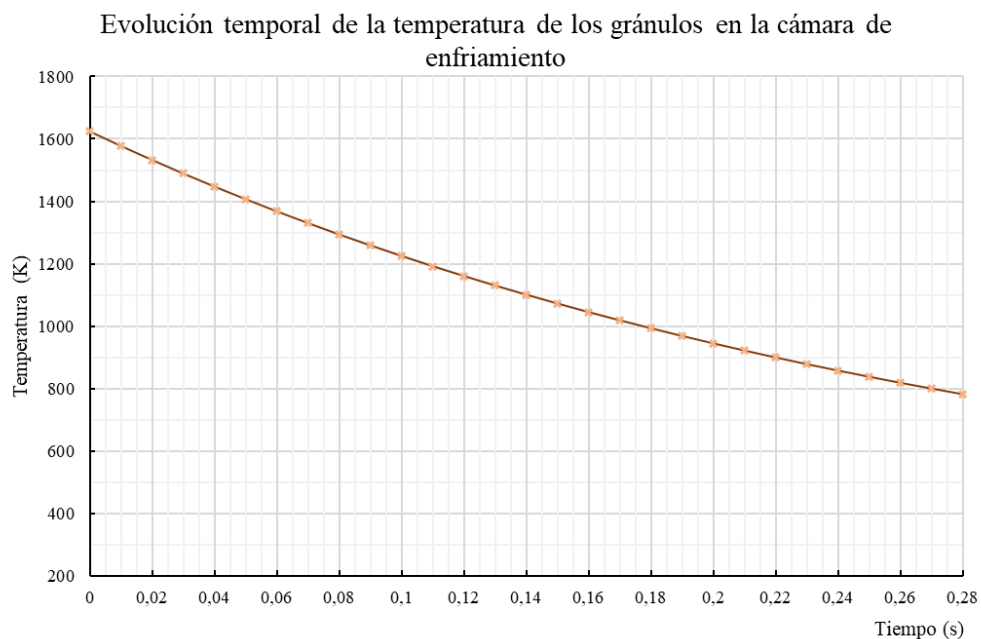


Figura A. 9.7. Evolución temporal de la temperatura en el gránulo dentro de la cámara de enfriamiento.

Tabla A. 9.4. Evolución temporal de la temperatura en el gránulo dentro de la cámara de enfriamiento.

t (s)	T (K)
0	1624,02
0,01	1577,51
0,02	1532,62
0,03	1489,28
0,04	1447,45
0,05	1407,07
0,06	1368,08
0,07	1330,45
0,08	1294,13
0,09	1259,06
0,1	1225,21
0,11	1192,54
0,12	1161,00
0,13	1130,55
0,14	1101,16
0,15	1072,79
0,16	1045,40
0,17	1018,96
0,18	993,44
0,19	968,80
0,2	945,02
0,21	922,07
0,22	899,91
0,23	878,51
0,24	857,87
0,25	837,93
0,26	818,69

Para el valor exacto de temperatura permitida de 873,15 K el tiempo de permanencia del gránulo dentro de la cámara de calentamiento es:

$$873,15 = e^{-3,53 \cdot t} \cdot (1624,02 - 298,15) + 298,15$$

$$t = 0,2367 \text{ s}$$

Conocido el tiempo de residencia para alcanzar la temperatura permitida, es posible calcular la longitud de tubo de acero inoxidable AISI 316 que permita dicho tiempo, a partir de la Ecuación 21 y la velocidad inicial en la cámara de enfriamiento, que coincide con la velocidad final en la cámara de calentamiento.

$$H_{ce} = 3,2246 \cdot 0,2367 + \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot 0,2367^2 = 1,04 \text{ m}$$

Por lo que se necesita un tubo de acero inoxidable de AISI 316 de 1,04 m de longitud para enfriar los gránulos hasta la temperatura permitida.

El tubo seleccionado es de la marca comercial *Bonnet* [15] cuyo diámetro interior es el de diámetro más similar al diámetro interior de la cámara de calentamiento, 0,084 m con un espesor de $2 \cdot 10^{-3}$ m y una longitud a medida de 1,04 m. Las características de este componente pueden observarse en la Figura A. 9.8.

Tubo redondo con soldadura

Calidad AISI 304 y 316

diámetro mm	espesor mm	304		316	
		mate	brillo	mate	brillo
44	2			72602440	
48.3	2	72601047			
50	1.5	72601055			
50	5			72602472	
50.8	1.5	72601060	72601680	72602473	72603200
51	2.6			72602474	
52	1	72601070			
52	1.5		72601700		
53	1.5	72601075		72602476	
63.5	15	72601080	72601740	72602495	72603240
70	1.5	72601085	72601760		
70	2	72601090			
73	1.5	72601095	72601780		
76	1.5	72601100	72601800	72602507	72603258
84	2	72601120	72601820	72602515	72603260
85	1.5	72601122	72601835		
88.9	3	72601125			
101.6	2	72601129			

Figura A. 9.8. Tubo de Acero Inoxidable AISI 316 de la cámara de enfriamiento del horno de fusión vertical. [15]

9.4. CÁMARA DE ENFRIAMIENTO – CALOR A DISIPAR

Se considera que todo el calor perdido por los gránulos al enfriarse desde 1624,02 K hasta 873,15 K se transfiere al tubo de acero inoxidable, que no ofrece una resistencia térmica por su estrecho espesor y, por tanto, se disipa al ambiente.

Para conseguir disipar el calor y que el tubo de acero inoxidable se mantenga constante a temperatura ambiente se necesita un ventilador de aire. Si se calcula el calor perdido por los gránulos, que coincide con el calor a disipar, se puede calcular el caudal de aire necesario para disiparlo y seleccionar así un ventilador que cumpla con las especificaciones descritas.

Se calcula el flujo de calor que pierden los gránulos al enfriarse con la Ecuación 23:

$$q = 4,17 \cdot 10^{-3} \cdot 740 \cdot (1624,02 - 873,15) = 2317,03 \text{ W}$$

Este flujo de calor debe disiparse con aire a temperatura ambiente cuyas propiedades pueden obtenerse de las Propiedades del Aire a 1 atm de la Figura A. 9.10. Estas son:

$$C_{p_{25^{\circ}\text{C}}} = 1,007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{25^{\circ}\text{C}} = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

De nuevo con la Ecuación 29:

$$2317,03 = W_{\text{aire}} \cdot 1,007 \cdot (1624,02 - 298,15)$$

$$W_{\text{aire}} = 1,735 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Este caudal másico significa un ventilador que suministre un caudal volumétrico de aire de:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{1,735 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)}{1,184 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 1,465 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 5275,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Para lograr este caudal de gas se selecciona un ventilador de la marca *SODECA* [49], modelo CMP-1231-4T-4 IE3, capaz de generar un caudal máximo de 5910 m³/h trabajando con una potencia de 3 kW, cuyas especificaciones técnicas y dimensiones se pueden observar en la Figura A. 9.9.

Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máxima admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m3/h)	Nivel presión sonora (dB (A))	Peso aprox. (Kg)
		230V	400V	690V				
CMP-620-4M	1380	1,03			0,12	810	61	8
CMP-718-2T IE3	2825	2,80	1,62		0,75	1485	70	18
CMP-718-2M	2810	4,50			0,75	1485	70	13
CMP-718-4T	1350	1,66	0,96		0,25	1280	63	10
CMP-718-4M	1370	2,00			0,25	1280	63	10
CMP-820-2T IE3	2830	4,03	2,34		1,10	1950	73	16
CMP-820-2M	2820	6,51			1,10	1950	73	16
CMP-820-4T	1350	1,66	0,96		0,25	1670	66	10
CMP-820-4M	1370	2,00			0,25	1670	66	10
CMP-922-2T-1.5 IE3	2830	4,03	2,34		1,10	1650	70	21
CMP-922-2T-2 IE3	2875	5,34	3,07		1,50	2010	71	27
CMP-922-2T-3 IE3	2910	7,32	4,21		2,20	2600	74	30
CMP-922-4T	1380	2,92	1,69		0,55	2450	66	19
CMP-1025-2T-3 IE3	2910	7,32	4,21		2,20	2100	73	33
CMP-1025-2T-4 IE3	2910	10,00	5,77		3,00	2830	77	41
CMP-1025-4T IE3	1455	4,07	2,34		1,10	3400	70	43
CMP-1128-2T-4 IE3	2910	10,00	5,77		3,00	2220	77	45
CMP-1128-2T-5.5 IE3	2900	13,00	7,50		4,00	3210	81	56
CMP-1128-4T IE3	1435	7,93	4,56		2,20	5000	74	40
CMP-1128-6T IE3	940	3,36	1,93		0,75	3300	60	32
CMP-1231-4T-3 IE3	1435	7,93	4,56		2,20	4740	73	48
CMP-1231-4T-4 IE3	1440	10,70	6,15		3,00	5910	75	54
CMP-1231-4T-5.5 IE3	1450	13,90	8,00		4,00	6850	77	58
CMP-1231-6T IE3	950	6,43	3,70		1,50	5115	64	53

Dimensiones mm

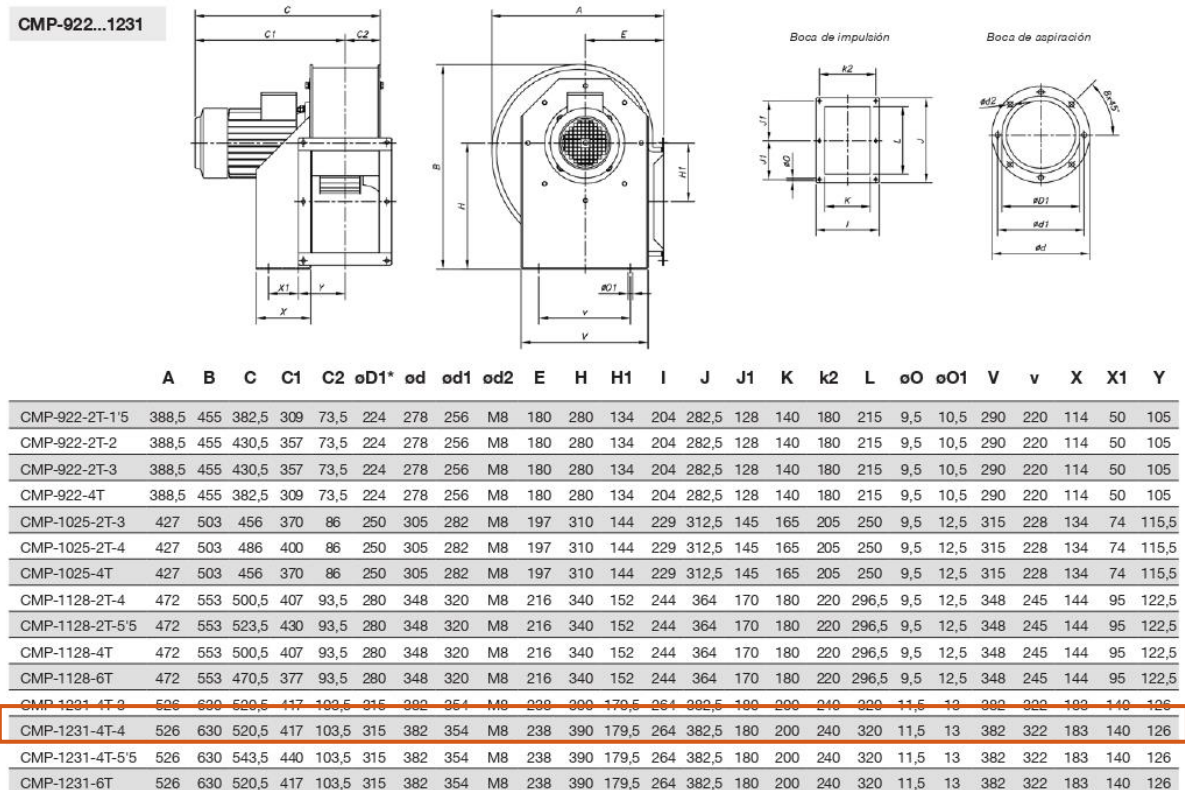


Figura A. 9.9. Ventilador SODECA [49] para disipación del calor en la cámara de enfriamiento del horno de fusión vertical.

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Figura A. 9.10. Propiedades del aire a 1 atm. [19]

10. CÁLCULO TEÓRICO DE LAS PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La composición inicial a granular estaba formada por las materias primas de la Tabla A. 10.1

Tabla A. 10.1. Composición de materias primas a granular, peso molecular y composición en óxidos.

MATERIA PRIMA	CANTIDAD (% en peso)	PESO MOLECULAR (g/mol)	COMPOSICIÓN EN ÓXIDOS
Cuarzo	29,5	60,1	SiO ₂
Feldespató Potásico	25,3	556,8	6(SiO ₂) Al ₂ O ₃ K ₂ O
Carbonato Cálculo	8	100,1	CaCO ₃
Colemanita	7	205,5	CaO $\frac{3}{2}$ (B ₂ O ₃) $\frac{5}{2}$ (H ₂ O)
Óxido de Zinc	10,9	79,4	ZnO
Dolomita	10,4	140,4	CaMg(CO ₃) ₂
Silicato de Circonio	9	107,2	ZrO ₂

De estas materias primas, tras fusión, son el Carbonato Cálculo, la Colemanita y la Dolomita las que tienen pérdidas por calcinación, que suponen:

$$8 \text{ g CaCO}_3 \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{100,1 \text{ g CaCO}_3} \cdot \frac{1 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol CaCO}_3} \cdot \frac{44,0 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 3,5 \text{ g CO}_2$$

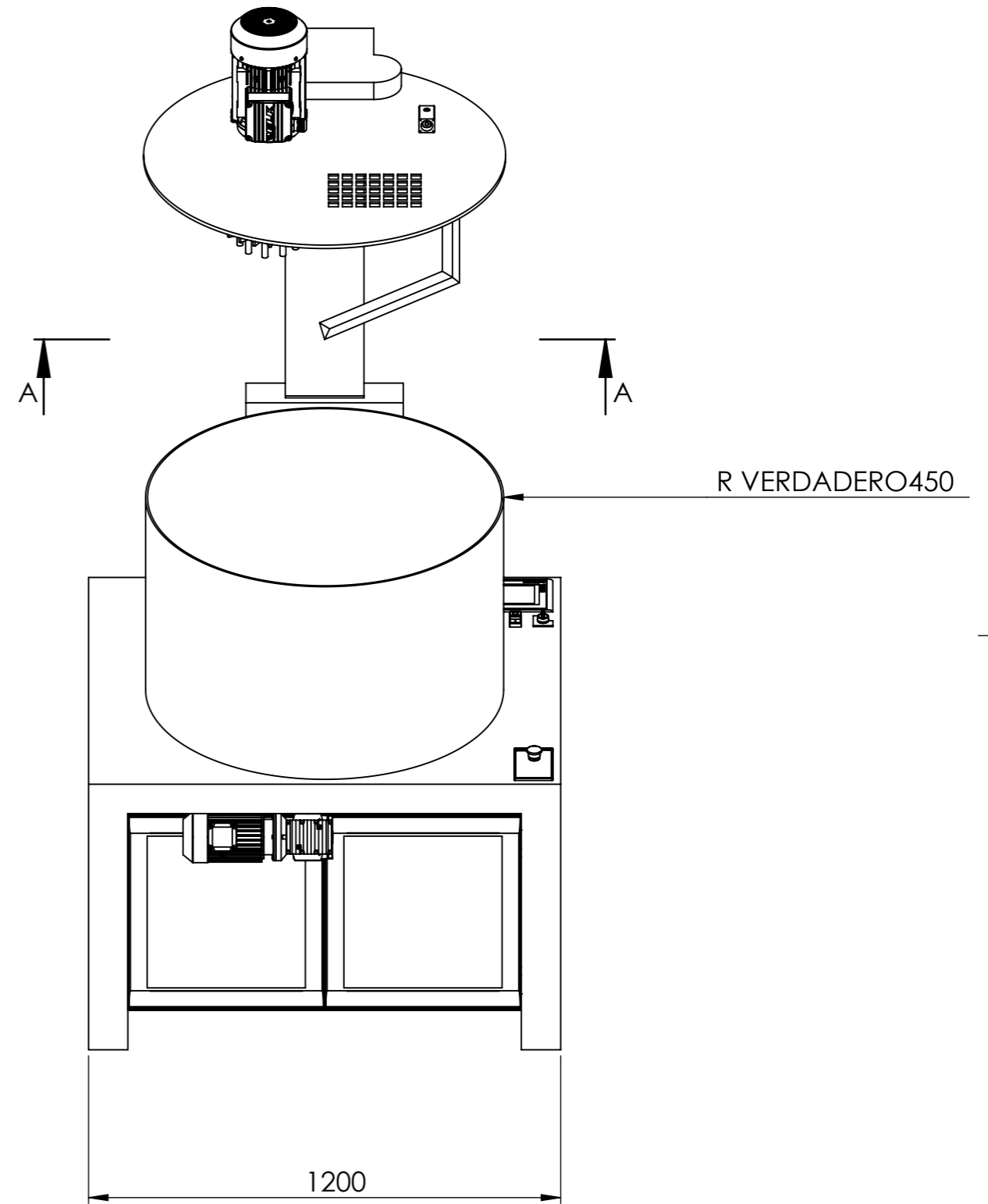
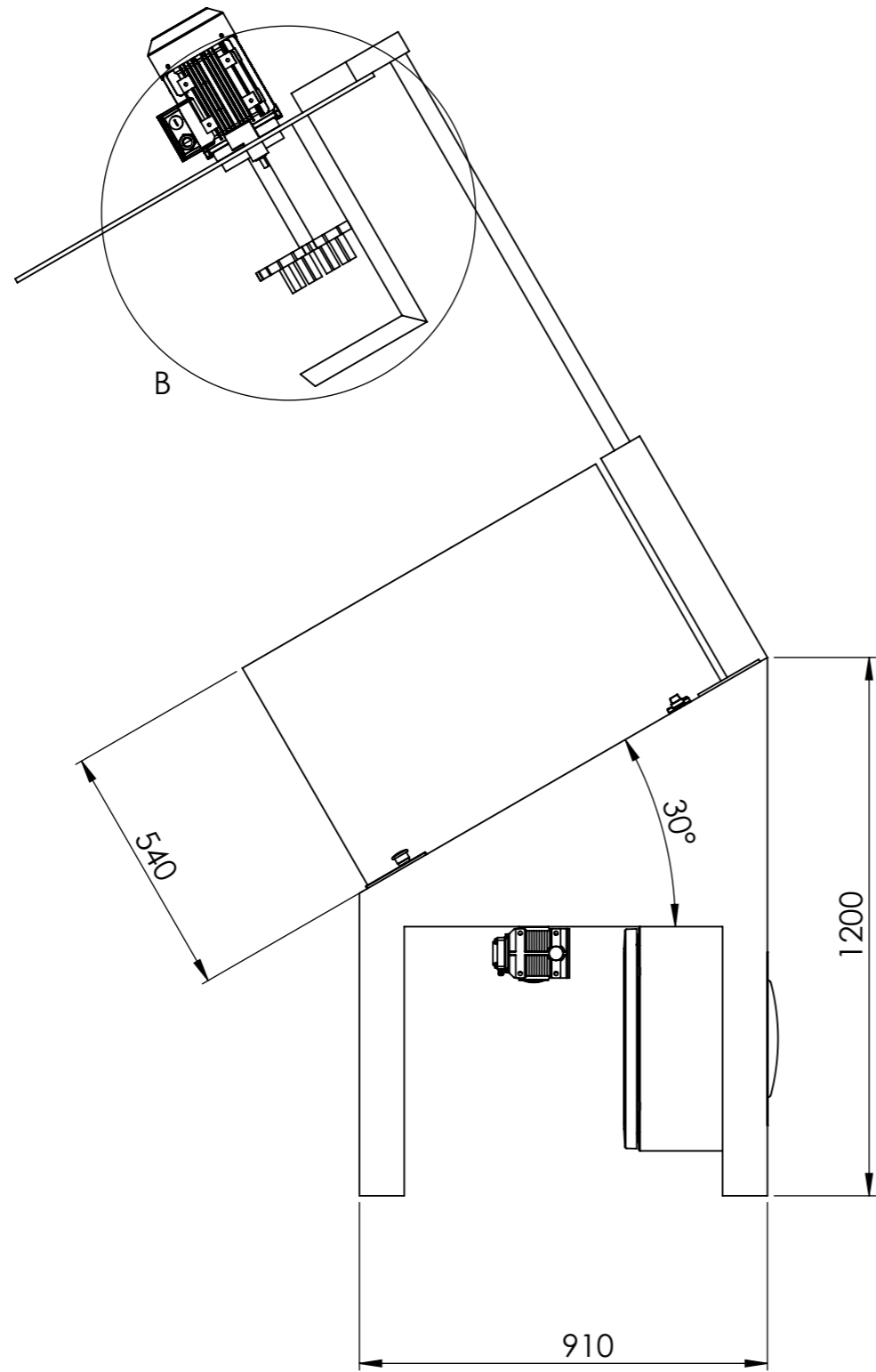
$$10,4 \text{ g CaMg(CO}_3)_2 \cdot \frac{1 \text{ mol CaMg(CO}_3)_2}{184,4 \text{ g CaMg(CO}_3)_2} \cdot \frac{2 \text{ mol CO}_2}{1 \text{ mol CaMg(CO}_3)_2} \cdot \frac{44,0 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol CO}_2} = 5,0 \text{ g CO}_2$$

$$7 \text{ g CaO } \frac{3}{2}(\text{B}_2\text{O}_3) \frac{5}{2}(\text{H}_2\text{O}) \cdot \frac{1 \text{ mol CaO } \frac{3}{2}(\text{B}_2\text{O}_3) \frac{5}{2}(\text{H}_2\text{O})}{205,5 \text{ g CaO } \frac{3}{2}(\text{B}_2\text{O}_3) \frac{5}{2}(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{\frac{5}{2} \text{ mol H}_2\text{O}}{1 \text{ mol CaO } \frac{3}{2}(\text{B}_2\text{O}_3) \frac{5}{2}(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{18 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} = 1,5 \text{ g CO}_2$$

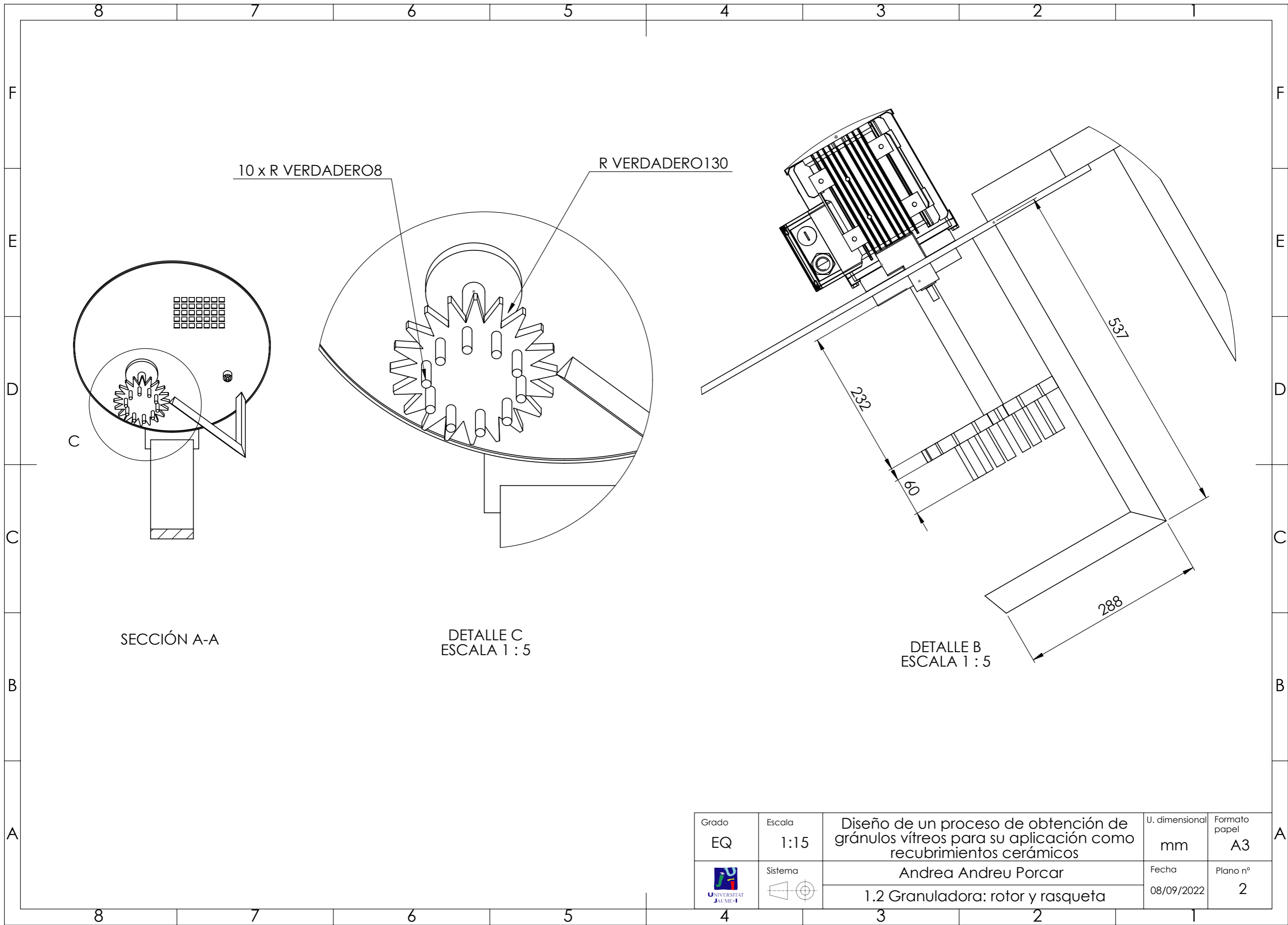
$$\text{P.P.C}_{\text{totales}} = 3,5 + 5,0 + 1,5 = 10 \text{ g} = 10 \% \text{ en peso}$$

Teniendo en cuenta las pérdidas por calcinación de la materia prima se puede entender que el caudal de producción de 75 kg/h se ve reducido hasta 67,5 kg/h.

4. PLANOS



Grado EQ	Escala 1:15	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema 		Fecha 08/09/2022	Plano nº 1
		1.1 Granuladora: alzado y vista lateral		



10 x R VERDADERO8

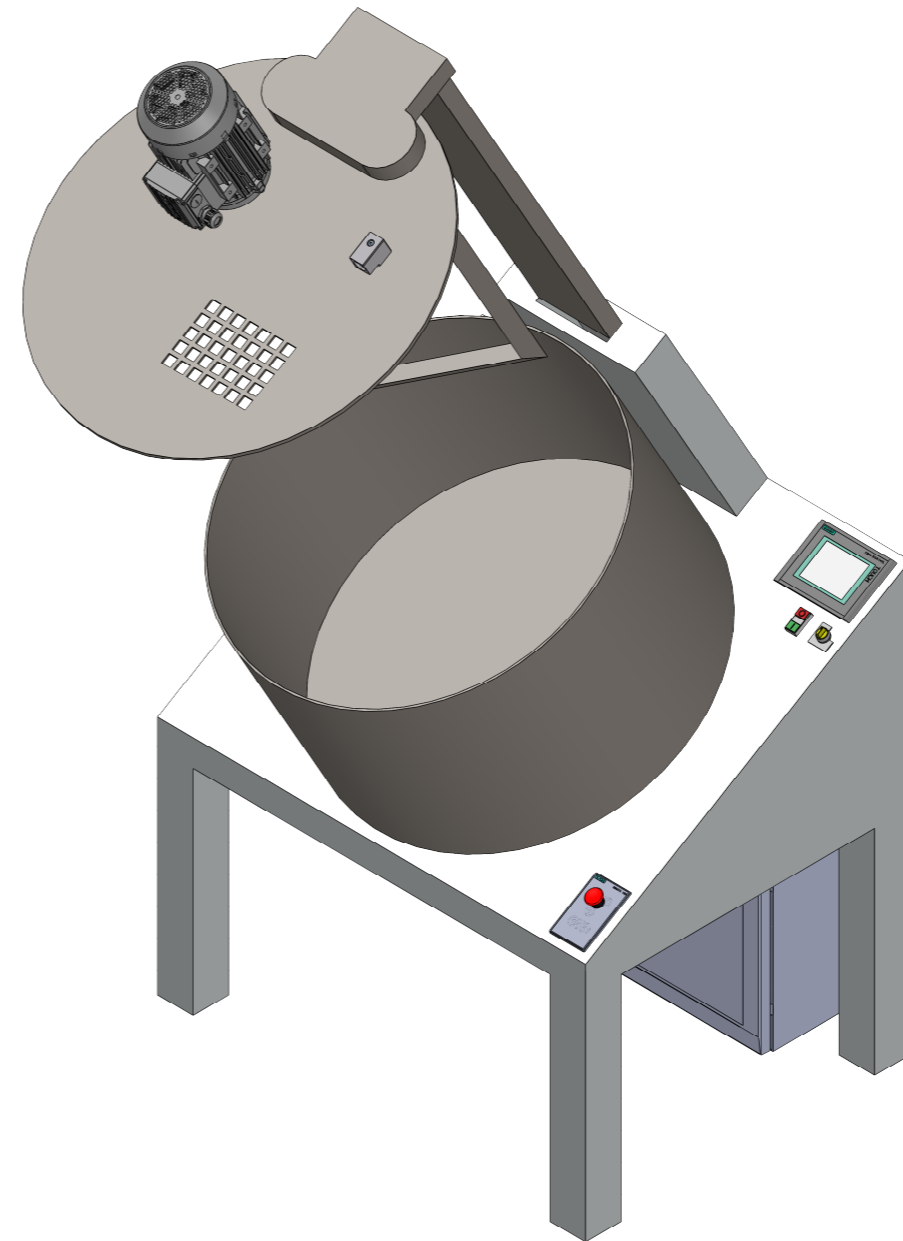
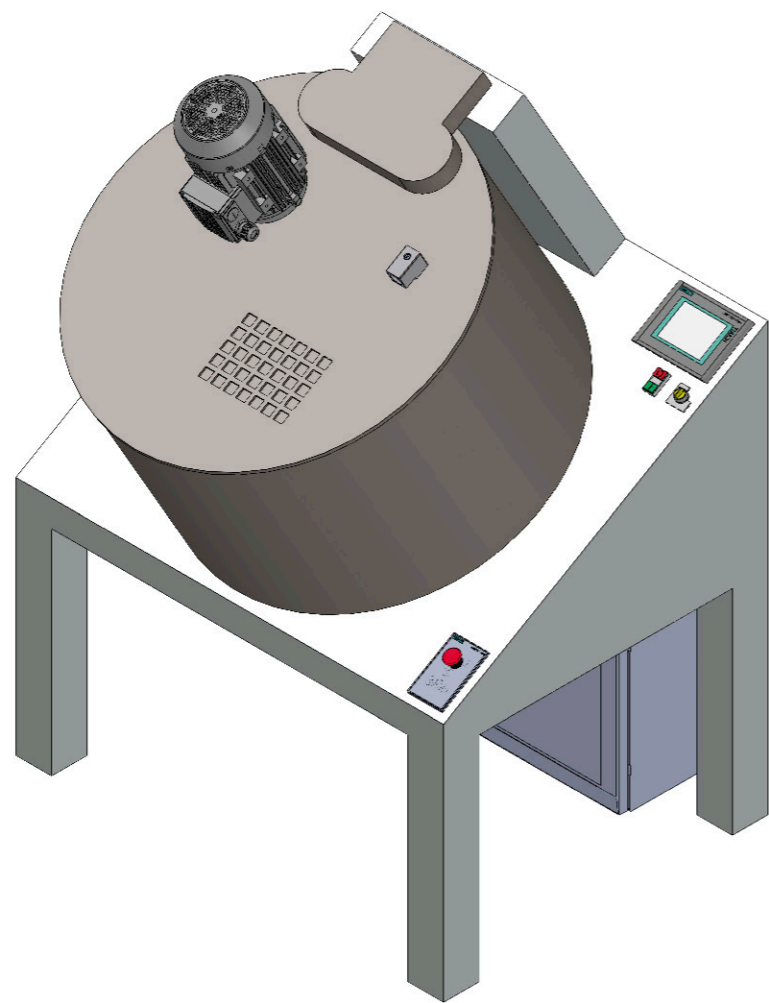
R VERDADERO130



SECCIÓN A-A

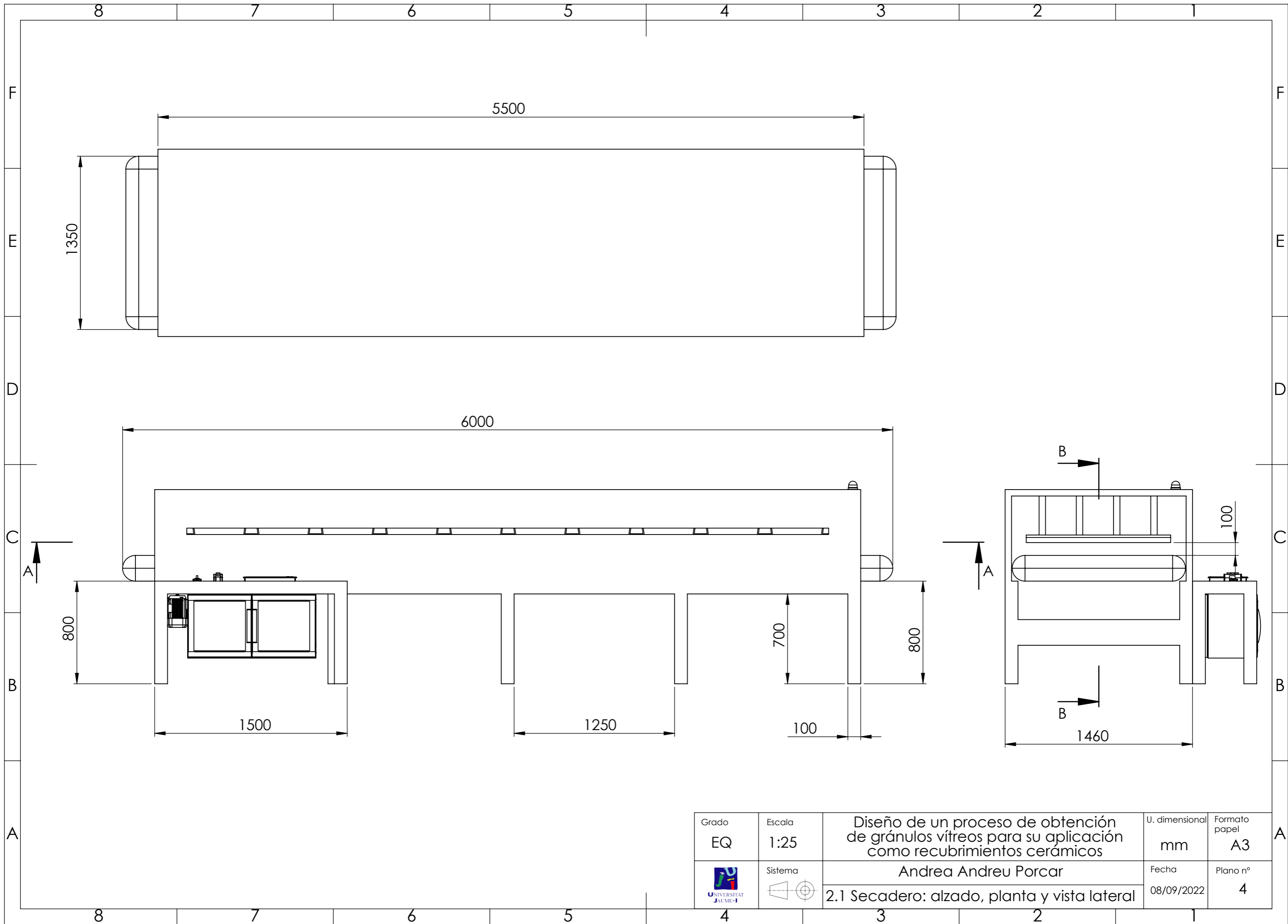
DETALLE C
ESCALA 1 : 5

DETALLE B
ESCALA 1 : 5

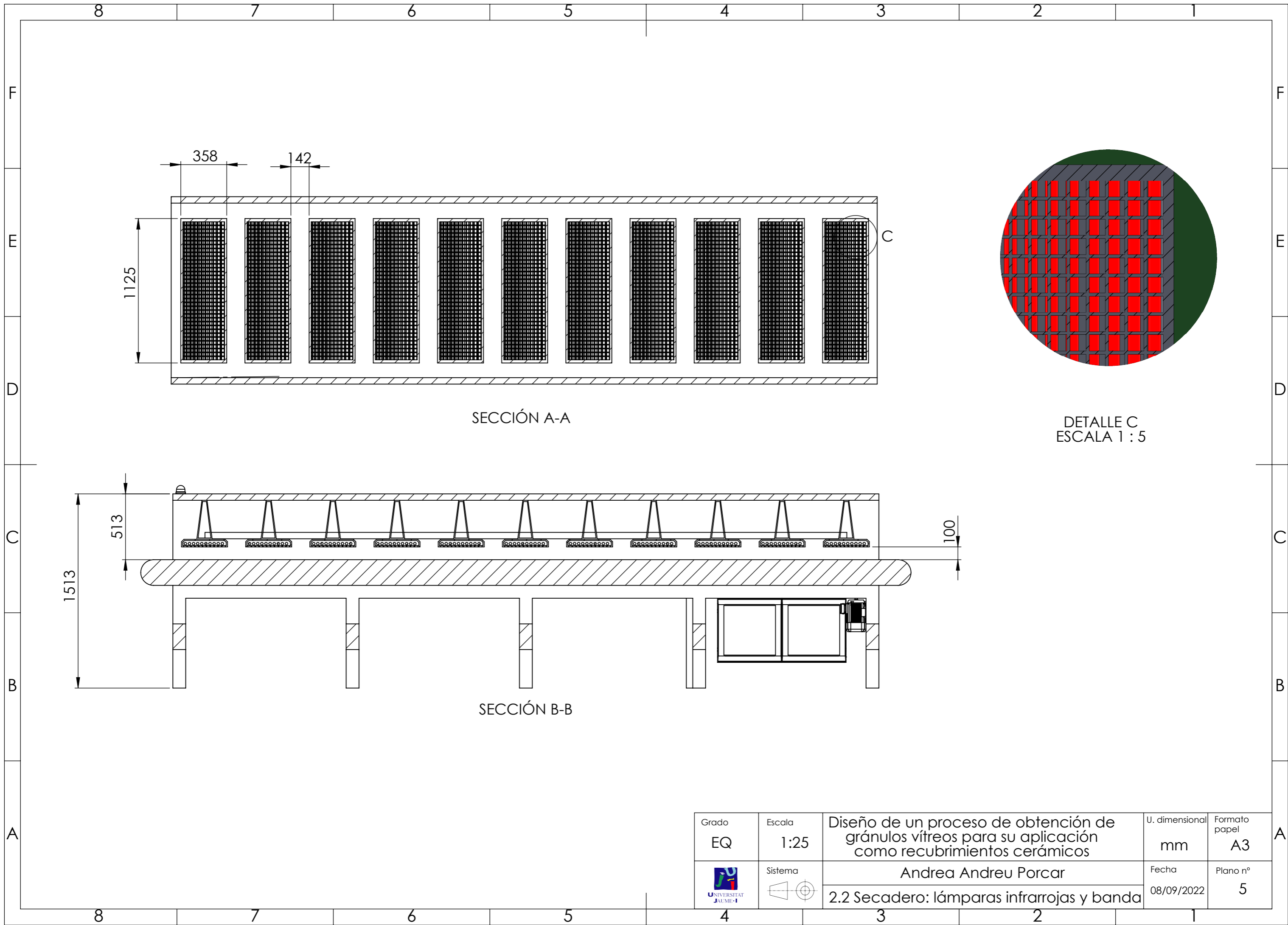
Grado EQ	Escala 1:15	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema 		Fecha 08/09/2022	Plano nº 2
		1.2 Granuladora: rotor y rasqueta		



Grado EQ	Escala 1:15	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
		Andrea Andreu Porcar	Fecha 08/09/2022	Plano nº 3
		1.3 Granuladora: vista isométrica		




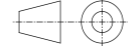
Grado EQ	Escala 1:25	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema 		Fecha 08/09/2022	Plano nº 4
		2.1 Secadero: alzado, planta y vista lateral		

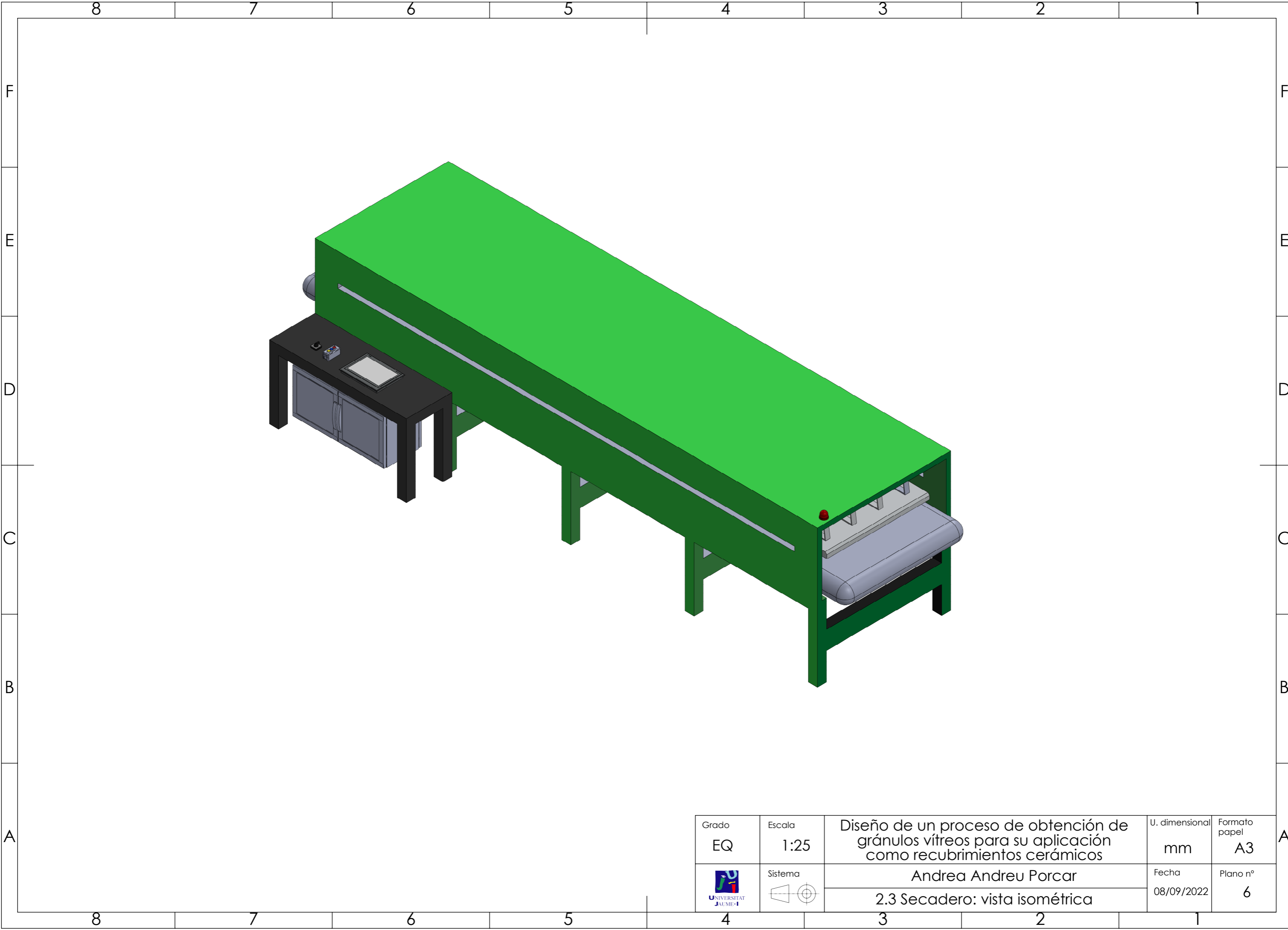
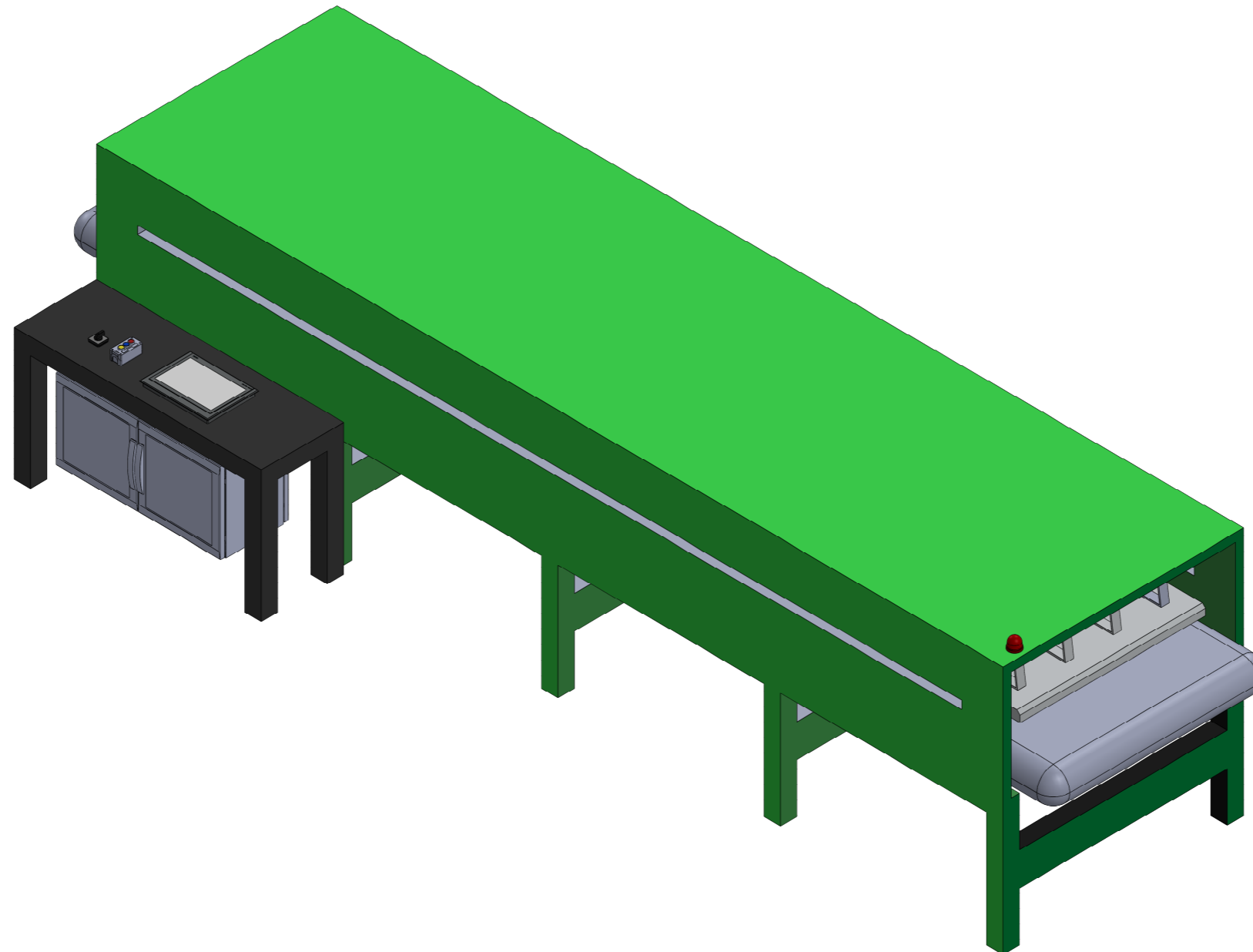



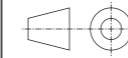
SECCIÓN A-A

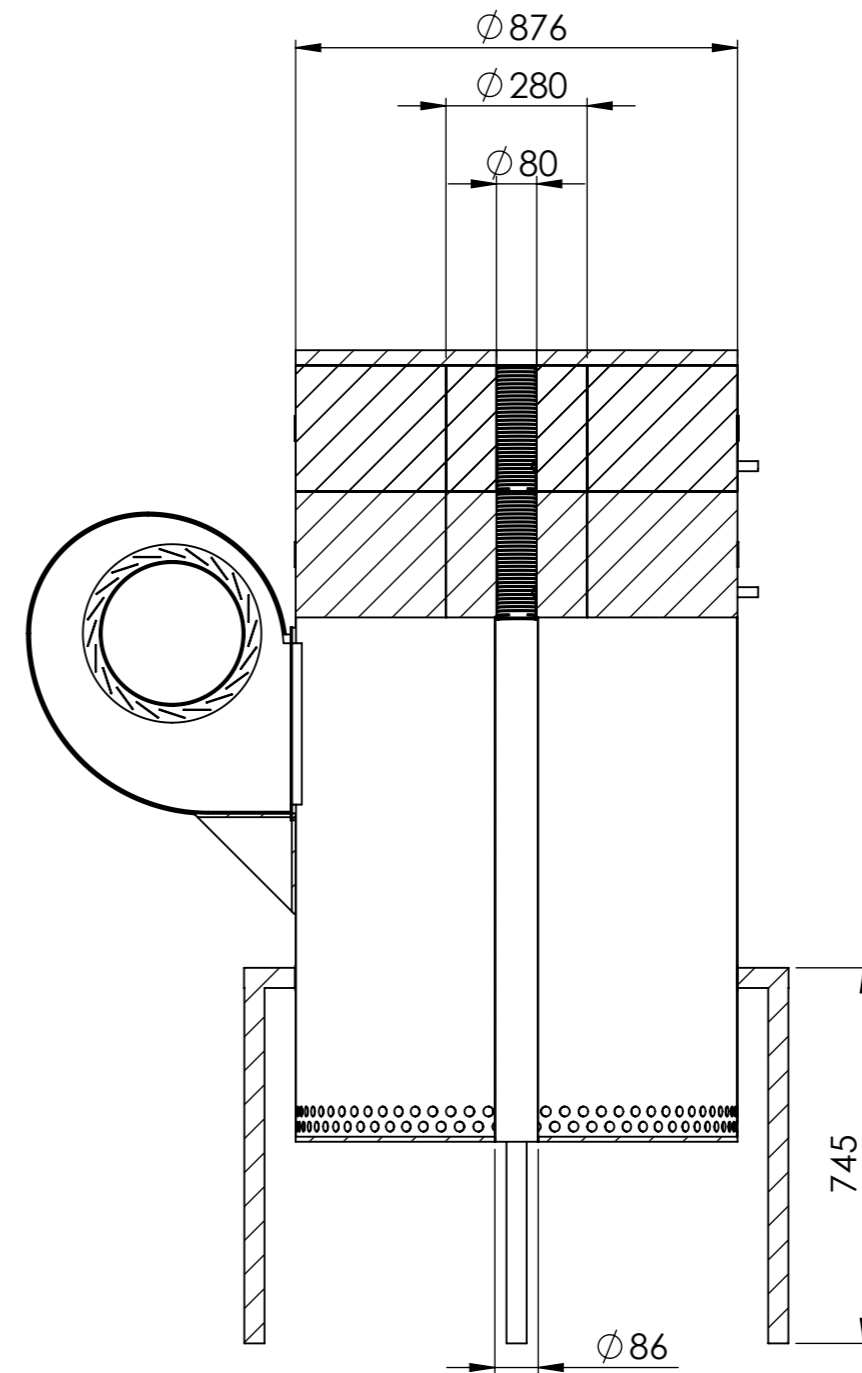
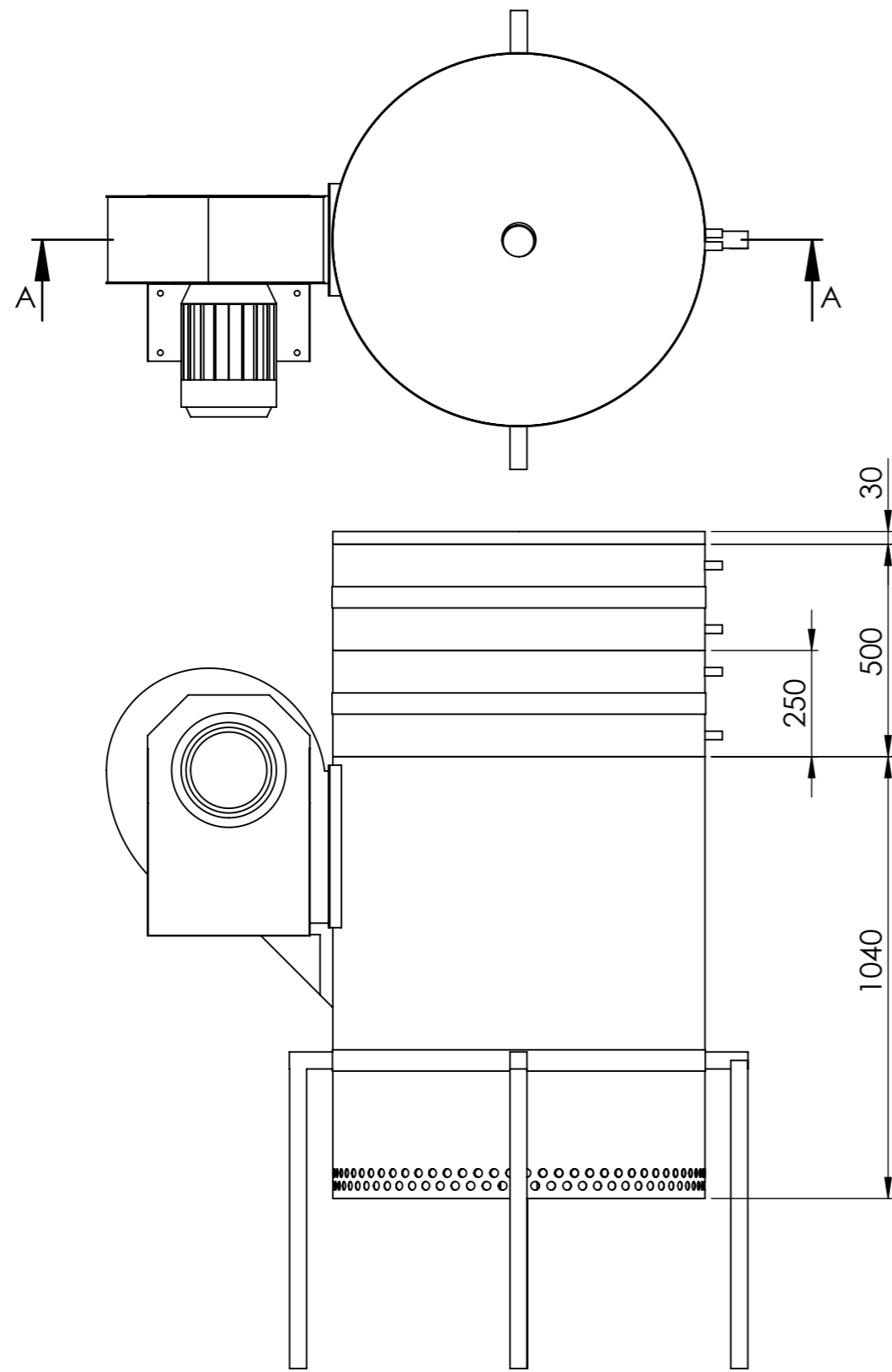
DETALLE C
ESCALA 1 : 5

SECCIÓN B-B

Grado EQ	Escala 1:25	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
	 Sistema		Fecha 08/09/2022	Plano nº 5
		2.2 Secadero: lámparas infrarrojas y banda		

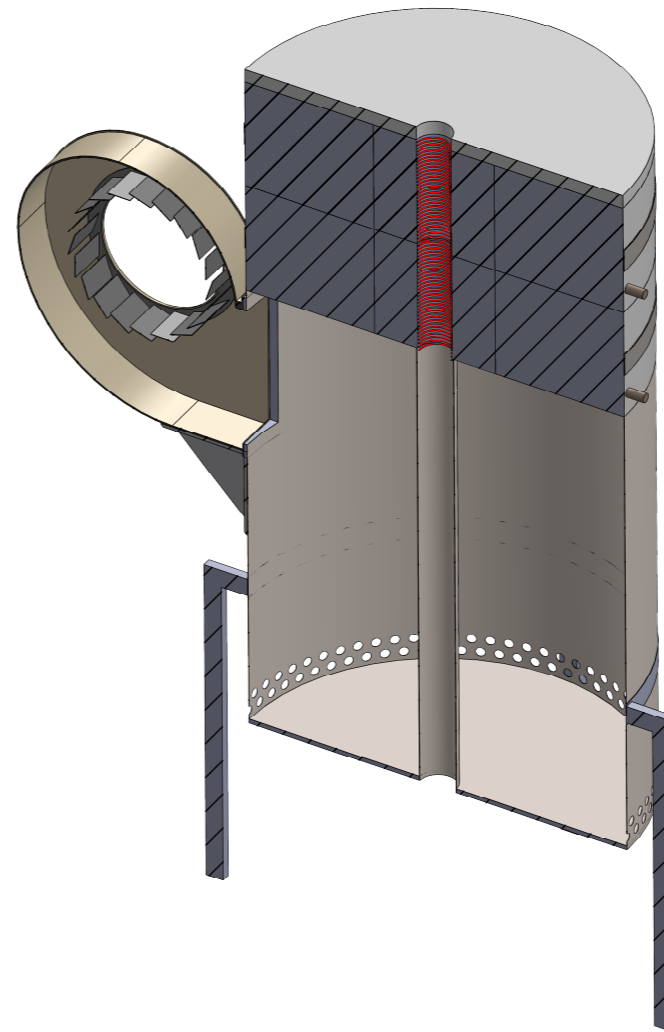
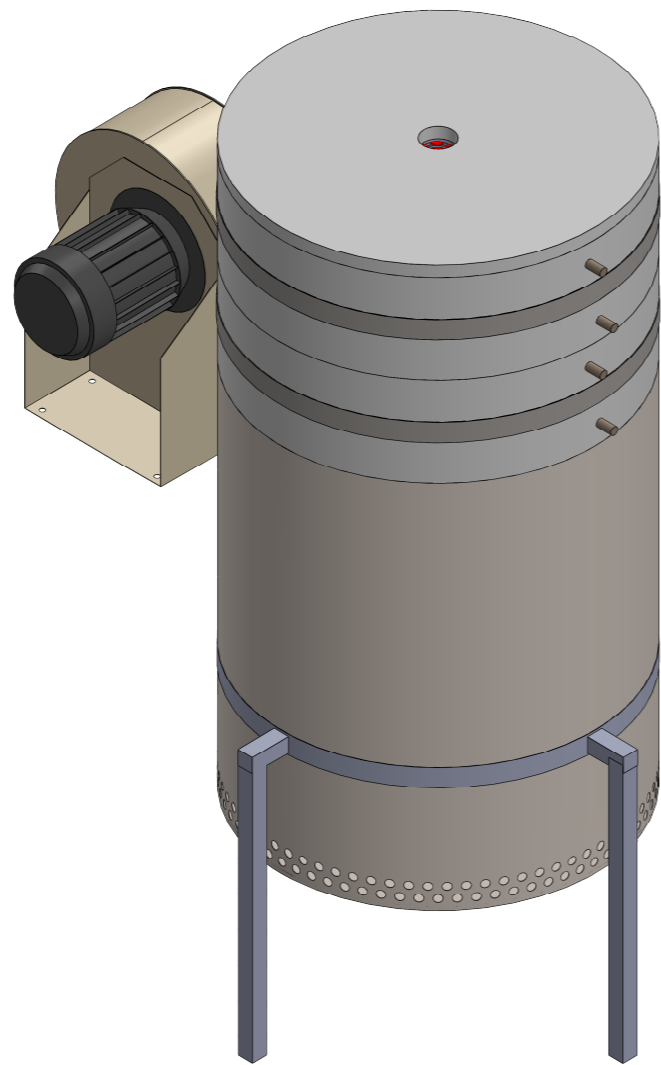



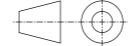
Grado EQ	Escala 1:25	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
		Andrea Andreu Porcar	Fecha 08/09/2022	Plano nº 6
		2.3 Secadero: vista isométrica		



SECCIÓN A-A

Grado EQ	Escala 1:15	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema 		Fecha 08/09/2022	Plano nº 7
		3.1 Horno de fusión vertical		



Grado EQ	Escala 1:15	Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos	U. dimensional mm	Formato papel A3
		Andrea Andreu Porcar	Fecha	Plano nº
		3.2 Horno de fusión vertical: vista isométrica	08/09/2022	8

5. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES	4
1.1. Disposiciones generales.....	4
1.2. Contrato de obra	4
1.2.1. Documentación del contrato de obra.....	4
1.2.2. Formalización del contrato de obra.	5
1.3. Reglamentación urbanística.....	5
1.4. Jurisdicción competente	5
1.5. Causas de rescisión del contrato de obra.....	5
1.6. Efectos de rescisión del contrato de obra	6
2. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS	8
2.1. El promotor.....	8
2.2. El proyectista	8
2.3. El constructor o contratista	9
2.4. El director de obra	9
2.5. Director de ejecución de la obra	9
2.6. Los suministradores de productor.....	9
2.7. El coordinador de seguridad y salud.	10
3. PLIEGO DE CONDICIONES ECONÓMICAS	11
3.1. Contrato de obra	11
3.2. Fianzas	12
3.2.1. Ejecución de trabajos con carga a la fianza.	12
3.3.2. Devolución de las fianzas	12
3.3. Precios	12
 PLIEGO DE CONDICIONES	 2

3.4. Valorización y abono de los trabajos	13
3.4.1. Forma y plazos de abono de las obras	13
3.5. Indemnizaciones	13
3.6. Liquidación final de la obra	13
4. PLIEGO DE CONDICIONES LEGALES	14
5. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES	15

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

1.1. DISPOSICIONES GENERALES

La finalidad de este documento es que se cumpla la ordenación de las condiciones que definen un proyecto, y son facultativas, económicas y técnicas. Estas han de regir en los contratos destinados a la ejecución de los trabajos de obra civil, siempre y cuando se mencione este pliego en cada uno de los particulares de la obra.

1.2. CONTRATO DE OBRA

El presente contrato tiene por objetivo el diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos. Para ello, se recomienda la contratación de la ejecución de las obras por unidades de obra, con arreglo a los documentos del proyecto y en cifras fijas. A tal fin, el director de obra ofrece la documentación necesaria para la realización del contrato de obra.

En el caso del presente proyecto no será necesaria la construcción de la cimentación de la nave industrial, pues trata del montaje de un proceso formado por diversos equipos en una empresa ya existente.

1.2.1. DOCUMENTACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entrega al contratista, pueden tener carácter contractual o meramente informativo. Se entiende como documentos contractuales los Planos, Pliego de Condiciones, cuadros de precios y presupuestos parcial y total, incluidos en el presente proyecto.

Los datos y las marcas comerciales incluidas en la Memoria y Anexos, así como la justificación de precios tienen carácter meramente informativo.

Cualquier cambio de planteamiento de la Obra que implique un cambio sustancial respecto al proyecto deberá ponerse en conocimiento de la Dirección Técnica para que lo apruebe, si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado. El director de Obra ofrece la documentación necesaria para la realización del contrato de obra.

1.2.2. FORMALIZACIÓN DEL CONTRATO DE OBRA.

Los documentos se formalizarán, en general, mediante documento privado, que podrá elevarse a escritura pública, a petición de cualquiera de las partes. El cuerpo de estos documentos contendrá:

- La comunicación de la adjudicación.
- La copia del recibo de depósito de la fianza, en caso de requerimiento.
- La cláusula en la que se exprese, de forma categórica, que el Contratista se obliga al cumplimiento estricto del contrato de obra, conforme a lo previsto en el Pliego de Condiciones, junto con la Memoria y Anexos, el Estado de Mediciones, Presupuestos, Planos y todos los documentos que han de servir de base para la realización de las obras definidas en el presente Proyecto.

1.3. REGLAMENTACIÓN URBANÍSTICA

La obra a construir se ajustará a todas las limitaciones del proyecto aprobado por los organismos competentes, especialmente las que se refieren al volumen, alturas, emplazamiento y ocupación del terreno, así como todas las condiciones de reforma del proyecto que pueda exigir la Administración para ajustarlo a las Ordenanzas, a las Normas y al Planteamiento Vigente.

1.4. JURISDICCIÓN COMPETENTE

En el caso de no llegar a acordarse las diferencias surgidas entre las partes implicadas, ambas se deben someter a discusión de todas las cuestiones derivadas de su contrato a las Autoridades y Tribunales Administrativos con arreglo a la legislación vigente, renunciando al derecho común y al privilegio de su domicilio, siendo competente la jurisdicción de Castellón de la Plana.

1.5. CAUSAS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

Las causas consideradas suficientes de rescisión de contrato son las siguientes:

- Muerte o incapacitación del contratista.
- Quiebra del contratista.

Distintas causas de alteración del contrato:

La modificación del proyecto en forma tal que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio del director de obra y siempre que la variación del Presupuesto de Ejecución del Material represente una desviación mayor del 20%, como consecuencia de estas modificaciones.

Las modificaciones de unidades de obra, siempre que representen variaciones en más o menos del 40% del proyecto original, o más de un 50% de unidades de obra del proyecto reformado.

La suspensión de la obra comenzada, siempre que el plazo de suspensión haya excedido de un año y en todo caso, siempre que por causas ajenas al contratista no se da el comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación. En este caso, la devolución de la fianza será automática.

La suspensión de la iniciación de las obras por plazo superior a cuatro meses.

Que el contratista no comience los trabajos dentro del plazo señalado en el contrato.

La demora injustificada en la comprobación del replanteo.

La suspensión de las obras por plazo superior a ocho meses por parte del promotor.

El incumplimiento de las condiciones del contrato cuando implique descuido o mala fe, con perjuicio de los intereses de las obras.

El vencimiento del plazo de ejecución de la obra.

El desistimiento o el abandono de la obra sin causas justificadas.

1.6. EFECTOS DE RESCISIÓN DEL CONTRATO DE OBRA

La resolución del contrato conlleva la comprobación, medición y liquidación de las obras realizadas con arreglo al proyecto, fijando los saldos pertinentes a favor o en contra del contratista.

Si se demorase injustificadamente la comprobación del replanteo, dando lugar a la resolución del contrato, el contratista sólo tendrá derecho por todos los conceptos a una indemnización equivalente al 2% del precio de la adjudicación, excluidos los impuestos.

En el supuesto de desistimiento antes de la iniciación de las obras, o de suspensión de la iniciación de estas por parte del promotor por plazo superior a cuatro meses, el contratista

tendrá derecho a percibir por todos los conceptos una indemnización del 3% del precio de adjudicación, excluidos los impuestos.

Una vez iniciada la ejecución de las obras, o de suspensión de las obras iniciadas por plazo superior a ocho meses, el contratista tendrá derecho por todos los conceptos al 6% del precio de adjudicación del contrato de las obras dejadas de realizar en concepto de beneficio industrial, excluidos los impuestos.

2. PLIEGO DE CONDICIONES FACULTATIVAS

Las condiciones facultativas describen y regulan las relaciones entre la Contrata, la propiedad y la Dirección Facultativa derivada de la ejecución técnica de las obras.

Las atribuciones de los distintos agentes intervinientes en la edificación son las reguladas por la “Ley 38/1999 – Ley de Ordenación de la Edificación (LOE)”.

Seguidamente se describe la función de cada uno de los agentes intervinientes en la edificación.

2.1. EL PROMOTOR

El promotor es la persona física o jurídica, pública o privada, que individual o colectivamente decide, impulsa, programa y financia con recursos propios o ajenos, las obras de edificación para sí o para su posterior enajenación, entrega o cesión a terceros bajo cualquier título.

Asume la iniciativa de todo el proceso de la obra, impulsando la gestión necesaria para llevar a cabo la obra inicialmente proyectada, y se hace cargo de todos los costes necesarios.

Según la legislación vigente, a la figura del promotor se equiparán también las de gestor de sociedades cooperativas, comunidades de propietarios, u otras análogas que asumen la gestión económica de la edificación.

Los promotores de este proyecto, al tratarse de un trabajo final de grado, son los entes físicos que han realizado la petición de la realización de este, por lo tanto, se puede establecer a la comisión académica del título como promotor del mismo.

2.2. EL PROYECTISTA

El proyectista es el agente que redacta el proyecto por encargo del promotor y con sujeción a la normativa técnica y urbanística correspondiente. Tiene las siguientes obligaciones:

Redactar el proyecto conforme a lo descrito anteriormente, conteniendo la documentación necesaria tanto para tramitar las licencias y permisos administrativos como para ser interpretada y poder ejecutar totalmente la obra, entregando al promotor las copias autorizadas correspondientes, debidamente visadas por su colegio profesional.

Acordar con el promotor la contratación de colaboraciones parciales de otros técnicos profesionales.

Ostentar la propiedad intelectual de su trabajo, tanto de la documentación escrita como de los cálculos de cualquier tipo, así como de los planos contenidos en la totalidad del proyecto y cualquiera de sus documentos complementarios.

2.3. EL CONSTRUCTOR O CONTRATISTA

Es el agente que asume, contractualmente ante el promotor, el compromiso de ejecutar con medios humanos y materiales, propios o ajenos, las obras o parte de las mismas con sujeción al proyecto y al contrato de obra.

Cabe mencionar especialmente que la ley señala como responsable explícito de los vicios o defectos constructivos al contratista general de la obra, sin perjuicio del derecho de repetición de éste hacia los subcontratistas.

2.4. EL DIRECTOR DE OBRA

Es el agente que, formando parte de la dirección facultativa, dirige el desarrollo de la obra en los aspectos técnicos, estéticos, urbanísticos y medioambientales, de conformidad con el proyecto que la define, la licencia de edificación y demás autorizaciones perceptivas, y las condiciones del contrato, con el objeto de asegurar su adecuación al fin propuesto.

2.5. DIRECTOR DE EJECUCIÓN DE LA OBRA

Es el agente que asume la función técnica de dirección de la ejecución material de la obra, y forma parte de la dirección facultativa. Además, controla cualitativa y cuantitativamente la construcción y calidad de la instalación.

Para ello, el requisito indispensable es el estudio y análisis previo del proyecto de ejecución una vez redactado por el ingeniero, procediendo a solicitarle, con antelación al inicio de las obras, todas aquellas aclaraciones, subsanaciones o documentos complementarios que, dentro de sus competencias y atribuciones legales, estimara necesarios para poder dirigir de manera solvente la ejecución de estas.

2.6. LOS SUMINISTRADORES DE PRODUCTOR

Se consideran suministradores de productos los fabricantes, almacenistas, importadores o vendedores de productos de construcción y accesorios. Son los encargados de realizar las entregas de los productos de acuerdo con las especificaciones del pedido, respondiendo de su origen, identidad y calidad, así como del cumplimiento de las exigencias que, en su caso, establezca la normativa técnica aplicable.

Asimismo, facilitan las instrucciones de uso y mantenimiento de los productos suministrados, así como las garantías de calidad correspondientes, para su inclusión en la documentación de la obra ejecutada.

2.7. EL COORDINADOR DE SEGURIDAD Y SALUD.

El coordinador de seguridad y salud deberá desarrollar las siguientes funciones durante la ejecución de la obra:

Coordinar la aplicación de los principios generales de prevención y de seguridad.

Coordinar las actividades de la obra para garantizar que los contratistas, subcontratistas y los trabajadores autónomos utilicen de manera coherente y responsable los principios de la acción preventiva que se recogen en el artículo 15 de la Ley Preventiva.

Aprobación del plan de seguridad y salud elaborado por el contratista.

Coordinar las acciones y funciones de control de la aplicación correcta de los métodos de trabajo.

Adoptar las medidas necesarias para que sólo las personas autorizadas puedan acceder a la obra.

Justificar la capacidad suficiente de medios materiales y humanos necesarios para realizar adecuadamente los trabajos contratados, en su caso, a través de la correspondiente acreditación oficial otorgada por la Comunidad Valenciana.

3. PLIEGO DE CONDICIONES ECONÓMICAS

Las condiciones económicas fijan el marco de relaciones económicas para el abono y recepción de la obra. Puesto que el trabajo se ha realizado con carácter académico, no se tiene previsto el pago de ninguna cantidad económica; sin embargo, para la correcta realización de este apartado se supone que no es de carácter académico.

3.1. CONTRATO DE OBRA

Se aconseja que se firme el contrato de obra, entre el promotor y el contratista, antes de iniciarse las obras, evitando en la medida de lo posible la realización de la obra por administración. A la Dirección Facultativa (director de obra y director de ejecución de la obra) se le facilitará una copia del contrato de obra, para poder certificar en los términos pactados.

El contrato de obra deberá prever las posibles interpretaciones y discrepancias que pudieran surgir entre las partes, así como garantizar que la Dirección Facultativa pueda, de hecho, coordinar, dirigir y controlar la obra, por lo que es conveniente que se especifiquen y determinen con claridad, como mínimo, los siguientes puntos:

- Documentos a aportar por el contratista.
- Condiciones de ocupación del terreno e inicio de las obras.
- Determinación de los gastos de enganches y consumos.
- Responsabilidades y obligaciones del contratista: Legislación laboral.
- Responsabilidades y obligaciones del promotor.
- Presupuesto del contratista.
- Revisión de precios.
- Forma de pago: Certificaciones.
- Plazos de ejecución: *planning*.
- Retraso de la obra: Penalizaciones.
- Recepción de la obra: Provisional y definitiva.
- Litigio entre las partes.

Todos los agentes que intervienen en el proceso de la construcción, definidos en la “Ley 38/1999. Ley de Ordenación de la Edificación”, tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas, pudiendo exigirse recíprocamente las garantías suficientes para el cumplimiento diligente de sus obligaciones de pago.

3.2. FIANZAS

El contratista prestará una fianza con arreglo al procedimiento que se estipule en el contrato de obra.

3.2.1. EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON CARGA A LA FIANZA.

Si el contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas, el director de obra, en nombre y representación del promotor, los ordenará ejecutar a un tercero, o podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza depositada, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el promotor, en el caso de que el importe de la fianza no bastase para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

3.3.2. DEVOLUCIÓN DE LAS FIANZAS

La fianza recibida será devuelta al contratista en un plazo establecido en el contrato de obra, una vez firmada el Acta de Recepción Definitiva de la obra. El promotor podrá exigir que el contratista le acredite la liquidación y finiquito de sus deudas causadas por la ejecución de la obra, tales como salarios, suministros y subcontratos.

3.3. PRECIOS

El objetivo principal de la elaboración del presupuesto es anticipar el coste del proceso de construir la obra. Se descompondrá el presupuesto en unidades de obra, componente menor que se contrata y certifica por separado, y basándonos en esos precios, calcularemos el presupuesto.

Si el contratista, antes de la firma del contrato de obra, no hubiese realizado la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.

3.4. VALORIZACIÓN Y ABONO DE LOS TRABAJOS

3.4.1. FORMA Y PLAZOS DE ABONO DE LAS OBRAS

Se realizará por certificaciones de obra y se recogerán las condiciones en el contrato de obra establecido entre las partes que intervienen (promotor y contratista).

Los pagos se efectuarán por el promotor en los plazos previamente establecidos en el contrato de obra, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de la obra conformadas por el director de ejecución de la obra, en virtud de las cuáles se verifican aquéllos.

Para las obras o partes de obra que, por sus dimensiones y características, hayan de quedar posterior y definitivamente ocultas, el contratista está obligado a avisar al director de ejecución de la obra con la suficiente antelación, a fin de que éste pueda realizar las correspondientes mediciones y toma de datos, levantando los planos que las definan, cuya conformidad suscribirá el contratista.

3.5. INDEMNIZACIONES

La indemnización por retraso en la terminación se establecerá en un porcentaje del importe total de los trabajos contratados o cantidad fija, que deberá indicarse en el Contrato suscrito entre Contratista y Promotor, por cada día natural de retraso, contados a partir del día de terminación fijado en el Calendario de obra. Las sumas resultantes se descontarán y retendrán con cargo a la fianza o a la retención.

3.6. LIQUIDACIÓN FINAL DE LA OBRA

Entre el promotor y contratista, la liquidación de la obra deberá hacerse de acuerdo con las certificaciones conformadas por la Dirección de Obra. Si la liquidación se realizara sin el visto bueno de la Dirección de Obra, ésta sólo mediará, en caso de desavenencia o desacuerdo, en el recurso ante los Tribunales.

4. PLIEGO DE CONDICIONES LEGALES

En el reconocimiento de marcas registradas: el autor de este proyecto, así como su promotor, reconocen las marcas registradas que han aparecido a lo largo del desarrollo y ejecución del documento.

Respecto a los derechos de autor, serán los estipulados por la legislación y reglamentación vigente en el momento del comienzo del proyecto, a excepción de posibles correcciones legales resultantes de los recursos legales que se hayan interpuesto contra las mencionadas leyes y reglamentos.

5. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES

El objeto del presente documento es reflejar los requisitos técnicos básicos para realizar la puesta en marcha de los equipos necesarios para granular y fundir gránulos de una composición de frita cerámica.

Todas las partes de la maquinaria que deben estar en contacto con la materia prima, serán de material inalterable, con la superficie lisa y fácil de limpiar. De la misma manera, el exterior de la maquinaria deberá estar esmaltado o cubierto de materia inalterable y sin ángulos entrantes que impidan una limpieza perfecta.

En el caso de tener partes móviles deberán estar provistos de los debidos dispositivos de protección para el manejo del operador. Si en condiciones de trabajo normales una máquina, con fuerza de acondicionamiento suficiente y manejada de acuerdo con las instrucciones, no diera el rendimiento garantizado, se comunicará a la casa vendedora para que comunique las deficiencias y haga las modificaciones oportunas. Si en el plazo de un mes, estas deficiencias no fueran subsanadas, la casa se hará cargo de la maquinaria, puesta, embalada en la estación más próxima a la residencia del cliente, devolviendo el mismo importe que haya pagado, o suministrándole a elección de éste, en sustitución de la maquinaria retirada, otra de rendimiento correcto.

Será tarea de la casa suministradora el transporte, embalaje, derechos y aduanas, riesgos, seguros e impuestos hasta que la maquinaria se encuentre en el lugar de su emplazamiento. El montaje será por cuenta de la casa vendedora, si bien el promotor proporcionará las escaleras, instalación eléctrica, herramienta gruesa y material de albañilería albañilería, carpintería y cerrajería necesaria para el montaje, así como personal auxiliar para ayudar al especializado que enviará la empresa suministradora.

Las instalaciones eléctricas serán ejecutadas por una empresa especializada, cumpliendo todos los requisitos que establece la legislación vigente. Por otro lado, la documentación acreditativa será presentada por el director de obra para que pueda emitir la oportuna autorización de comienzo de los trabajos.

El personal que intervenga en la ejecución de cualquier instalación eléctrica, aunque sea accesoria, deberá estar en posesión de los oportunos certificados de calificación profesional.

Será condición necesaria para que la dirección autorice su intervención en los trabajos, la entrega de una copia, autenticada por la empresa especializada, de los certificados mencionados, así como la justificación de estar de alta en el Libro de Matrícula.

6. ESTADO DE MEDICIONES

ÍNDICE ESTADO DE MEDICIONES

1. ESTADO DE MEDICIONES	3
1.1. Equipos	3

1. ESTADO DE MEDICIONES

Dentro del Estado de Mediciones se reflejan todas aquellas las partidas que tienen influencia directa en el presupuesto final del proyecto y que son una realidad física. De este modo, la única partida que cumple estos requisitos es la partida Equipos.

1.1. EQUIPOS

En la Tabla E. 1.1 se muestran los diferentes equipos que conforman el presente proyecto.

Tabla E. 1.1. Equipos del proyecto.

Equipo	Unidades
Carro de transporte	4
Silo babyrac (6 m ³)	5
Eurosilo (7,5 m ³)	1
Eurosilo (21 m ³)	1
Tanque agitado	1
Granuladora	1
Secadero por infrarrojos	1
Vibrotamiz	1
Silo de descarga de base plana	5
Hornos de fusión vertical	5
Crisol de recogida de gránulos	5

Resulta conveniente desglosar aquellos equipos diseñados que constan de diferentes elementos constructivos y accesorios.

El primer equipo a desglosar es la granuladora, que se muestra en la Tabla E. 1.2.

Tabla E. 1.2. Elementos constructivos de la granuladora.

Granuladora- Equipo	Unidades
Motor 3 kW	1
Motorreductor	1
Motor 15 kW	1
Variador de frecuencia	1
Pulverizador	1
Componentes de acero a medida	1
Envolvente eléctrica	1
Pack botones y pulsadores	1
Pantalla de Control	1

El segundo equipo diseñado y que puede dividirse en varios elementos constructivos, detallados en la Tabla E. 1.3 es el secadero por infrarrojos.

Tabla E. 1.3. Elementos constructivos del secadero por infrarrojos.

Secadero por Infrarrojos - Equipo	Unidades
Lámparas IR de onda media	11
Banda Sinfín y Motorreductor	1
Estructura	1

Por último, cada horno de fusión vertical está formado por diversos elementos constructivos, descritos en la Tabla E. 1.4.

Tabla E. 1.4. Elementos constructivos del horno de fusión vertical.

Horno de Fusión Vertical - Equipo	Unidades
Tubo aislante entrada al horno	1
Módulo calefactor	2
Manta aislante adicional	1
Tubo acero inoxidable	1
Ventilador	1
Estructura	1

7. PRESUPUESTO

ÍNDICE PRESUPUESTO

1.	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	3
1.1.	PEM parcial	3
1.1.1.	Equipos.....	3
1.1.2.	Mano de obra.....	5
1.1.3.	Licencias.....	5
1.2.	PEM total	5
2.	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	6
3.	PRESUPUESTO TOTAL	6

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)

1.1. PEM PARCIAL

El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) del proyecto “Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos” tiene en cuenta los costes que derivan del diseño, montaje y desarrollo de los equipos que intervienen en el proceso, por lo que consta de tres partidas: los equipos, la mano de obra y las licencias.

1.1.1. EQUIPOS

En este apartado se tiene en cuenta el coste de todos los equipos individuales, detallados en la Tabla P 1.1.

Tabla P. 1.1. Presupuesto de los equipos del proceso.

Equipo	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Carro de transporte	4	416,00	1664,00
Silo babyrac (6 m ³)	5	2100,00	10.500,00
Eurosilo (7,5 m ³)	1	3500,00	3.500,00
Eurosilo (21 m ³)	1	4.700,00	4.700,00
Tanque agitado	1	1.600,00	1.600,00
Granuladora	1	12.762,00	12.762,00
Secadero por infrarrojos	1	11.720,00	11.720,00
Vibrotamiz	1	17.000,00	17.000,00
Silo de descarga de base plana	5	2.500,00	12.500,00
Hornos de fusión vertical	5	10.228,00	51.140,00
Crisol de recogida de gránulos	5	70,00	350,00
TOTAL EQUIPOS			127.436,00 €

De estos equipos, el precio del carro de transporte, de los silos, del tanque agitado, del vibrotamiz y del crisol han sido proporcionados por los distribuidores de los equipos. En el precio unitario del silo de descarga de base plana se ha tenido en cuenta el diseño a medida y la fabricación en acero inoxidable AISI 316. Puede desglosarse en componentes individuales el coste de la granuladora, el del secadero por infrarrojos y el del horno de fusión vertical.

La Tabla P. 1.2 se detalla el desglose de los componentes y los precios de la granuladora de alta cizalla.

Tabla P. 1.2. Componentes y precio de la granuladora.

Granuladora- Equipo	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Motor 3 kW	1	405,00	405,00
Motorreductor	1	105,00	105,00
Motor 15 kW	1	678,00	678,00
Variador de frecuencia	1	375,00	375,00
Pulverizador	1	78,00	78,00
Componentes de acero a medida	1	9000,00	9000,00
Envolvente eléctrica	1	1291,00	1291,00
Botones y pulsadores	1	230,00	230,00
Pantalla de Control	1	600,00	600,00
TOTAL GRANULADORA			12.762,00 €

La Tabla P. 1.3 detalla el desglose de los componentes y los precios del secadero por infrarrojos.

Tabla P. 1.3. Componentes y precio del secadero por infrarrojos.

Secadero por Infrarrojos - Equipo	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Lámparas IR de onda media	11	220	2420,00
Banda Sinfín y motorreductor	1	7500,00	7500,00
Estructura	1	1800,00	1800,00
TOTAL SECADERO POR INFRARROJOS			11.720,00 €

La Tabla P. 1.4 detalla el desglose de los componentes y los precios de un horno de fusión vertical.

Tabla P 1.4. Componentes y precio del horno de fusión vertical.

Horno de Fusión - Equipo	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Tubo aislante entrada al horno	1	70,00	70,00
Módulo calefactor	2	4500,00	9.000,00
Manta Aislante Adicional	1	90,00	90,00
Tubo Acero Inoxidable	1	64,00	64,00
Ventilador	1	1054,00	1054,00
Estructura	1	950,00	950,00
TOTAL HORNO DE FUSIÓN			11.228,00 €

1.1.2. MANO DE OBRA

La partida Mano de Obra , que no aparece en el documento *Estado de Mediciones*, pero si supone un gasto necesario para llevar a cabo el proyecto, hace referencia al coste que supone el montaje y puesta en marcha de los diferentes equipos. El cálculo de esta partida es una estimación que según el *Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de la Comunidad Valenciana* es el 15 % del precio de los equipos del proyecto, es decir, de la partida *Equipos*. En la Tabla P. 1.5. se detalla el gasto de esta partida.

Tabla P. 1.5. Presupuesto Mano de Obra.

Descripción	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Mano de obra	1	1	19.115,40
TOTAL MANO DE OBRA			19.115,40 €

1.1.3. LICENCIAS

La última partida del PEM del proyecto es Licencias empleadas para el desarrollo del proyecto. Estas se refieren al pago licencias de programas utilizados e ingeniería y otras inversiones, como la patente del proceso. Se estima que esto es el 10 % de la inversión inicial alcanzada hasta el momento. En la Tabla P. 1.6 se detalla el gasto de esta partida.

Tabla P. 1.6. Presupuesto Licencias.

Descripción	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Coste total (€)
Licencias	1	14.655,14	14.655,14
TOTAL LICENCIAS			14.566,14 €

1.2. PEM TOTAL

Al conocer el valor de las partidas individuales que componen el PEM puede calcularse el PEM total del proyecto como la suma de todas ellas, esto queda desglosado en la Tabla P. 1.7.

Tabla P 1.7. Presupuesto Ejecución Material.

Partida	Coste total (€)
Equipos	127.436,00
Mano de Obra	19.155,40
Licencias	14.655,14
PEM TOTAL	161.206,54 €

2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)

Una vez calculado el PEM total, puede calcularse el PEC. Este se calcula teniendo en cuenta el PEM, los gastos generales y cargas fiscales y el beneficio industrial. Estos se considera que corresponden un 20 % y un 6 % respectivamente del PEM total.

Sumando todos estos valores en la Tabla P. 2.1 se puede obtener el PEC.

Tabla P. 2.1. Presupuesto de Ejecución por Contrata.

Descripción	Coste total (€)
Presupuesto de Ejecución Material	161.206,54
Gastos Generales	32.241,31
Beneficio Industrial	9.672,39
PEC TOTAL	203.120,24 €

3. PRESUPUESTO TOTAL

Para conocer el valor del Presupuesto Total debe añadirse al PEC el IVA (el 21 % de este) y además la dirección de la obra (un 7 % del PEC). El coste total del proyecto se puede observar en la Tabla P. 3.1.

Tabla P. 3.1. Presupuesto Total

Descripción	Coste total (€)
Presupuesto de Ejecución por Contrata	203.120,24
IVA	42.655,25
Dirección de la Obra	14.218,42
PRESUPUESTO TOTAL	259.993,91 €

De este modo el presupuesto total del “Diseño de un proceso de obtención de gránulos vítreos para su aplicación como recubrimientos cerámicos asciende a DOSCIENTOS CINCUENTA Y NUEVE MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y TRES EUROS CON NOVENTA Y UN CÉNTIMOS.

