

# UCUENCA

**Universidad de Cuenca**

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Industrial

**Condiciones de operación óptimas para el proceso de atomización de polvo  
en la producción de cerámica gres y porcelanato**


Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniera  
Industrial

**Autor:**

María Lisbeth Ponce Pico

**Director:**

Milton Francisco Barragán Landy

ORCID:  0000-0003-4623-6150

**Cuenca, Ecuador**

2024-10-02

### Resumen

La presente investigación analiza las condiciones de operación del proceso de barbotina y polvo atomizado en la industria cerámica para optimizar la eficacia operativa y ofrecer un producto de calidad. El objetivo del trabajo es establecer condiciones óptimas para minimizar los índices de punto negro en la fabricación de baldosas, enfocándose en el área de molienda y atomización de la empresa objeto de estudio. La metodología incluyó una revisión sistemática de la literatura para identificar medidas de control, se diseñó un modelo experimental mediante la metodología Taguchi para validar las correlaciones de las especificaciones requeridas. Los principales resultados indican que se logró una configuración óptima en las áreas de molienda y atomización, las baldosas de color claro presentan un mayor índice de punto negro (0,19% de hierro retenido), logrando así identificar la importancia de considerar las variables de manera integral para optimizar el proceso, comprendiendo la cadena de valor de la industria cerámica.

*Palabras clave del autor:* condiciones de operación, medidas de control, factores, punto negro, especificaciones



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

The present research analyzes the operating conditions of the slip and atomized powder process in the ceramic industry in order to optimize the operating efficiency and offer a quality product. The objective of the work is to establish optimal conditions to minimize black spot rates in the manufacture of ceramic tiles, focusing on the grinding and atomization area of the EOE. The methodology included a systematic review of the literature to identify control measures in the ceramic industry, and an experimental model was designed using the Taguchi methodology to validate the correlations of the required specifications, for which information was collected through interviews with personnel and laboratory tests to improve operating conditions. The main results indicate that the light-colored tiles have a higher black point index and an optimum configuration was achieved in the grinding and atomization areas, resulting in 0.19% of retained iron, thus identifying the importance of considering the variables in an integral manner to optimize the process, understanding the value chain of the ceramic industry.

*Author Keywords:* operating conditions, control measures, factors, black spot, specifications



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

1. Introducción .....	10
2. Objetivos.....	12
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos específicos .....	12
2.3 Preguntas de investigación .....	12
3. Marco Teórico.....	13
3.1 Pasta Barbotina .....	13
3.2 Secado por pulverización.....	14
3.2.1 Tipos de atomizadores.....	16
3.2.2 Variaciones de las características físicas del polvo atomizado .....	17
3.3 Factores que afectan la calidad de la cerámica. ....	19
3.3.1 Porcentaje de humedad.....	19
3.3.2 Distribución granulométrica.....	19
3.3.3 Densidad .....	19
3.3.4 Viscosidad .....	20
3.4 Punto negro .....	20
3.5 Herramientas de control de calidad en la producción de cerámica.....	20
3.5.1 Diagrama de Ishikawa .....	20
3.5.2 Diagrama de Pareto.....	21
3.5.3 Diagrama de Tortuga .....	21
3.5.4 Diseño de experimentos.....	22
3.5.5 Metodología Taguchi .....	22
3.6 Descripción de la empresa.....	24
3.7 Proceso de producción de cerámica .....	25
3.7.1 Patio recepción de materias primas .....	25
3.7.2 Dosificación y molienda .....	26
3.7.3 Atomizado.....	26
3.7.4 Prensado .....	26
4. Metodología .....	28
4.1 Recolección de datos.....	29
4.2 Fases de proceso metodológico .....	29
4.2.1 Fase 1: Conocer el proceso productivo.....	30

4.2.2	Fase 2: Evaluación y validación de metodología.....	30
4.2.3	Fase 3: Diseño experimental .....	31
5.	Resultados y discusión .....	32
5.1	Fase 1: Reconocimiento de la cadena de valor.....	32
5.1.1	Recepción de materia prima .....	33
5.1.2	Dosificación y molienda .....	33
5.1.3	Proceso de atomización de polvo .....	34
5.2	Fase 2: Evaluación de Causas .....	35
5.2.1	Recolección de información en el análisis Causa-Efecto .....	35
5.2.2	Contraste de causas .....	36
5.3	Fase 3: Ejecución del diseño experimental .....	39
5.3.1	Factores designados para el estudio .....	40
5.3.2	Material de estudio para el diseño experimental .....	40
5.3.3	Modelo de diseño experimental .....	41
5.3.4	Caracterización del polvo atomizado .....	42
5.3.5	Diseño experimental en el software .....	43
5.3.6	Análisis de Resultados del Diseño Taguchi .....	47
6.	Conclusiones .....	49
6.1	Estudios futuros .....	52
7.	Referencias.....	53
Anexos.....		56
Anexo A:	Diagramas de cada módulo de fabricación de baldosas cerámicas.....	56
Anexo B:	Modelo de entrevista para determinar causas.....	60
Anexo C:	Modelo de decisión para elección de material.....	62
Anexo D:	Modelo de elección del diseño experimental.....	65

### Índice de figuras

Figura 1 Atomizador de polvo atomizado .....	15
Figura 2 Ciclo de polvo atomizado. ....	16
Figura 3 Secado por pulverización. ....	17
Figura 4 Diagrama de ishikawa. ....	21
Figura 5 Esquema de diagrama de tortuga .....	22
Figura 6 Diagrama de un proceso. ....	24
Figura 7 Cadena de valor de eoe .....	25
Figura 8 Fases del proyecto de investigación. ....	29
Figura 9 Diagrama de tortuga proceso de materia prima. ....	33
Figura 10 Diagrama de tortuga proceso de dosificación y molienda.....	34
Figura 11 Diagrama de tortuga proceso de atomización. ....	35
Figura 12 Designación de entrevistas. ....	36
Figura 13 Nube de palabras de contraste de causas. ....	37
Figura 14 Diagrama de ishikawa. ....	39
Figura 15 Contenido de humedad.....	41
Figura 16 Arreglo ortogonal metodología taguchi.....	42
Figura 17 Grafica de efectos principales para relación de señal ruido sn.....	45
Figura 18 Condición óptima para el proceso de polvo atomizado .....	45
Figura 19 Grafica de interacción de porcentaje de hierro en gramos .....	46
Figura 20 Análisis anova.....	49

**Índice de tablas**

Tabla 1. Dispositivos utilizados en el ciclo de atomización. ....	15
Tabla 2. Parámetros de control.....	18
Tabla 3. Resumen del modelo del diseño experimental. ....	42
Tabla 4. Tabla de variación de niveles para la toma de muestras. ....	43

### **Dedicatoria**

Primeramente, dedico mi trabajo de titulación a mis padres Julio y Estrella, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Su amor incondicional, enseñanzas, dedicación y sacrificios me han permitido seguir adelante en mi camino hacia el éxito sobre todo me han dado la fuerza para avanzar y superar los desafíos.

Dedico mi tesis a mi familia que ha sido muy importante en este proceso, en especial a mis tías Cecilia y Amanda quienes desde el momento uno en el que pise la Facultad de Ciencias Químicas nunca han dejado de creer en mí, gracias a su apoyo, amor que me han permitido perseverar, avanzar y culminar con esta meta de mi vida.



### **Agradecimiento**

Quiero agradecer principalmente a Dios por ser una guía constante y por brindarme muchas bendiciones a lo largo de esta etapa llena de sacrificios, desafíos y muchas emociones.

Agradezco a mis padres Julio y Estrella quienes han estado incondicionalmente para mí, a mis hermanos Sonia, Jefferson y Wendy por su apoyo ante cualquier inquietud que he tenido durante este largo recorrido, a mis tías Cecilia y Amanda por todo el amor y consejos que me han podido brindar a pesar de la distancia, sin dejar de lado al resto de mis familiares que siempre me han sabido guiar y aconsejar para tomar las mejores decisiones.

Agradezco a la empresa objeto de estudio por haberme permitido aplicar mis conocimientos y por abrirme las puertas para la realización del proyecto de investigación, por brindarme sus instalaciones y, sobre todo, al excelente personal que me ha ayudado desde el primer día hasta la culminación del mismo, gracias por brindarme su espacio y su colaboración.

Agradezco profundamente al señor Jaime Sánchez, quien fue una guía invaluable para mí durante todo el proceso de mi estudio de investigación. Le agradezco infinitamente por su disposición para ayudarme con cualquier consulta o duda que tuve al realizar el proyecto, su ayuda y conocimiento hicieron posible la realización de este trabajo, demostrando ser capaz y solidario al momento de resolver mis inquietudes.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor Ing. Milton Barragán, quien fue una guía constante y un apoyo incondicional durante todo el proyecto de investigación. Su sabiduría, conocimiento y paciencia fueron fundamentales para la culminación del trabajo demostrando ser no solo un excelente profesional, sino también un amigo.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Ing. Catalina Peñaherrera, cuya guía y apoyo han sido fundamentales en el desarrollo de este proyecto de investigación. Su vasto conocimiento y su generosidad para compartirlo han sido invaluable para resolver las dudas que surgieron a lo largo del proceso. Gracias a su dedicación y solidaridad, he podido avanzar con claridad y confianza hacia la culminación exitosa de este proyecto.

Agradezco a mis amigos Kevin, Digna y Caro quienes siempre han estado para mí, por ser un apoyo incondicional en momentos difíciles y momentos alegres siempre estaré agradecida por su amistad verdadera.

## 1. Introducción

Las industrias cerámicas se caracterizan por la calidad de los productos, para ello se deben desempeñar en el proceso productivo que es el corazón donde se transforma las materias primas hasta obtener el producto final, por lo que este proceso permite satisfacer los requisitos de los mercados con un artículo de calidad (Chavez & Mancheno, 2013).

En la actualidad, la industria cerámica se encuentra en constante evolución por lo que se enfrenta a importantes desafíos y oportunidades, como la búsqueda de prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, la incorporación de tecnologías avanzadas de producción, diseño y adaptación a las cambiantes demandas de los consumidores que permitan minimizar los residuos en el transcurso de elaboración de los componentes cerámicos (arquitectura-sostenible, 2023). La combinación de tradición y modernidad, junto con la innovación constante, hace de la industria cerámica una parte integral de nuestra vida y nuestro entorno.

Las industrias cerámicas poseen diferentes procesos ya que deben cumplir con diferentes características y parámetros del producto que previamente se encuentran sujetadas a la materia prima, para el cumplimiento de los requerimientos se debe contar con estrategias que permitan que los procesos se optimicen y sobre todo tener un control para garantizar las propiedades del producto, desde el punto de vista de calidad las características primordiales que se examinan podrían radicar en humedad residual, granulometría, densidad, contenido de sólidos, viscosidad, estas propiedades se consideran dentro de la preparación, control de barbotina y polvo atomizado para la producción de cerámica (Auz, 2018).

Con el tiempo, las metodologías y enfoques, empleados en la creación de cerámica se han ampliado, lo que ha resultado en la implementación de técnicas automatizadas para la aplicación del revestimiento cerámico. Estos avances tienen como objetivo mejorar continuamente los niveles de producción mediante la propuesta de utilizar una gama de instrumentos que faciliten la funcionalidad óptima del proceso que garanticen el cumplimiento de los patrones de calidad y cumplan con los requisitos del mercado (Russo, 2021).

Hoy en día, el mercado actual presenta una necesidad sustancial de baldosas cerámicas, junto con un creciente deseo por parte de los clientes, lo que hace que la calidad de las baldosas cerámicas sea un aspecto esencial. En consecuencia, esto requiere la identificación de los parámetros o variables que influyen en la producción de piezas cerámicas, que abarcan los aspectos como morfología, humedad residual, granulometría de las partículas, la fluidez y varios otros. Por lo tanto, el control efectivo de las estrategias de fabricación posee la

capacidad de mejorar la excelencia general del producto final (Negre, Jarque, Feliu, & Enrique, 2007).

En Ecuador la industria cerámica adquiere una gran importancia para la riqueza y progreso del país, por ello se encuentra en constante evolución, su mayor índice de producción se encuentra localizado en la zona 6 que integran las provincias de Cañar, Morona Santiago y Azuay (Altamirano, Romero, & Ferrer, 2022).

La ciudad con la industria cerámica de mayor crecimiento en el Ecuador es la ciudad de Cuenca-Azuay, que es la principal ciudad productora de cerámica debido a que en esta zona se encuentra la mayoría de las canteras de arcilla, cuarzo y caolín que sirven como las principales fuentes para la elaboración de cerámica y porcelanato (Altamirano, Romero, & Ferrer, 2022).

Dentro del proceso de producción de baldosas cerámicas, que incluye la recepción de materia prima (Patios), dosificación y molienda, atomización, prensado, esmaltado y diseño, quema, empaque y almacenado, se presenta una problemática, la aparición de puntos negros en las baldosas. Según datos proporcionados por la empresa objeto de estudio, durante el año 2022-2023, este defecto apareció en un 11.26% de los productos. La causa de este defecto se atribuye a la presencia de sólidos en las arcillas y a la magnetita en las materias primas, cuyo contenido de hierro puede generar estos puntos negros, afectando la calidad del producto final.

La aparición de punto negro en la producción cerámica es un fenómeno en el que el material cerámico presenta una mancha negra, esto se puede atribuir a varios factores que nacen durante el transcurso de transformación y puede tener múltiples efectos sobre el producto final y su calidad. La formación de este punto puede estar vinculada a varios factores como condiciones en la cocción, y las variantes en el proceso de producción.

Las herramientas y estrategias de control dentro de un proceso productivo ayudan a la eficiencia y sobre todo la optimización de fabricación, sin embargo, se debe tomar en consideración varios factores cruciales dentro del procedimiento, como parámetros o estrategias que cada empresa implementa para garantizar calidad en su proceso.

La gestión inadecuada del control de procesos en las industrias presenta desafíos importantes que requieren atención considerable. En las organizaciones, la ausencia de una supervisión y administración eficiente de la fabricación de los procesos productivos da lugar a una serie de problemas como ineficiencias operativas, desperdicio y una disminución de la

calidad del producto final. En consecuencia, es importante hacer frente a esta situación a través de la ejecución de metodologías mejoradas de registro de procesos más eficaces y la adopción de herramientas, estrategias para así perfeccionar la eficacia y rentabilidad en la calidad de los productos.

Con el fin de resolver esta problemática en el proyecto de investigación, la incorporación de estrategias en las etapas cruciales del proceso productivo de cerámica gres y porcelanato puede permitir una mejor regulación en el proceso, para ello al implementar estas estrategias permite supervisar y mejorar de manera más eficaz los factores clave que intervienen en la producción lo que resulta una disminución en los retrasos y errores de fabricación de cerámica, este enfoque impulsará la competitividad en el mercado al reformar la eficacia de los productos y su eficiencia dentro de la producción.

Es importante realizar un análisis exhaustivo del sistema de valor que abarca la producción de cerámica, este análisis permitirá adquirir un conocimiento profundo de todas las etapas involucradas y factores de control en la producción de cerámica, cada punto crítico en el proceso será evaluado bajo que controles y parámetros se encuentran.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Establecer condiciones de operación para el proceso de barbotina y polvo atomizado en la producción de cerámica gres y porcelanato.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar y analizar las variables clave que intervienen dentro del proceso de producción de barbotina y polvo atomizado en la cerámica para comprender cómo afectan en las características adecuadas de estos materiales.
- Elaborar un análisis integral de los recursos, tecnología y conocimiento técnico presentes en la organización para asegurarse de que la implementación de las condiciones de operación sea viable.
- Desarrollar un diseño experimental para investigar y establecer condiciones de operación precisas entre las variables de estudio y las propiedades de las baldosas antes y después de su cocción.

### **2.3 Preguntas de investigación**

- ¿Cuáles son las variables que influyen en el proceso productivo para eliminar el punto negro?

- ¿Cuáles son las condiciones de operaciones adecuadas que se requieren durante el proceso de atomización en la producción de cerámica?

### 3. Marco Teórico

En el entorno empresarial, las compañías se ven inmersas en un ambiente altamente competitivo que presenta un escenario dinámico y complejo, la competencia por recursos, clientes y participación en el mercado es constante y desafiante, por lo que la industria cerámica se centra en la calidad en todos los aspectos de sus operaciones y que sus productos cumplan con las expectativas y satisfacción del cliente.

En la producción de baldosas cerámicas, la calidad es un factor crítico, las empresas del sector cerámico se esfuerzan por ofrecer productos de la más alta calidad para satisfacer a sus clientes y mantener un crecimiento sostenible. La estandarización de procesos es clave para asegurar una calidad consistente en las baldosas, lo que a su vez facilita las ventas y aumenta la competitividad en el sector. El control y monitoreo del proceso son herramientas fundamentales para comprender y gestionar eficazmente las variables involucradas en la producción (Avalos, Benites, Condor, & Durand, 2022).

El conocer y describir los principales subprocesos implicados en la fabricación de baldosas cerámicas, así como analizar los problemas de control asociados a variables que pueden medirse de forma continua o esporádica, es de suma importancia. Por ende, es crucial conocer el proceso y sus variables, los autores Sanchis, Peñarocha, Ariño, & Romero (2014), destacan los desafíos que enfrenta el control de procesos y proponen un esquema de control que combina mediciones manuales esporádicas con mediciones continuas para predecir los resultados o estados durante un periodo de control apropiado.

#### 3.1 Pasta Barbotina

La barbotina es una mezcla utilizada en la industria cerámica, compuesta por arcillas, feldespatos, cuarzo, agua y a veces carbonatos. Su contenido de agua supera el 30%, por lo que se denomina barbotina cerámica.

Además de los materiales arcillosos y el agua, la barbotina puede contener defloculantes, que son fundamentales en la elaboración de la mezcla. Los defloculantes ayudan a dispersar las partículas y a mantener la mezcla fluida, facilitando su manejo y aplicación en el proceso de producción cerámica (Auz, 2018).

### 3.2 Secado por pulverización

El proceso de atomización de polvo en la industria cerámica implica el análisis de variables como la densidad, viscosidad y residuo tras la molienda de la materia prima utilizada en la fabricación de cerámicas. Estas variables impactan las condiciones de operación del atomizador, el cual se basa en la entrada de suspensión cerámica para producir polvo cerámico. El funcionamiento del atomizador está controlado por parámetros operativos específicos, durante el proceso, la suspensión cerámica es pulverizada en gotitas finas que entran en contacto con aire caliente, lo que resulta en la producción de un producto granular sólido con bajo contenido de agua (Calderón, 2020).

En la industria se utiliza diferentes tipos de atomizadores como boquillas de pulverización rotativas o fijas, cada uno de los cuales afecta a la tasa de evaporación del líquido de diferente manera, estos están diseñados para producir polvos con granulometría controlada y contenido de humedad para su uso en estado semi-seco durante la fabricación de baldosas cerámicas. El secado de la barbotina para obtener polvo atomizado es un parámetro fundamental para evaluar el consumo de energía y la productividad en atomizadores, el proceso de secado en cerámica implica el secado continuo y automático de la barbotina obtenida al moler materias primas en una suspensión acuosa dando como resultado un producto con contenido de humedad controlado ideal para la fase de prensado (SACMI, 2004).

El estudio realizado por Siccha & Ugaz (2014), ofrece una revisión de diversos aspectos de la técnica de secado por atomización, destaca la aplicación del secado en productos sensibles al calor por lo que se analiza cuatro etapas importantes atomización, pulverización de barbotina, secado y separación del producto para ello mencionan que el secado por atomización puede funcionar con temperaturas de entrada de 150°C a 300°C, normalmente la temperatura del quemador del atomizador es de 500°C a 630°C lo cual ofrece eficiencia operativa en el secado por atomización, a tiempo de permitir variación y el control de las propiedades y calidad del producto.

**Figura 1** Atomizador de polvo atomizado



**Nota:** Máquina de atomizador de polvo tomada de la empresa objeto de estudio.

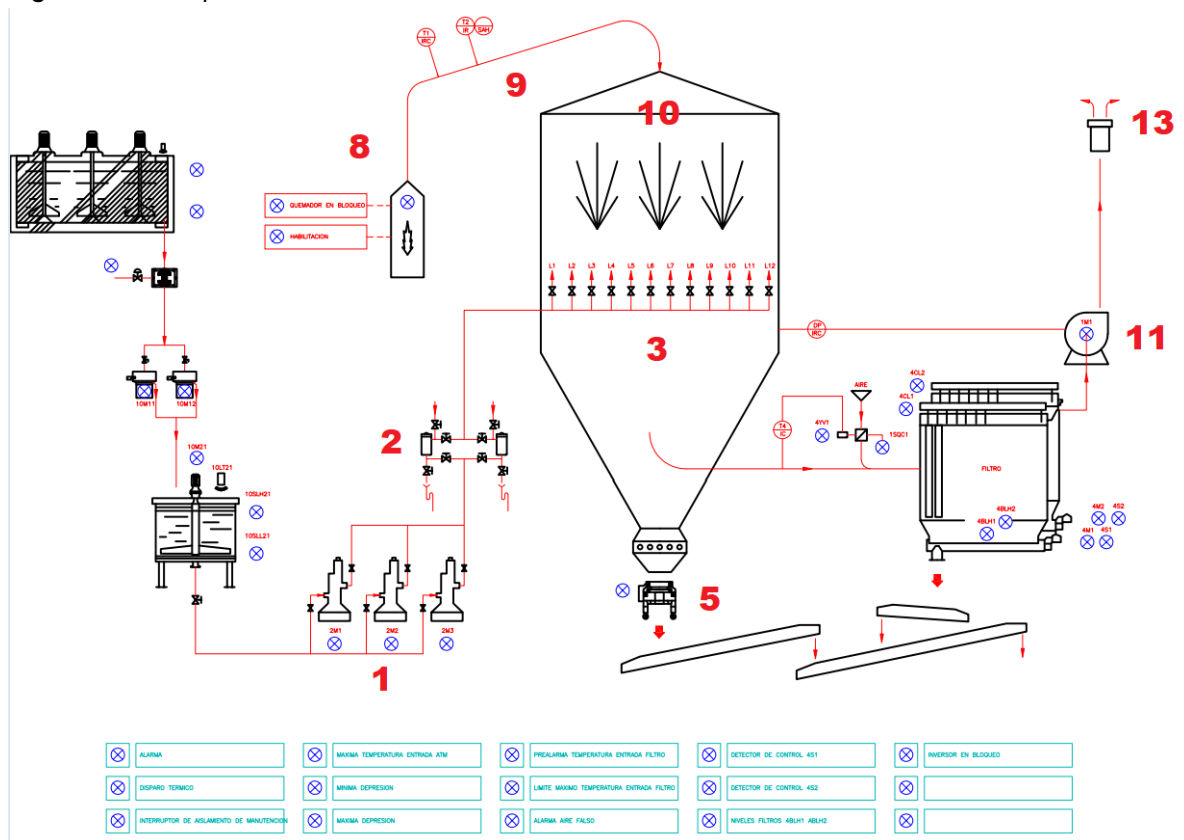
La **Figura 2** presenta un esquema de un atomizador con dispositivo de nebulización con boquillas, donde se puede observar la localización de todos los dispositivos apropiados para el funcionamiento de la misma, la **Tabla 1** muestra todos los dispositivos utilizados en el ciclo de atomización:

**Tabla 1** Dispositivos utilizados en el ciclo de atomización.

1. Boquilla de alimentación de barbotina	9. Conducto de aire caliente
2. Filtros de barbotina	10. Distribuidor de aire caliente
3. Anillo de lanzas y boquillas	11. Ventilador
4. Válvula de descarga de polvo atomizado	12. Chimenea
5. Quemador	

**Nota.** Tabla de equipos que se emplean en el ciclo de atomización de barbotina.

**Figura 2** Ciclo de polvo atomizado.



**Nota.** Operación de proceso de barbotina para la obtención de polvo atomizado tomado de la EOE.

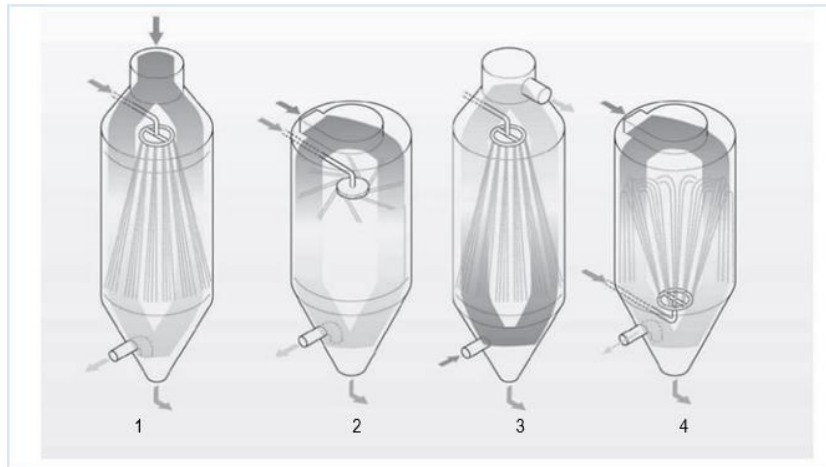
### 3.2.1 Tipos de atomizadores

Dentro de la industria cerámica existen diferentes atomizadores, en este tipo de industria un tipo común de atomizador es el que tiene corrientes mixtas, con aire descendente y nebulización de deslizamiento orientada hacia arriba para un intercambio de calor eficiente. Los atomizadores en cerámica se pueden clasificar en dos categorías principales: atomizadores de calor directo y atomizadores de calor indirecto, los atomizadores de calor directo utilizan gas de combustión o aire precalentado para evaporar el líquido, afectando la evaporación de las partículas a través de la transmisión de calor mientras que los atomizadores de calor indirecto transfieren calor mediante conducción al material que se está tratando, con diferentes tipos basados en el sistema de nebulización adoptado y las trayectorias de flujo de aire caliente (SACMI, 2004).

La **figura 3** indica los diferentes tipos de atomizadores que se usa en la industria cerámica.



**Figura 3** Secado por pulverización.



**Nota.** Configuración de secado por pulverización 1. Tipo equicorriente descendente, nebulización con boquillas, 2. Tipo equicorriente descendente, nebulización con turbinas, 3. Tipo contracorriente, nebulización con boquillas descendente, aire ascendente, 4. Tipo contracorrientes mixtas, nebulización con boquillas, aire descendente. Extraída de (SACMI, 2004).

### 3.2.2 Variaciones de las características físicas del polvo atomizado

El polvo atomizado, debe presentar determinadas características de humedad y tamaño de partícula para ser utilizado de manera efectiva en las etapas posteriores de producción, es posible influir en cierta medida algunas variables relacionadas con las condiciones de operación del atomizador y parámetros de barbotina para ajustar las variables en la producción del atomizador. La **Tabla 2** muestra diferentes variables que controlan el proceso de atomización de polvo.

El análisis de los procesos húmedo y seco para la producción de baldosas cerámicas desde la perspectiva del prensado y las características del granulado se centra en los parámetros de flujo, influencia en el aumento de densidad, en la distribución granulométrica y contenido de la humedad, por lo que para los autores Amorós, Fuentes, Navarro, & Medall (2012) el impacto de las propiedades de las partículas como tamaño, distribución, forma, humedad del polvo atomizado están dentro de las operaciones de prensado.

**Tabla 2.** *Parámetros de control.*

Parámetros de control del secado por aspersión.					
Variables aumenta ↑ ↑	Grano	Humedad	Salida de ATM	Polvo de escape	Tº del polvo
% Agua en barbotina	↓	↑			
Temperatura de deslizamiento		↓	↑		
Densidad de deslizamiento	↑	↓	↑		
Viscosidad de deslizamiento	↑				
Presión de la bomba	↓	↑	↑		
Diámetro de las boquillas	↑	↑	↑		
Altura de la espiral	↑	↑	↑		
Distancia de las boquillas en el anillo	↓				
Temperatura del aire de entrada T3		↓			
Temperatura del aire de escape T1		↓			↑
Cantidad de aire en el proceso		↓	↑		
Apertura del enfriador			↓		
Número de boquillas		↑	↑		↓

**Nota.** *Tabla de parámetros obtenido de (SACMI, 2004)*

### **3.3 Factores que afectan la calidad de la cerámica.**

Los avances en la automatización de etapas clave del proceso de producción de baldosas cerámicas, como medición de la densidad y viscosidad, así como el control preciso de variables como los caudales de agua y de floculante representan un creciente interés y desarrollo en la industria. Se destaca el potencial significativo en futuros sistemas de control que puedan medir con precisión la densidad viscosidad e incluso residuos, aunque se reconozcan múltiples dificultades (Gasch, 2006).

El comprender las variables que influyen en la aparición de defectos en el revestimiento de piso cerámico mediante la implementación del enfoque de regresión lineal compuesto es de suma importancia así como la identificación de las causas de fisuras y proponer un plan de mejora para incrementar la calidad del producto (Betancourth, 2018).

#### **3.3.1 Porcentaje de humedad**

La humedad residual es el contenido de humedad que permanece en un material después de un proceso de secado, lo cual es muy importante en la producción de cerámica. En la industria cerámica la humedad residual es crucial para estimar el comportamiento mecánico posterior al secado, y se mide utilizando métodos como la radiación infrarroja continua para la detección de humedad superficial. La medición continua de humedad residual permite predecir el comportamiento mecánico bajo condiciones constantes en la salida del secador (Jarque, y otros, 2006).

#### **3.3.2 Distribución granulométrica**

La granulometría o tamaño de grano en la ciencia de materiales se refiere al análisis de la distribución de tamaño de las partículas dentro de una muestra. Este análisis se realiza a menudo mediante técnicas tradicionales como el tamizado son comunes en la industria para este propósito, pueden verse influenciadas por diversos factores que conducen a posibles inexactitudes. El objetivo principal del análisis de granulometría es medir el diámetro de cada partícula en una muestra y extraer distribuciones estadísticas para comprender la composición y características del material (Guiseppe & Revel, 2006).

#### **3.3.3 Densidad**

La densidad es una propiedad física que depende de la masa de una sustancia por unidad de volumen, lo que afecta la productividad del molino, la viscosidad de la barbotina y el contenido de residuos en el procesamiento de cerámica. Se puede medir usando un

picnómetro, un instrumento de acero inoxidable con un volumen conocido utilizado para determinar el peso específico de líquidos, esmaltes, barbotinas, etc. (Calderón, 2020).

#### **3.3.4 Viscosidad**

La viscosidad es un parámetro crucial en el procesamiento cerámico que afecta la sedimentación, es el parámetro más importante en la caracterización de una sustancia. El parámetro de viscosidad se puede medir utilizando el viscosímetro la copa Ford comúnmente utilizada en el sector cerámico (Calderón, 2020).

#### **3.4 Punto negro**

El punto negro en las baldosas cerámicas se debe a la presencia de sólidos en las arcillas y a la magnetita en las materias primas, cuyo contenido de hierro puede generar manchas o puntos negros dentro de las piezas. Este fenómeno ocurre debido a la cantidad de materia orgánica y óxidos de hierro presentes en la composición de las arcillas, lo que provoca la formación de un núcleo oscuro en el interior de las baldosas durante el proceso de cocción (Martínez, 2020).

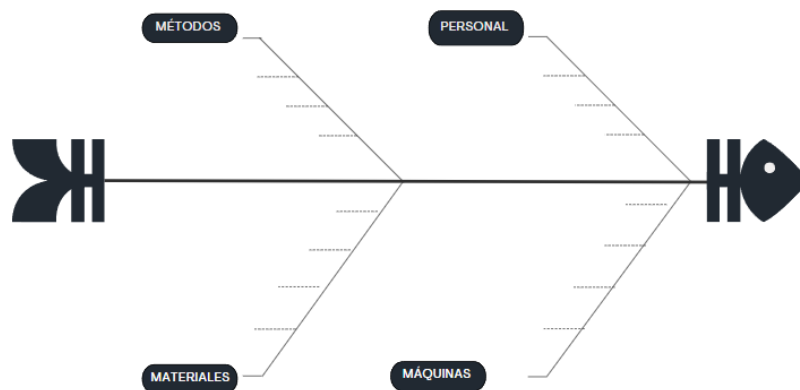
#### **3.5 Herramientas de control de calidad en la producción de cerámica.**

El proponer mejoras para el proceso productivo en una empresa fabricante de cerámica pueden conducir potencialmente a una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de la empresa, es por eso, que el estudio realizado por el autor Russo (2021) propone el uso de herramientas como el diagrama de Ishikawa y los diagramas de Pareto que pueden ayudar a nivelar y priorizar las raíces de los inconvenientes de producción, lo que permite intervenciones específicas y resolución de problemas.

##### **3.5.1 Diagrama de Ishikawa**

Un diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de espina de pescado es una técnica utilizada para identificar posibles causas de un problema central en diversos campos, ayuda a analizar el problema principal que afecta la calidad de un producto o servicio mediante la visualización de relaciones de causa y efecto. El diagrama de Ishikawa consta de ramas principales que representan diferentes categorías de causas dando lugar a subramas que detallan causas específicas relacionadas con el tema principal (Delgado, Panchi, Salazar, Pinos, & Guano, 2021).

**Figura 4** Diagrama de Ishikawa.



**Nota:** Elaboración propia del esquema general del diagrama de Ishikawa

### 3.5.2 Diagrama de Pareto

Diagrama de Pareto también conocido como gráfico de Pareto es una herramienta de calidad utilizada para identificar y priorizar las causas más significativas que contribuyen a un tema en particular. Representa visualmente la frecuencia o impacto de diferentes causas ayudando a enfocarse en abordar los factores más críticos que afectan al rendimiento del tema de estudio, a su vez ayuda a la toma de decisiones (Delgado, Panchi, Salazar, Pinos, & Guano, 2021).

Su gráfico de barras muestra las causas de un problema en orden descendente de importancia mostrando el número de causas que son responsables de la mayoría de los defectos. Representa visualmente la regla 80/20, donde el 20% de las causas resultan en el 80% de los efectos del problema, el estudio de esta herramienta ayuda a identificar las causas significativas y permite a las organizaciones enfocarse en abordar los factores que tienen mayor impacto (Maldonado, Ramón, Labanda, & Muñoz, 2017).

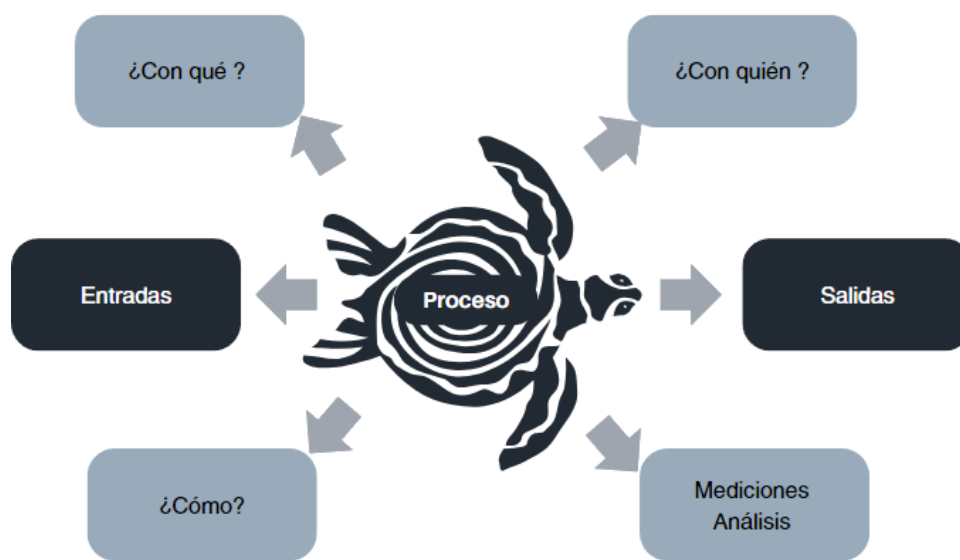
### 3.5.3 Diagrama de Tortuga

Un diagrama de tortuga es una representación visual utilizada para mostrar cómo diversas entradas y salidas se relacionan con un proceso, destacando las interacciones entre diferentes elementos (Valenciana & Picón, 2020).

El diagrama de la tortuga es una técnica de mapeo que ofrece una representación visual de un proceso, desde proveedores e insumos hasta actividades, salidas y clientes. Este diagrama facilita la comprensión del flujo del proceso y la identificación de áreas de mejora. Utiliza las cuatro patas de la tortuga para representar cuatro preguntas clave sobre el proceso,

mientras que la cabeza y la cola representan los insumos. El caparazón lleva el nombre del proceso y abarca los requisitos del cliente, los recursos no humanos necesarios, los recursos humanos requeridos, los controles operativos y los indicadores de desempeño (García, 2020).

**Figura 5** Esquema de diagrama de tortuga



**Nota:** Descripción del diagrama de tortuga y sus componentes, elaboración propia.

#### 3.5.4 Diseño de experimentos

El diseño experimental es una metodología que se utiliza para planificar y realizar experimentos sistemáticamente con el fin de recopilar datos y hacer inferencias estadísticas sobre los efectos de diferentes factores o variables independientes, el objetivo de un diseño experimental es maximizar la validez interna del estudio, por lo que al implementar evalúan relaciones de causa efecto sobre todo tomar decisiones basadas en evidencia empírica, por lo que para el escritor Tobón (2012), presenta un enfoque sistemático basado en los principios del diseño experimental con el objetivo de mejorar los procedimientos operativos dentro de la industria cerámica. Además, proporciona una estructura sistémica para la integración de metodologías de diseño, como la técnica de operación evolutiva (EVOP) es considerada la opción óptima para su aplicación práctica en el entorno empresarial, con el objetivo final de lograr la optimización.

#### 3.5.5 Metodología Taguchi

La metodología Taguchi en control estadístico de calidad enfatiza minimizar la variación y mejorar la calidad del producto o servicio. La contribución de Taguchi al diseño de

experimentos es significativa y se centra en el diseño robusto y la optimización de parámetros. El enfoque de Taguchi se ha implementado con éxito en empresas de primer nivel, destacando la importancia de la calidad. Genichi Taguchi destaca que la calidad del producto mejora cuando se minimiza la variabilidad en torno al valor nominal, como también define la calidad como la pérdida económica para la sociedad desde el momento en que se lanza un producto, y las pérdidas aumentan a medida que el producto se desvía de su valor. Las contribuciones de Taguchi al control de calidad justifican su estatus como gurú de la calidad, particularmente a través de su desarrollo del concepto de Función de Pérdida, que revolucionó la medición de la calidad y las estrategias de mejora (Hernández, Guillon, & García, 2015).

La filosofía de Taguchi establece que la calidad de un producto debe ser medida en términos de abatir al mínimo las pérdidas de un producto desde su inicio de fabricación hasta que concluya su ciclo de vida, el objetivo de este diseño robusto de parámetros es lograr productos y procesos robustos frente a las causas de variabilidad (ruido) (Pulido & Salasar, 2008).

La metodología Taguchi construye tres metas:

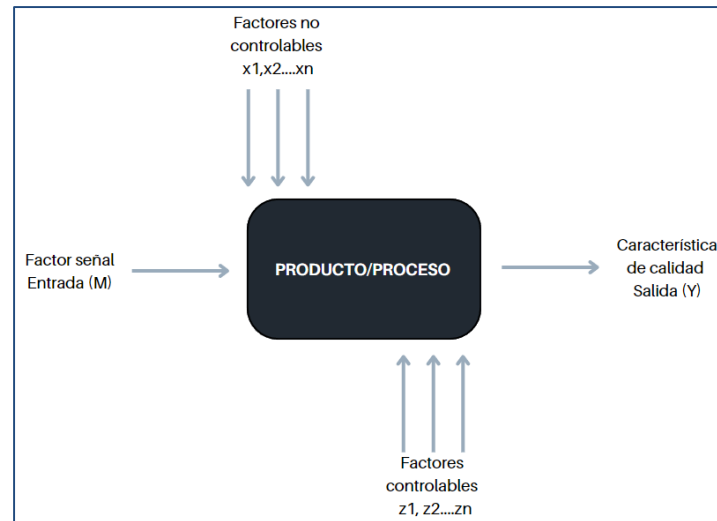
1. Diseños robustos (insensibles) ante el medio ambiente para productos y procesos
2. Diseño y desarrollo de productos, de modo que sean robustos a la variación de componentes.
3. Minimización de las variaciones con respecto a un valor objetivo.

#### **3.5.5.1 Arreglos ortogonales**

El método Taguchi se centra en minimizar la variación y mejorar la calidad a través de la experimentación y el análisis sistemático, los arreglos ortogonales desempeñan un papel crucial en el método al explorar de manera eficiente múltiples factores y sus interacciones en un número limitado de ejecuciones experimentales (Hernández, Guillon, & García, 2015).

Los diseños son conocidos por sus disposiciones ortogonales que se centran en estimar efectos principales y las interacciones de ruido, por lo que para los autores Palacios, Lira, Pacheco, & Esquivias (2020) en su investigación declaran que los diseños ortogonales tienen como objetivo estimar los efectos principales de manera eficiente permitiendo la experimentación secuencial estratégica, optimizando la asignación de recursos para obtener la máxima información a un costo mínimo.

**Figura 6** Diagrama de un proceso.



**Nota:** Diagrama general de arreglos ortogonales de la metodología Taguchi, elaboración propia.

### 3.5.5.2 Factores de control, ruido y señal

Existen dos tipos de factores controlables y no controlables, los factores controlables son variables que se pueden fijar en un nivel determinado de un experimento, como temperatura, el tiempo o el tipo de reactivo. Mientras que los factores no controlables son variables que no se pueden controlar durante un experimento como por ejemplo variables ambientales, el estado de ánimo del operador o calidad del material (Pulido & Salasar, 2008).

### 3.6 Descripción de la empresa

La empresa del caso de estudio EOE es una organización guía en la producción cerámica ecuatoriana y región andina, dedicada a la producción y comercialización de productos cerámicos y porcelanato, cuenta con gran variedad de gasfiterías, sanitarios, herramientas y otros elementos para la construcción. Su amplia variedad de productos, su enfoque en calidad y diseño le ha permitido ser una marca reconocida en el sector industrial a nivel nacional e internacional destacando su compromiso con la calidad, innovación y sostenibilidad.

Para la empresa de caso de estudio el proceso productivo es de vital importancia debido a que involucra en su cadena varias etapas o módulos clave partiendo de la adquisición de commodities hasta la entrega de los productos acabados, estas etapas esencialmente deben cumplir con los requisitos establecidos por la empresa es decir cumplir con controles, características y parámetros que permitan que los procesos se optimicen y sobre todo obtener el control que garantice calidad en las propiedades del producto, por lo que los parámetros

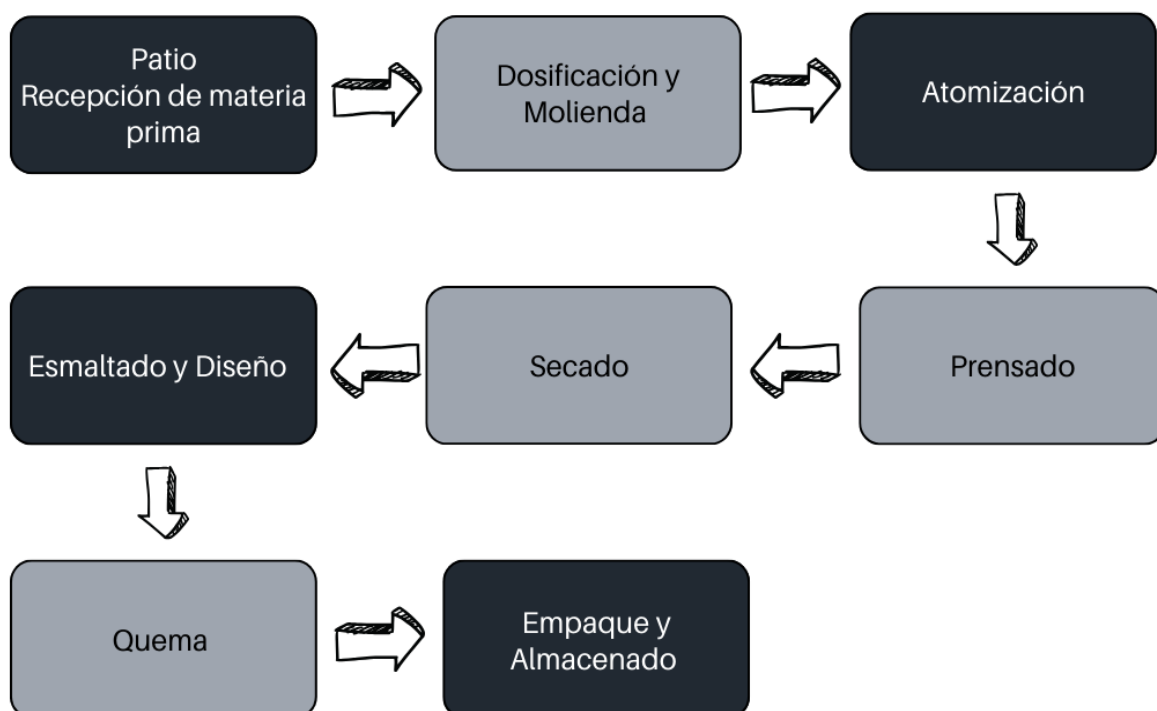


considerados para avalar la eficacia en la producción de cerámica y porcelanato son densidad, viscosidad, residuo, humedad, granulometría.

### 3.7 Proceso de producción de cerámica

El proceso productivo para la fabricación de cerámica y porcelanato de la EOE se encuentra en la **Figura 7**.

**Figura 7** Cadena de valor de EOE



**Nota:** Esquema general de cadena de valor de la EOE para la fabricación de baldosas cerámicas, elaboración propia.

#### 3.7.1 Patio recepción de materias primas

El módulo de recepción de materia prima, parte de la recepción de arcillas trituradas que provienen de diferentes minas que posee la EOE. Estas arcillas son trasladadas a patios intermedios para un nuevo proceso de triturado mediante molturación, la cual ayuda a reducir el tamaño de las partículas mediante fuerzas de impacto. Una vez completado el proceso, estas materias primas son transportadas mediante maquinaria pesada donde se almacenan en 6 boxes y 6 tolvas, se verifica su recepción mediante la firma en la guía de transporte, asegurándose de que coincida con la descripción del material.

### 3.7.2 Dosificación y molienda

El proceso de molienda comienza con la formulación de la materia prima por parte del equipo de laboratorio para crear la fórmula adecuada del polvo atomizado, considerando también la base de aguas residuales. La fórmula se envía al equipo de producción para su aprobación, luego el operador la carga en el software de control y determina la cantidad de humedad de cada materia prima. La fórmula se carga en las tolvas de pesaje y se inicia la alimentación a las bandas transportadoras que llevan la materia prima al molino continuo o discontinuo, donde se mezcla con agua y defloculantes reduciendo el tamaño para obtener la barbotina.

Los molinos utilizados son CBM 80, CBM 50 para continuos, y 1, 2, Súper blanco para discontinuos. El proceso de molienda busca una suspensión homogénea con una distribución de tamaño adecuada llamada barbotina, al finalizar se controla parámetros de densidad, fluidez y residuo, que se registran en el control de molino continuo. La barbotina pasa por tamices para eliminar residuos gruesos, luego por desferrizadores para retener hierro metálico, y finalmente se almacena en tanques de agitación hasta homogenizarse.

### 3.7.3 Atomizado

Después del tamizado, la barbotina se almacena en un tanque diario y se agita hasta alcanzar una consistencia espesa. Luego, se lleva a un quemador a altas temperaturas para secarla y se pasa por un atomizador para obtener un polvo con la granulometría adecuada, en este proceso se realiza un control de propiedades como humedad y granulometría. En el laboratorio, se verifica la humedad evaporando una muestra para evaluar si cumple con los parámetros establecidos. Se revisan regularmente la presión de la bomba, las lanzas de nebulización y el filtro de mangas para controlar el desperdicio como también se realiza el registro de los datos y se evalúan diariamente según especificaciones establecidas, con retroalimentación y ajustes continuos.

### 3.7.4 Prensado

En el proceso de prensado, se selecciona el silo desde el cual descargar el polvo atomizado, verificando en laboratorio si cumple con las características necesarias, se descarga a través de la cabina de control a silos pulmones, donde se homogeniza durante dos horas máximo. La tierra homogenizada se transporta a través de elevadores y se tamiza para evitar grumos, utilizando malla 14 y se utilizan desferrizadores en seco para retener hierro y evitar defectos en la calidad de la baldosa. El polvo se transporta a un silo general para las prensas, donde se alimentan los carros de las prensas mediante una parrilla donde se utilizan diferentes prensas según el tipo de baldosa a fabricar, con moldes superiores e inferiores que contienen

información de fabricación y flechas para identificar problemas en el prensado. Las baldosas que no cumplen con los estándares se transportan a molienda para su reproceso, posteriormente, la baldosa cerámica se somete a una inspección con rayos X para medir su densidad y por lo tanto, evaluar su calidad, esta prueba se realiza tanto en baldosas prensadas y en las baldosas secas.

### **3.7.5 Secado**

El proceso de secado de las piezas cerámicas comienza después del prensado de las baldosas, en el cual se dirigen hacia el secador, un equipo clave en la producción de cerámicas. En el secador, las piezas cerámicas son sometidas a acción directa de la temperatura, lo que permite absorber de manera uniforme una cantidad determinada de humedad. El secador utiliza un flujo de aire caliente que circula verticalmente a través de las baldosas, asegurando un secado controlado. El objetivo es obtener una pieza con la dureza adecuada para el próximo proceso de esmaltado.

En las líneas de producción 4 y 5, los secadores son verticales, a diferencia de las líneas 2 y 7, donde los secadores son horizontales. La línea 3 no posee secador, ya que es una línea de producción biquema. Los ciclos de secado suelen durar entre 45 y 60 minutos.

### **3.7.6 Esmaltado y diseño**

La etapa de esmaltado comienza con la pieza cerámica que ha salido del secadero, se limpia la superficie para agregar engobe con el fin de que se adhiera el esmalte, luego se realiza el proceso de decorado donde se utiliza la tecnología INKJET que ayuda en el diseño multiplicando las posibilidades creativas decorando las piezas cerámicas permitiendo naturalidad en el diseño.

### **3.7.7 Quema**

Las piezas son almacenadas y trasladadas al horno mediante un proceso automatizado de un robot. Las piezas cerámicas ingresan al horno y pasan por un proceso de monococción para pisos y bicocción para paredes a temperaturas hasta 1200° este proceso posee ciclos de quema entre 35 y 50 minutos.

### **3.7.8 Selección y empaque**

El producto es sometido a control de calidad verificando tonos, textura y dimensiones , para algunos tipos de baldosas cerámicas también pasa por una cortadora de fricción para rectificar y biselar los lados de la pieza cerámica facilitando el proceso.

Una vez clasificado el producto es empacado y paletizado de acuerdo con el tamaño, tono y calidad, en bodegas de almacenamiento. Para todos los módulos del proceso las maquinarias y herramientas son de suma importancia debido a que con ellas se impulsa la eficiencia y eficacia en el cumplimiento de las fases, todas estas herramientas simbolizan la capacidad de una empresa llevar sus operaciones de manera efectiva. Su mantenimiento adecuado y utilización es de gran importancia para garantizar que el proceso se lleve a cabo sobre todo que cumpla con los objetivos establecidos, el éxito de cada módulo se basa en la eficiencia y confiabilidad de maquinarias y los instrumentos que interceden en la producción.

#### 4. Metodología

Para encontrar las condiciones de trabajo óptimas que garanticen la calidad del polvo atomizado en las etapas del proceso de fabricación de cerámicas, se realizó una serie de estudios que consta en 3 fases. Esto se describe en el apartado 4.2.

El desarrollo de este proyecto de investigación establece parámetros para poder obtener resultados que garanticen las condiciones de operación óptimas del proceso de polvo atomizado en la industria cerámica utilizando herramientas y análisis que proporcionan información para el control de procesos. Para que un proceso de investigación sea viable se realizó un esquema de fases las cuales ayudaron a conocer y establecer actividades que se debe realizar para que así el proceso sea factible.

El trabajo de investigación empleó una metodología mixta que combina enfoques cualitativos y cuantitativos. El enfoque cualitativo incluyó la realización de entrevistas, cuyo análisis se complementó con la creación de nubes de palabras para visualizar los resultados, por su parte, el enfoque cuantitativo se centró en la recopilación y análisis de datos históricos. Ambos enfoques son fundamentales ya que juntos aportan una comprensión más profunda y detallada del problema de punto negro (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

El estudio se enfocó en el proceso que va desde el área de recepción de materia prima hasta la etapa de atomización, en el área conocida de la EOE (**Molienda y Atomización**). Esta selección se debe a que en la etapa de atomización se detectará el punto negro, antes de llevar a cabo el prensado y la quema. Durante la atomización, se realizó pruebas específicas

para verificar la presencia de punto negro retenido en el material. La definición detallada del punto negro puede encontrarse en la sección 3.4

#### 4.1 Recolección de datos

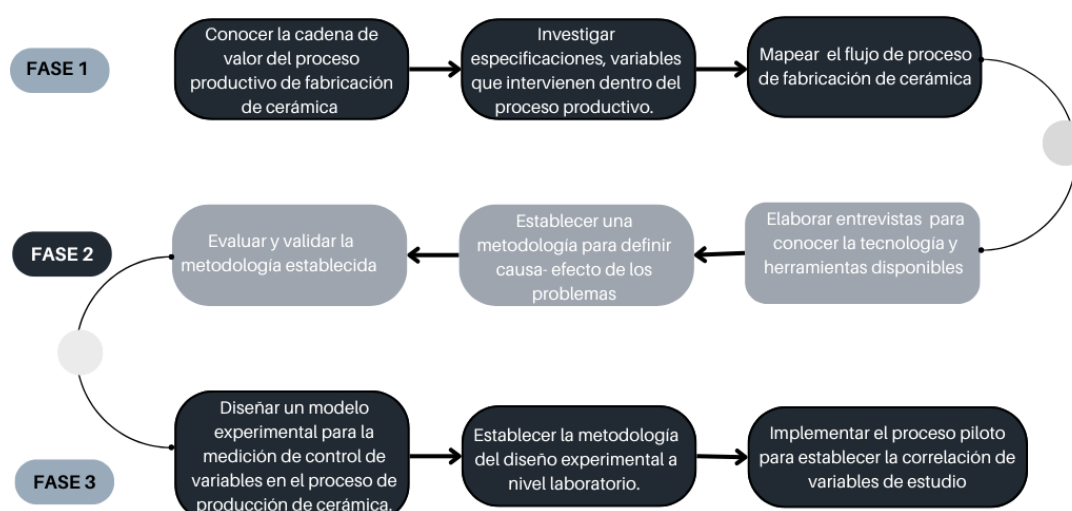
El análisis de material de estudio se realizó en base a los datos obtenidos de la EOE durante los años 2022-2024, los datos de estudio representan los defectos que se han ocasionado durante la producción en los años definidos para el estudio, cabe recalcar que es importante preservar la confidencialidad de la información de la EOE.

Para la recolección de datos, se obtuvieron bases de datos que la EOE registra en los tres turnos de trabajo mediante plataformas como Google Analytics. La primera recolección se llevó a cabo en las plantas de la empresa, específicamente en las áreas de molienda, las cuales se dividen en las distintas tecnologías de producción: Mono-quema, Biquema, Esmaltado, Tecnológico. La segunda base de datos se obtuvo mediante la recolección de Google Analytics, para el caso de estudio se recopilaban los datos de los defectos y se filtraron solo para conocer cuánto es el porcentaje de defecto (punto negro) en las cerámicas, como también conocer los materiales donde existe la mayor presencia del mismo.

#### 4.2 Fases de proceso metodológico

La **figura 8** indica las fases que se involucran en el proceso de investigación, existen 3 fases para que el objetivo general establecido se cumpla es decir para que la investigación sea efectiva se seguirán los pasos u actividades de cada fase.

**Figura 8** Fases del proyecto de investigación.



**Nota.** Esquema de las fases del proyecto de investigación, elaboración propia.

#### **4.2.1 Fase 1: Conocer el proceso productivo**

Dentro de la fase 1 del proyecto de investigación, como primera actividad se realizó una comprensión integral de todo el proceso, esto permitió identificar y evaluar cada módulo y actividad involucrada desde la recepción de commodities hasta la evaluación de los distintos componentes del proceso. El reconocer la cadena de valor permitió identificar las oportunidades de mejora sobre todo para la toma de decisiones que ayuden a una gestión más efectiva dentro del proceso.

Para abordar la primera fase como segunda actividad se investigó todas las especificaciones técnicas y variables que actúan en el proceso de fabricación, por lo tanto se reconoció las variables más importantes, se analizó detenidamente las especificaciones y requisitos que deben cumplirse en cada módulo del proceso esto. Esto ayudó a conocer de manera más precisa las desviaciones o áreas de mejora, con el fin de controlar y optimizar el proceso de una manera más efectiva y así cumplir con los requerimientos de calidad, también se establecieron nuevas condiciones de trabajo para reducir las deficiencias en el proceso de producción de barbotina y polvo atomizado.

Para finalizar con la primera fase de investigación se modeló toda la cadena de valor del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, para esta actividad se utilizó el software llamado Bizagi, la cual ayudó a modelar los flujos de un proceso. Este modelo proporcionó una vista clara y comprensible del proceso este punto es un objeto importante para la implementación de operaciones y búsqueda de calidad.

#### **4.2.2 Fase 2: Evaluación y validación de metodología**

Dentro de la fase 2 del proyecto de investigación se realizó un reconocimiento de las herramientas y tecnologías disponibles que intervienen en el proceso para ello la actividad 1 consistió en la elaboración de entrevistas a operarios, supervisores, técnicos que diariamente están involucrados en el proceso. Estas entrevistas permitieron obtener las perspectivas del personal sobre el problema de punto negro, proporcionando una visión valiosa para entender mejor la situación y considerar ajustes necesarios en el proceso de producción de cerámica. Al realizar las entrevistas ayudaron a identificar los puntos críticos del proceso, permitieron investigar las causas que provocan la falta de control en el proceso de polvo atomizado, para ello se empleó herramientas como el diagrama causa efecto (**Ishikawa**), el trabajo se ve orientado hacia la identificación de controles u estrategias de implementación dentro de la industria cerámica.

En la actividad 5, se utilizaron herramientas de control estadístico para monitorear y examinar las técnicas de producción de cerámica. Entre estas herramientas, se aplicaron diagramas de Pareto para identificar y priorizar las cerámicas con mayor incidencia de punto negro. Con base en estos análisis, se implementó la metodología llamada Taguchi la cual implica el uso de matrices ortogonales en el diseño de experimentos, esta metodología asegura la confiabilidad de resultados con el objetivo de optimizar el proceso enfocándose en la reducción de variabilidad y minimización de defectos en la producción de cerámica (Hernández, Guillon, & García, 2015)

Para finalizar con la fase 2 se evaluó y validó la metodología establecida garantizando la eficacia y relevancia del proceso. Se presentó el diagrama de Ishikawa a la EOE, lo que permitió clarificar las relaciones causa-efecto, posteriormente, la empresa revisó y aprobó la metodología validando así su confiabilidad para alcanzar los resultados deseados.

#### **4.2.3 Fase 3: Diseño experimental**

Como fase 3 se diseñó un modelo experimental para establecer las condiciones de operación de las variables de estudio, este diseño experimental permite definir las mediciones de control de las especificaciones técnicas y variables identificadas que influyen dentro del proceso de fabricación.

Para determinar la fase 3 del diseño experimental se establece que la investigación se realizará a nivel de laboratorio en la EOE, esta decisión se basa en poder tener una minuciosa observación del análisis de las variables, el personal del laboratorio facilitó la ejecución de la metodología al diseño experimental, contribuyendo de manera significativa a la obtención de resultados y a la validación de las interrogantes de indagación trazadas en el proyecto, dentro de esta fase se tomó en cuenta las 5 variables u especificaciones que intervienen dentro del proceso productivo, dentro de esta fase se realizaron varios ensayos combinando niveles de temperatura, humedad, mayor o menor densidad, viscosidad, con el fin de mejorar el proceso en relación a las especificaciones, por consiguiente se realizó la simulación en el programa (Minitab) el cual permitió seleccionar el proceso que funcione de manera eficiente sobre todo identificó los factores de control que minimicen los componentes de ruido en la producción de cerámica.

Como actividad final se implementó los hallazgos obtenidos a nivel piloto en el diseño de experimentos, al ejecutar el diseño brindó una visión clara y precisa de como las especificaciones intervienen en el proceso de fabricación de cerámica. El comportamiento de

estas variables operativas resultó crucial para respaldar y fundamentar la toma de decisiones en las etapas futuras del proceso.

## **5. Resultados y discusión**

En el siguiente apartado se presenta la información, datos ajustes y pruebas de ensayo realizadas que ayudaron a establecer las condiciones de trabajo adecuadas para que se pueda obtener un polvo atomizado con las mejores características para el proceso productivo.

Para este estudio se realizó estudios preliminares con el principal objetivo de poder encontrar los elementos que se controlan en el proceso y se pueden corregir con el fin de facilitar el desarrollo del proyecto.

### **5.1 Fase 1: Reconocimiento de la cadena de valor**

Con la finalidad de encontrar las condiciones de operación para el proceso de polvo atomizado en la industria cerámica, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de toda la cadena de valor del proceso con el fin de saber y conocer los factores y/o variables que están dentro del proceso productivo, este análisis preliminar se realizó durante las primeras semanas de investigación con el fin de adentrarse al corazón de la fabricación de cerámica, por ello se realizó un levantamiento de procesos de la fábrica de cada uno de los módulos que intervienen y poder visualizarlos en el software Bizagi como se puede visualizar en el **Anexo A**.

Al reconocer la cadena de valor, se evidencia que la empresa objeto de estudio se sustenta en especificaciones técnicas, maquinaria y personal altamente especializado, aspectos fundamentales para viabilizar un proceso productivo que garantice la calidad del producto final, el conocer y comprender la cadena de valor en las industrias cerámicas es crucial para optimizar los procesos de fabricación, el autor Gasch (2006) en su investigación dice que el conocer los procesos involucrados en la producción de cerámica es fundamental para alcanzar las características técnicas y estéticas deseadas en el producto final. Dado que la producción de productos cerámicos es compleja y requiere el cumplimiento de requisitos técnicos específicos, comprender profundamente el proceso de fabricación de las baldosas resulta crucial.

Para comprender de una manera más factible el proceso productivo de la industria cerámica se realizó un diagrama de tortuga en las etapas del estudio, cada diagrama de tortuga se fue realizando respecto a la cadena de valor de la EOE, este ayuda a conocer más sobre el

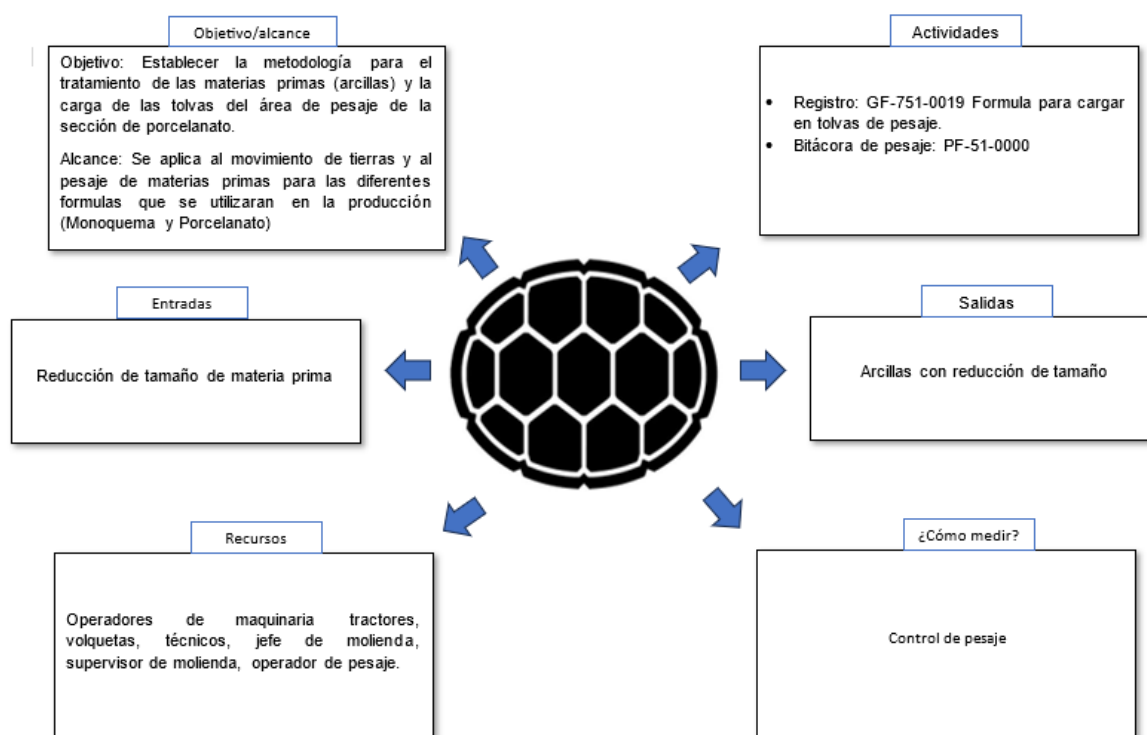


proceso productivo de la cerámica y cuáles son las especificaciones y o materiales métodos, maquinas personas que intervienen dentro del proceso y así saber el alcance del mismo.

### 5.1.1 Recepción de materia prima

La **figura 9** indica el diagrama de tortuga de la etapa de materia prima donde la entrada para este proceso es la reducción de tamaño de cada materia prima hasta obtener las arcillas con un tamaño adecuado para su traslado a tolvas, así como también se establece las especificaciones y objetivos de este proceso.

**Figura 9** Diagrama de tortuga proceso de Materia prima.

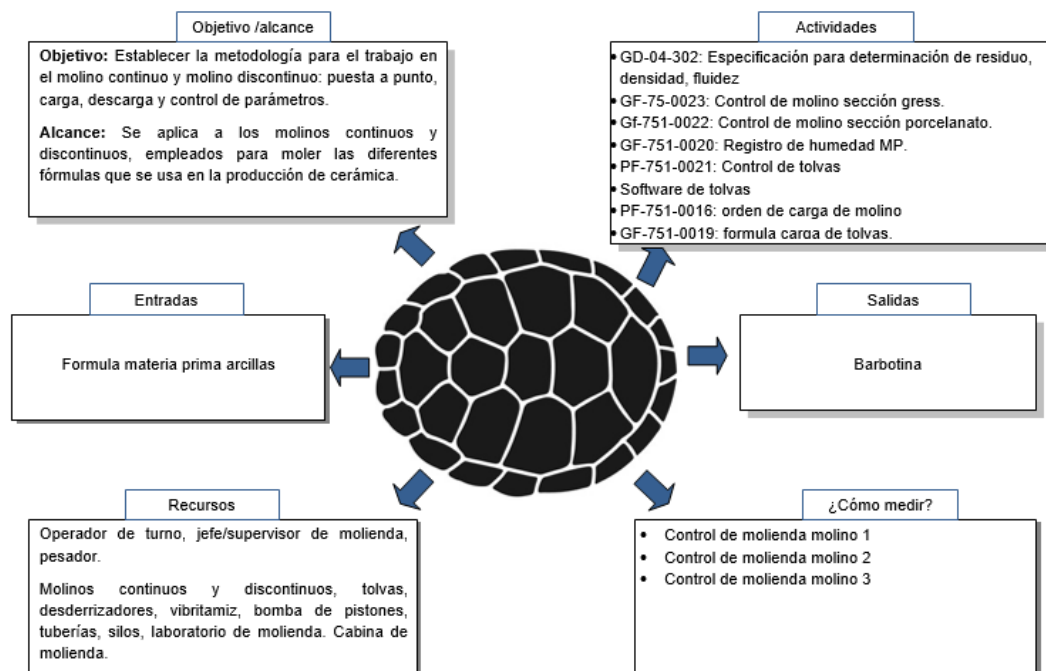


**Nota:** Esquema de tortuga de proceso de obtención y recepción de materia prima en la EOE, elaboración propia.

### 5.1.2 Dosificación y molienda

La siguiente figura muestra un diagrama de tortuga del proceso de molienda para la producción de baldosas cerámicas donde las entradas es la fórmula de las materias primas las cuales se obtuvieron del departamento de laboratorio, para así obtener una salida de una mezcla de barbotina.

**Figura 10** Diagrama de tortuga proceso de dosificación y Molienda.

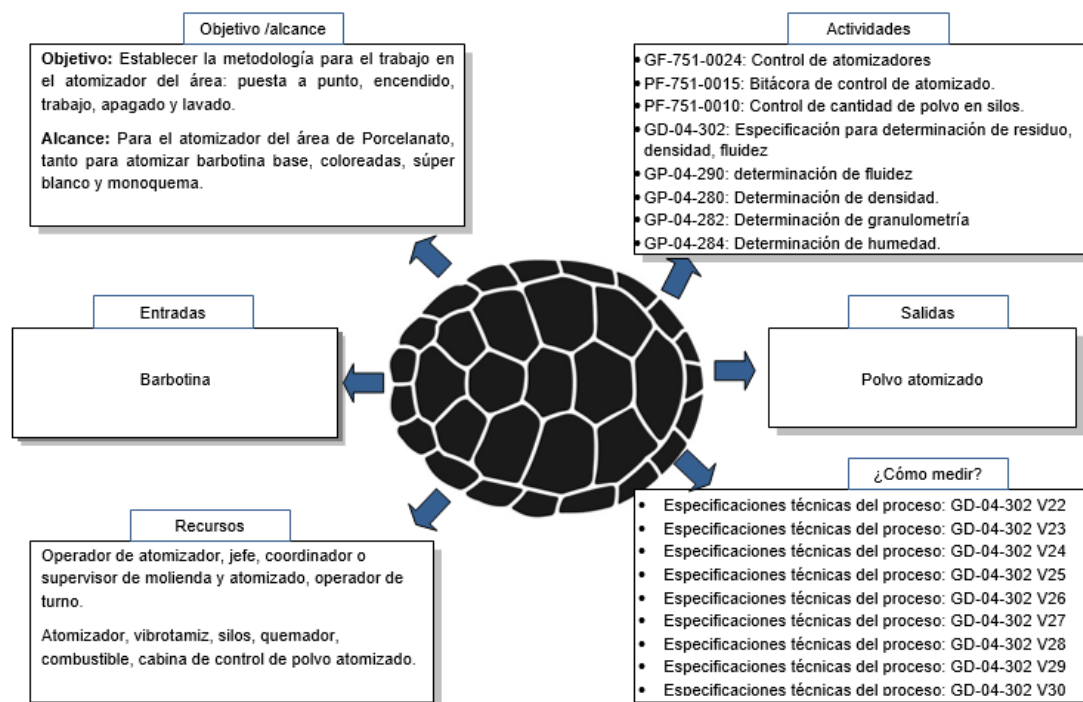


**Nota:** Esquema de tortuga del proceso de molienda en la EOE, elaboración propia.

### 5.1.3 Proceso de atomización de polvo

La siguiente figura muestra el diagrama de tortuga del proceso de atomización de polvo para la obtención de cerámica, donde la entrada es la barbotina obtenida en el proceso de molienda para así obtener una salida de polvo atomizado.

**Figura 11** Diagrama de tortuga proceso de atomización.



**Nota:** Esquema de tortuga del proceso de polvo atomizado de la EOE, elaboración propia.

## 5.2 Fase 2: Evaluación de Causas

### 5.2.1 Recolección de información en el análisis Causa-Efecto

Dentro de las semanas de recolección de datos y estudio se logró conseguir información preliminar de los operarios, supervisores y técnicos, los cuales ayudaron a responder preguntas claves para encontrar las causas y factores que están afectando al proceso productivo con el fin de esclarecer y conocer los puntos críticos del sistema productivo de cerámica.

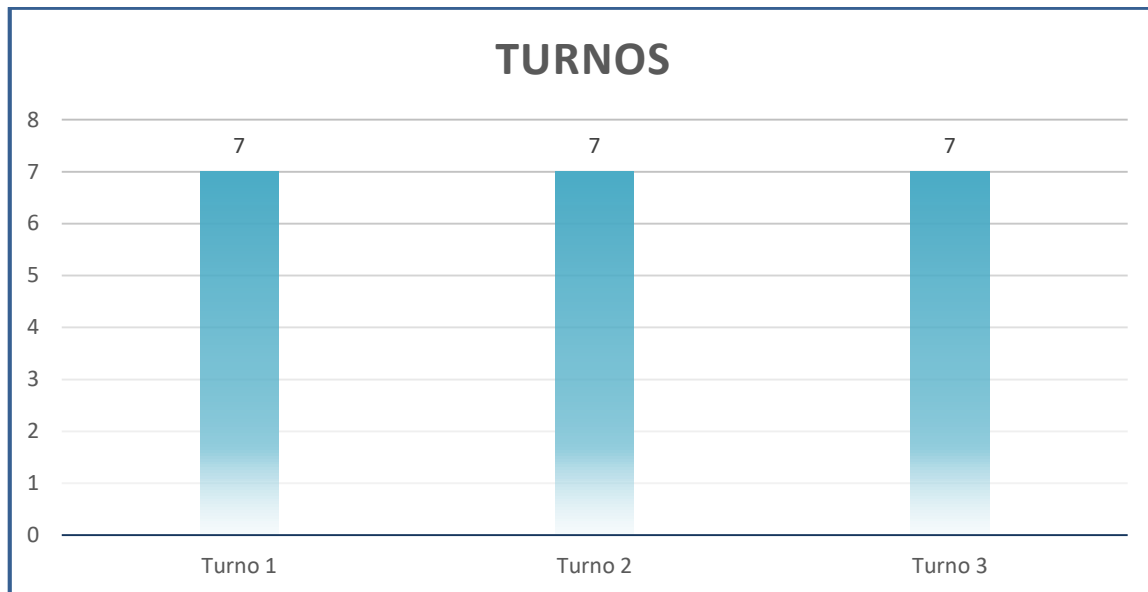
Para el análisis, se obtuvo información detallada mediante 21 entrevistas a operarios, supervisores, técnicos, las cuales fueron distribuidas en los tres turnos de trabajo. Estas percepciones ayudaron a identificar las variables o características que no se controlan adecuadamente en el proceso productivo, para este estudio se centró principalmente en las áreas de Molienda y atomizado, traslado y almacenamiento de polvo atomizado.

Además se identificaron las herramientas y técnicas principales que los operarios, técnicos y supervisores utilizan, como el monitoreo de variables clave dentro del proceso productivo y el mantenimiento preventivo de maquinarias, así como el ajuste de parámetros de temperatura y humedad. Se destaca la importancia de sus percepciones para abordar el

problema del punto negro, ya que su conocimiento y experiencia son fundamentales para entender mejor las causas de este problema.

Las entrevistas realizadas como se puede visualizar en el **Anexo B** ayudaron a conocer los factores y/o causas que están afectando el proceso de polvo atomizado en la EOE.

**Figura 12.** Designación de entrevistas.



**Nota.** Diagrama de barras de la designación de entrevistas por turnos de trabajo, elaboración propia.

### 5.2.2 Contraste de causas

Una vez recopiladas las respuestas de las entrevistas, se procedió al análisis detallado de cada una de ellas por lo que se examinó las respuestas en busca de patrones recurrentes y de información relevante lo que ayudó a identificar las posibles causas de los defectos en la EOE, al poder examinar se hizo un contraste conjunto de todas las entrevistas para obtener una visión más clara de los problemas y desafíos específicos que enfrenta esta industria cerámica.

La **Figura 13** muestra una nube de palabras es decir podemos interpretar de manera visual los factores más importantes en el proceso, esta nube de datos se realizó mediante el software Atlas ti, el cual ayudó de manera óptima a realizar la representación de las partes más interesantes de las entrevistas, en este caso en cada pregunta se fue clasificando por etiquetas es decir cada pregunta contiene una etiqueta o código que ayudó a organizar la nube de datos.

**Figura 13.** Nube de palabras de contraste de causas.



**Nota.** Nube de palabras realizada en Atlas Ti, elaboración propia.

A través del análisis de nube de palabras se puede observar en la **Figura 13** los puntos clave en los que los operarios se centran para el control de operaciones en la industria cerámica como se puede observar en el resultado el control de humedad es fundamental para que la cerámica surja optima, como también el tamaño de grano en el proceso de atomizado.

Según las entrevistas realizadas al personal, se determinó que el control de la humedad es esencial para obtener cerámicas de alta calidad durante el proceso de atomización del polvo. Además, el tamaño de grano juega un papel crucial en la calidad del producto final.

El análisis de la nube de palabras generada a partir de las entrevistas resalta la importancia que el personal asigna al control en la humedad y tamaño de grano en este proceso, Sin embargo, dado que la producción cerámica es un proceso complejo, se reconoce que otros factores, como la viscosidad y densidad, también influyen en el control del proceso.

En su investigación los autores Nebot, Pastor, Bellido, & Mira (2016), hablan sobre el control de la humedad del polvo atomizado durante el proceso de atomización, esto debido a que sus variaciones de humedad pueden impactar en la compacidad final y variación de las baldosas, como también el control de la variación de densidad durante el prensado ya que es

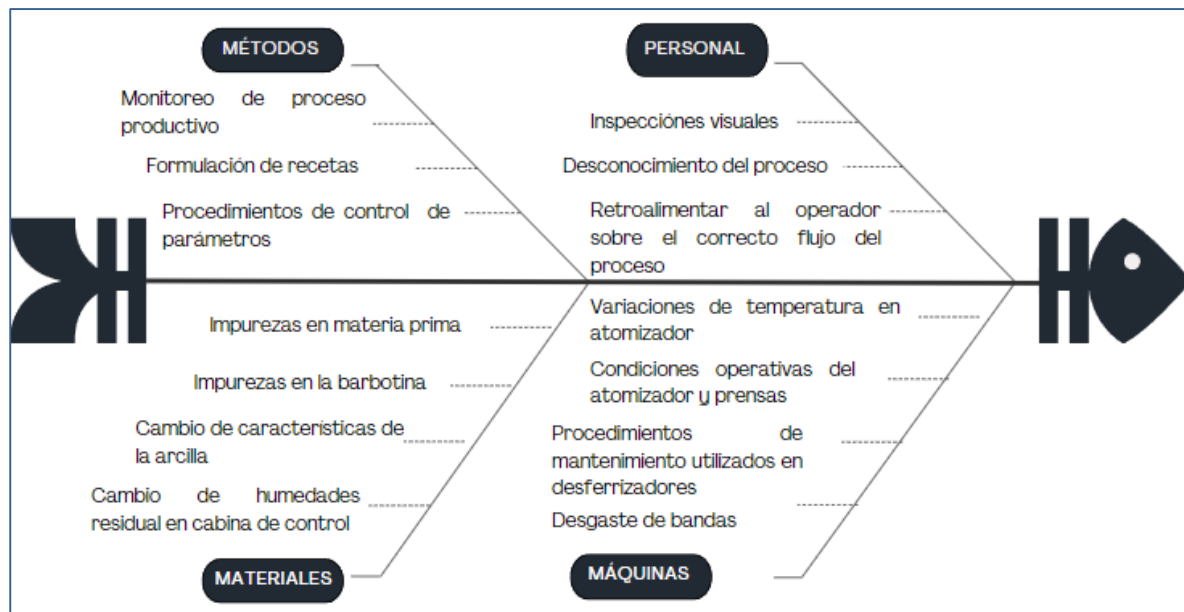
un parámetro clave para la variabilidad del producto cerámico, esto se puede lograr regulando el contenido de humedad de polvo que ingresa a la prensa ajustando la presión de prensado y sobre todo llenando cada cavidad de la prensa.

Monitorear los niveles de humedad permite optimizar el proceso, asegurando un secado eficiente y reduciendo el consumo de energía. Además, al controlar la humedad se logra obtener el contenido deseado en la baldosa cerámica, lo que contribuye a su resistencia, durabilidad y estabilidad dimensional. El estudio realizado por Castillo (2016) destaca la importancia de la influencia del porcentaje de humedad en el polvo atomizado, enfatiza la necesidad de establecer condiciones de trabajo durante el módulo de atomización- secado transporte y almacenamiento para obtener las características deseadas, para ello es importante el control de parámetros de densidad y humedad que influye en la malla 50.

El contenido de humedad es un factor crítico según los autores Amorós, Fuentes, Navarro, & Medall (2012) ya que influye significativamente en el flujo y la calidad de los polvos cerámicos utilizados en la producción de baldosa, mientras que la densidad del polvo, determinada por la porosidad intergranular y la densidad del gránulo, es crucial para el control de calidad. Los procesos de preparación del polvo, como los métodos secos tradicionales o la granulación, impactan directamente en la densidad y calidad del producto final. La investigación de los autores destaca la importancia crítica del control de la humedad y la densidad en el polvo cerámico durante el proceso de producción de baldosas. Regular el contenido de humedad en el polvo y controlar la densidad son aspectos fundamentales para garantizar la compacidad final, la variabilidad reducida de las baldosas y la calidad del producto cerámico. Estos factores también impactan en la eficiencia del secado, el consumo de energía y la resistencia, durabilidad y estabilidad dimensional de las baldosas, la influencia de estos parámetros en el proceso de atomización, secado, transporte y almacenamiento destaca la necesidad de establecer condiciones óptimas de trabajo para obtener las características deseadas en el producto final.

Después del análisis de estudio realizado a través de entrevistas a los operarios, técnicos y supervisores se construyó un diagrama de Ishikawa para sintetizar los factores más influyentes en las características del polvo atomizado, el diagrama indica las causas fundamentales que influyen en el proceso para la aparición de punto negro sin embargo, el proceso se trata de cuidar desde la molienda de materias primas, para así evitar contaminación en ellas y aparición de más defectos.

**Figura 14.** Diagrama de Ishikawa.



**Nota.** Diagrama de Ishikawa de las causas en la obtención de punto negro en las baldosas cerámicas, elaboración propia.

Para finalizar la Fase 2, se evaluó y validó la metodología establecida, garantizando la eficacia y relevancia del proceso. Se presentó el diagrama de Ishikawa junto con la nube de palabras que se encuentra en la **Figura 14**, lo que permitió clarificar las relaciones causa-efecto ante el problema de puntos negros. La validación se realizó en la EOE, donde se explicaron las causas del problema a los supervisores, quienes aportaron sus puntos de vista. Con este feedback, se validó la metodología como una herramienta confiable para continuar con el modelo de diseño experimental, asegurando un enfoque adecuado para las fases posteriores.

### 5.3 Fase 3: Ejecución del diseño experimental

Para el modelo de diseño experimental se tomó la metodología Taguchi como medida óptima para escoger la mejor condición de operación para el polvo atomizado. Esta metodología, según Castillo (2016) ayuda a identificar las características óptimas para el proceso de polvo atomizado en la producción de cerámica, esta metodología es un enfoque de ingeniería de calidad con el fin de asegurar productos de alta calidad con baja variabilidad en sus características involucrando tres etapas diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancia, en la primera etapa se identifica y clasifica factores controlables, factores relevantes y factores de alto impacto.

A través de este enfoque, se busca obtener la variación óptima de las variables y mejorar el control del proceso de producción cerámica verificando las especificaciones técnicas, especialmente en la etapa de molienda y atomización de polvo.

### 5.3.1 Factores designados para el estudio

Con la ayuda de las entrevistas realizadas los factores designados para el estudio del proyecto de investigación son:

**Factor A:** Humedad residual

**Factor B:** Granulometría del grano

**Factor C:** Densidad de barbotina

**Factor D:** Viscosidad de barbotina

### 5.3.2 Material de estudio para el diseño experimental

Para determinar el material afectado por los factores que causan el punto negro, se realizó un análisis cualitativo del defecto utilizando herramientas como R Studio. El análisis se basa en el principio del 80-20%, donde se pudo identificar las principales cerámicas con mayor incidencia de punto negro. En el **Anexo C** se muestra el estudio del material donde se encuentra la gráfica de Pareto que ayuda a identificar estas cerámicas, al conocer que las cerámicas de color claro presentan el mayor índice de este defecto, se investigó qué material compone estas cerámicas.

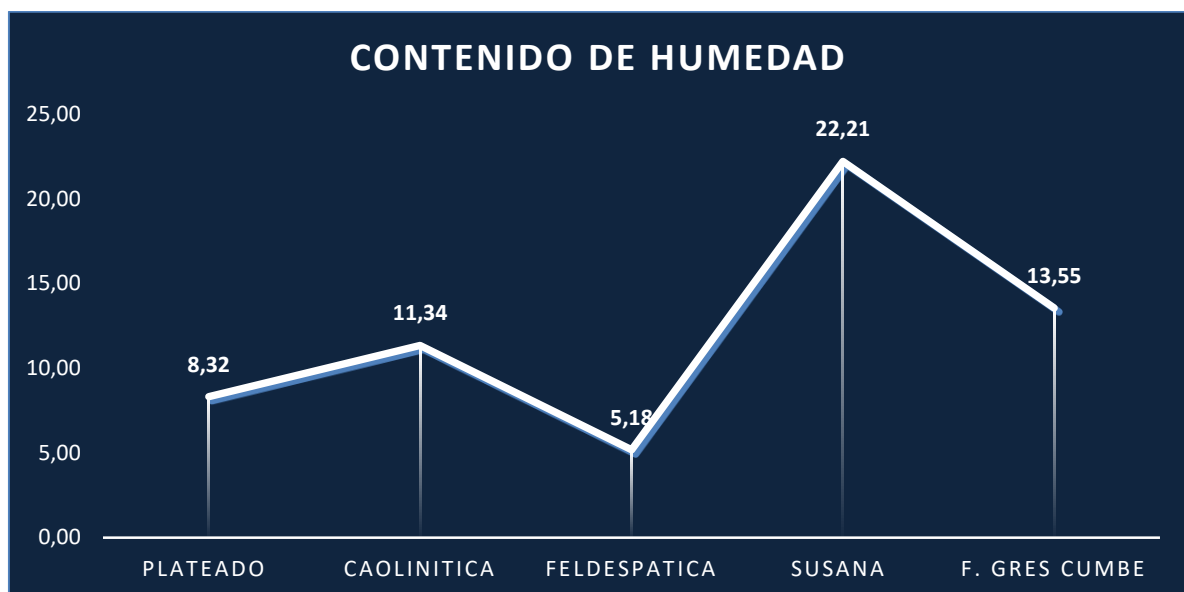
Tras analizar las fórmulas proporcionadas por el departamento de laboratorio, se determinó que los principales componentes de las cerámicas con mayor presencia de punto negro son **feldespatos, caolín y arcilla Susana**. Estas tres materias primas son fundamentales en la composición de estas cerámicas.

La **Figura 15** indica cómo se encuentra el contenido de humedad de las arcillas en promedio del año para el caso de estudio, como se puede observar que la arcilla Susana posee un porcentaje de humedad del 22.21%, Gres Cumbe presenta un porcentaje de humedad de 13.55%, siguiéndole el Caolín con un 11.34% de humedad mientras que las arcillas con menor porcentaje de humedad durante el periodo fueron la Plateada con 8.32% y la arcilla Feldespática con el 5.18%, cabe recalcar que los valores varían a lo largo del periodo.



Durante del periodo de estudio 2022-2023, los datos mostraron un rango de variación en el contenido de humedad. La arcilla Feldespática tuvo un mínimo de 4.5% y un máximo de 6%, mientras que la arcilla Plateada vario entre un mínimo de 7.2% y un máximo de 9.2%, la arcilla Caolín presentó un mínimo de 9.8% y un máximo de 12.9%, la arcilla Gres Cumbe mostro un rango de humedad entre un mínimo de 12.6% y un máximo de 16.4%. Por su parte, la arcilla Susana que presenta los mayores porcentaje de humedad, tuvo un rango de variación con un mínimo de 12.2% y un máximo de 28.7%.

**Figura 15.** Contenido de humedad



**Nota.** Contenido de humedad de las materias primas para la producción de cerámica en la EOE, elaboración propia.

### 5.3.3 Modelo de diseño experimental

Una vez identificados los factores, se elaboró un protocolo para la ejecución del diseño experimental, detallado en el **Anexo D**. En este protocolo se describió paso a paso cómo se seleccionó un arreglo ortogonal utilizando el software Minitab. Se escogió un diseño L9 ( $3^4$ ), lo que significa que se realizarán 9 corridas con 3 niveles para cada uno de los 4 factores estudiados, en la **Figura 16** se indica los números de experimentos a realizar. Aunque el proyecto se encuentra en el rango de análisis de 4 a 7 factores, lo que implicaría un arreglo ortogonal L8 y 8 corridas, el software Minitab permite realizar 9 corridas. Por lo tanto, en el desarrollo experimental del diseño se llevarán a cabo 9 experimentos, cada uno con 3 niveles: bajo, medio y alto.

**Figura 16.** Arreglo ortogonal Metodología Taguchi.

Número de factores a analizar	Arreglo ortogonal	Número de corridas
Entre 2 y 3	L4	4
Entre 4 y 7	L8	8
Entre 8 y 11	L12	12
Entre 12 y 15	L16	16
Entre 16 y 31	L32	32
Entre 32 y 63	L64	64

**Nota.** Designación de los arreglos ortogonales según el número de factores a analizar, obtenido de (Palacios, Lira, Pacheco, & Esquivias, 2020)

Al diseñar el DOE (Diseño de Experimentos) en el software Minitab y seleccionar la opción "más pequeño es mejor", los resultados se presentaron en la matriz de priorización (**Tabla 3**), donde se asignó a cada factor un nivel de estudio específico.

**Tabla 3.** Resumen del modelo del diseño experimental.

Resumen del diseño				
Arreglo de Taguchi L9(3 <sup>4</sup> )				
Factores: 4				
Corridas: 9				
↓	C1-T	C2-T	C3-T	C4-T
	Factor A Humedad Residual	Factor B Granulometría	Factor C Densidad	Factor D Viscosidad
1	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
2	Bajo	Medio	Medio	Medio
3	Bajo	Alto	Alto	Alto
4	Medio	Bajo	Medio	Alto
5	Medio	Medio	Alto	Bajo
6	Medio	Alto	Bajo	Medio
7	Alto	Bajo	Alto	Medio
8	Alto	Medio	Bajo	Alto
9	Alto	Alto	Medio	Bajo

**Nota.** Elaboración propia

### 5.3.4 Caracterización del polvo atomizado

En el proyecto de investigación, se tomó pequeñas muestras para determinar las especificaciones necesarias en cada experimento y la cantidad de punto negro presente en cada una. Para lograr los niveles indicados, se varió las temperaturas dentro de la cabina de control y se reguló la presión de las bombas durante el proceso de molienda y atomización. Se utilizaron herramientas para ayudar en esta determinación, tomando como referencia las especificaciones actuales, la **Tabla 4** indica las condiciones trabajadas para la toma de muestras.

**Tabla 4.** Tabla de variación de niveles para la toma de muestras.

Nivel	Temperatura (°C)	Presión (Bar)
1 (Bajo)	535	14
2 (Medio)	525 a 530	16
3 (Alto)	520	17

**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.3.4.1 Determinación del porcentaje de humedad

La determinación de la humedad residual se llevó a cabo utilizando el método descrito en el documento **GP-751-1912**, este procedimiento tiene como objetivo determinar la humedad de materias primas, polvos atomizados, baldosas sin cocción empleando hornilla eléctrica o luz infrarroja.

#### 5.3.4.2 Determinación de tiempo de escurrido de viscosidad

Para la determinación del tiempo de escurrido se utilizó el método descrito en el documento **GP-751-003**, el objetivo de este procedimiento es medir la viscosidad de arcillas, barbotinas, engobes y esmaltes utilizados en las tecnologías de mono-quema empleando la copa Ford.

#### 5.3.4.3 Determinación de densidad (g/ml)

La determinación de la densidad se realizó siguiendo el método descrito **GP-751-002**, utilizando un picnómetro. Este procedimiento es aplicable a diversos materiales incluyendo arcillas, feldespatos, barbotinas y engobes.

#### 5.3.4.4 Determinación de granulometría

La determinación de la granulometría se llevó a cabo utilizando el método descrito en el documento **GP-751-0010**, el cual establece el procedimiento para medir el tamaño de grano de materias primas y polvo atomizado.

#### 5.3.4.5 Detección de hierro

Para la determinación de retención de hierro se utilizó el método descrito en **GP-04-274**, el cual establece el procedimiento de retención de hierro de las materias primas de soporte procedentes de minas, patios, boxes y barbotina de producción.

#### 5.3.5 Diseño experimental en el software

Para identificar la variable que requiere mayor control durante el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, y al tomar las muestras según el diseño del software Minitab los resultados obtenidos durante los días de toma de muestras siguiendo los parámetros descritos se pueden visualizar en la **Tabla 5**, donde muestra el factor de señal/ruido de cada

una de las combinaciones, al poner el resultado obtenido podemos observar que el diseño es un diseño robusto ya que se enfoca en minimizar la variabilidad del proceso, manteniendo consistencia incluso bajo condiciones cambiantes.

**Tabla 5.** Registro de muestras con resultados obtenidos de hierro.

Registro de muestras					
# Muestra	Factor A Humedad	Factor B Granulometría	Factor C Densidad	Factor D viscosidad	Porcentaje de hierro retenido
1	5,8	0,97	1,622	36	0,28
2	6,1	1,02	1,626	45	0,31
3	6,3	1,23	1,636	47	0,33
4	7	0,98	1,625	46	0,31
5	6,9	1,01	1,638	47	0,29
6	6,8	1,24	1,610	43	0,28
7	7,9	0,87	1,637	48	0,19
8	7,6	1,04	1,633	44	0,25
9	8,1	1,24	1,625	43	0,32

**Nota.** Elaboración propia.

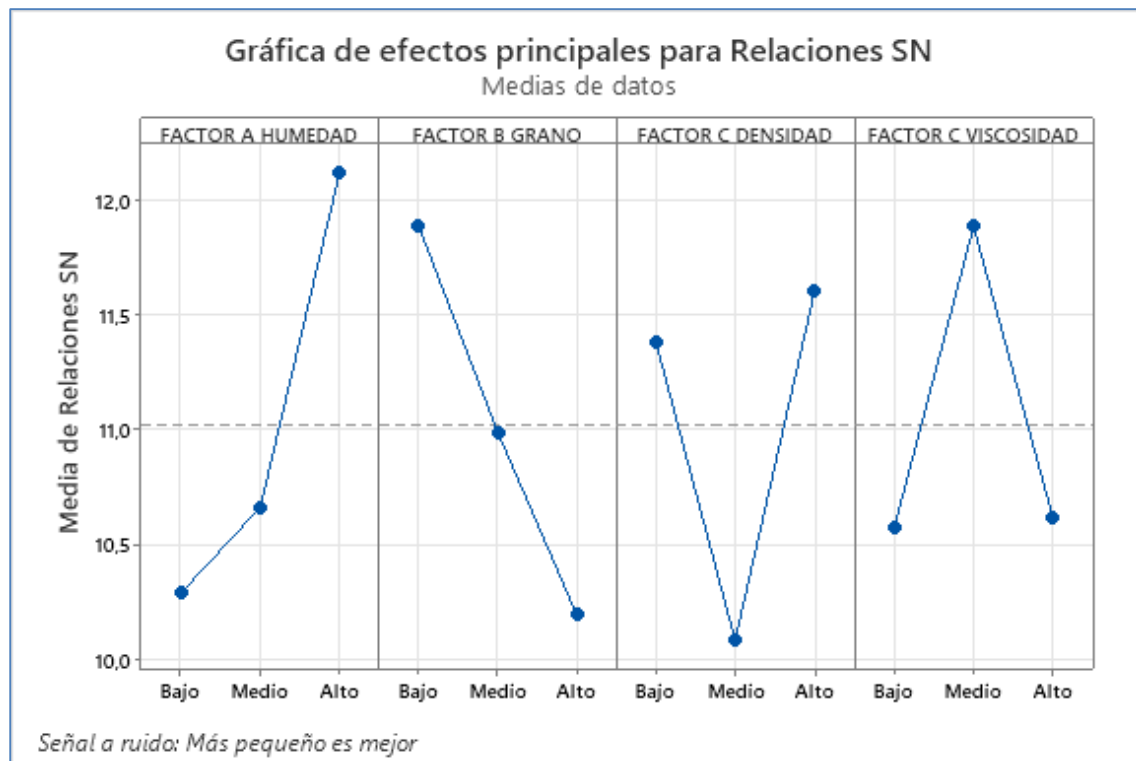
Durante la ejecución del modelo, se priorizó una razón de señal/ruido más baja, ya que en el diseño experimental buscábamos la combinación que minimizara el porcentaje de hierro retenido. La **Figura 17** muestra los efectos principales de cada factor en relación con la señal/ruido, el porcentaje de hierro retenido.

Se observa que un nivel alto de humedad es óptimo para la estabilidad al trabajar con altos niveles de humedad, mientras que un nivel bajo es preferible para el factor B, el factor C muestra un óptimo en un nivel alto, y el factor D en un nivel medio, para lograr condiciones de trabajo ideales.

Estos resultados permitieron prever y configurar las condiciones de trabajo necesarias para minimizar la presencia de puntos negros en la fabricación de baldosas cerámicas. El análisis estadístico utilizando el diseño de experimentos (DOE) determinó que una configuración óptima incluye un alto nivel de humedad de (7.9%), baja granulometría de (0.87%), alta densidad de barbotina (1,637 g/ml) y una viscosidad media de la barbotina de (48s). Estas condiciones son ideales para obtener un polvo atomizado de alta calidad con un bajo porcentaje de hierro.

Esta configuración logró una predicción de 14.424 y un porcentaje de punto negro de **0.19**, lo que resalta la importancia de estas condiciones para mejorar la calidad del producto final y optimizar los procesos de producción en la empresa estudiada.

**Figura 17** Gráfica de efectos principales para relación de señal ruido SN



**Nota.** Efectos principales de señal ruido de cada una de las variables para establecer la mejor condición de trabajo.

**Figura 18** Condición Óptima para el proceso de polvo atomizado

### Configuración

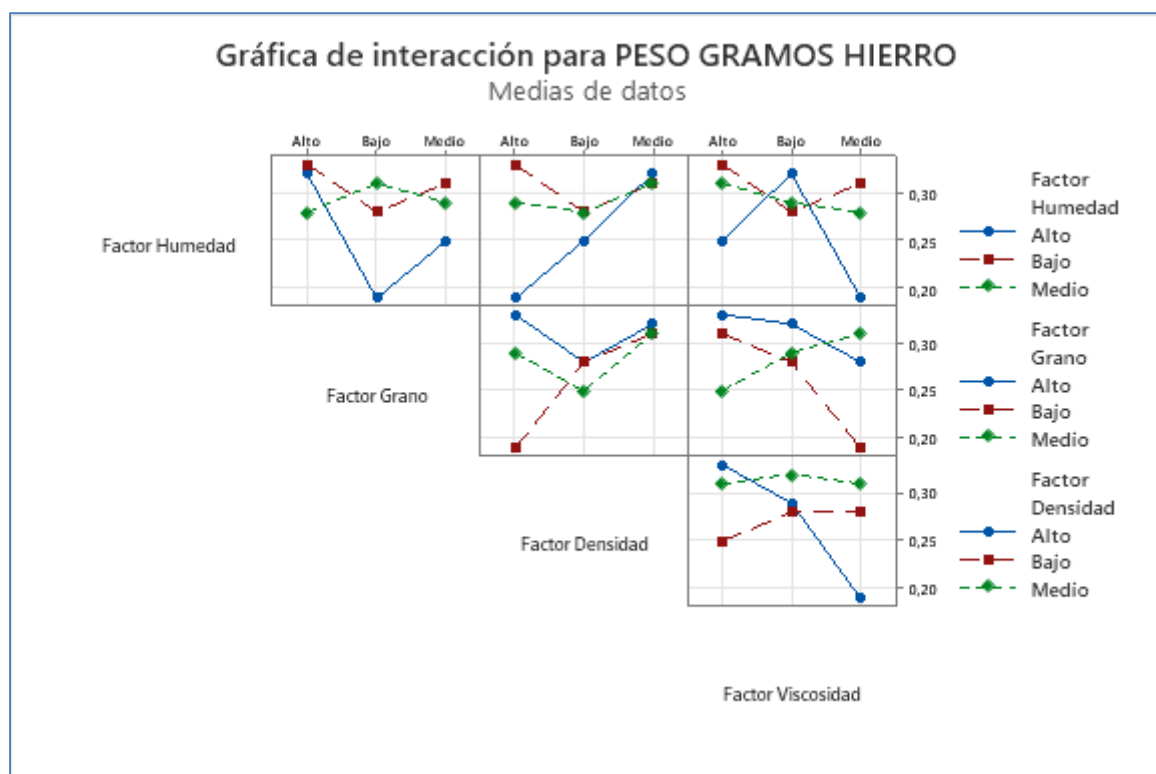
FACTOR A HUMEDAD	FACTOR B GRANO	FACTOR C DENSIDAD	FACTOR C VISCOSIDAD
Alto	Bajo	Alto	Medio

**Nota.** Configuración del mejor factor para la obtención de menor porcentaje de hierro en el polvo atomizado.

Se construyó una gráfica de interacción (**Figura 19**) para evaluar el comportamiento conjunto de los factores que intervienen en el proceso de producción: humedad, tamaño de grano, densidad y viscosidad, con respecto al porcentaje de hierro retenido (Factor señal). Al analizar esta gráfica, se puede observar cómo se cruzan las líneas que representan los diferentes niveles de cada factor, lo que sugiere una interacción compleja entre ellos, la falta de paralelismo entre las líneas indica que la relación de cada factor con el porcentaje de hierro retenido depende del nivel de los otros factores.

El diseño experimental indica que los niveles de factores de un método de Taguchi buscan minimizar las respuestas mediante la optimización de la determinación de niveles, por lo que en este estudio se incluyen factores de control y ruido en diseños de 5 a 10 variables buscando una capacidad reducida estimando las interacciones de cada factor.

**Figura 19** Grafica de interacción de porcentaje de hierro en gramos



Al poder conocer la significancia de cada uno de los factores en el diseño experimental y sus interacciones para abordar este estudio el autor Castillo (2016), implementa la metodología Taguchi para analizar la influencia del porcentaje de material retenido en la malla 50 y el porcentaje de humedad en el polvo atomizado. Utiliza una matriz L9 ( $2^3$ ) para evaluar las propiedades de densidad en húmedo, módulo en húmedo de ruptura, densidad seca, módulo

seco de ruptura, contracción seca, porcentaje de absorción y contracción total, identificando las características óptimas del polvo atomizado. Se observan mejores comportamientos en las propiedades en el laboratorio al aumentar el porcentaje de material retenido y tener una malla más pequeña (malla 40). Por ello, establece como objetivo obtener características más adecuadas del polvo atomizado para asegurar la calidad de las propiedades físicas de las baldosas cerámicas, enfatizando el control de los factores de retención de material y contenido de humedad.

En el estudio de diseño experimental implementado por el autor Tobón (2012), se utilizó la metodología Taguchi para mejorar procesos en la industria cerámica. Este enfoque se centra en optimizar la sensibilidad a la variación de componentes y la capacidad de fabricación, dos factores clave para la selección de productos en esta metodología. El autor resalta la importancia de identificar características de calidad y parámetros que influyan en el desarrollo del producto. Los resultados del estudio ayudaron a relacionar el proceso de fabricación de cerámica y la calidad del producto contribuyendo a reducir los tiempos de producción y aumentar la competitividad en la industria.

### 5.3.6 Análisis de Resultados del Diseño Taguchi

Al analizar los resultados del diseño Taguchi, se compararon los coeficientes de los modelos de señal-ruido (SN) y de las medias para determinar el factor más influyente en el proceso de polvo atomizado y su significancia.

#### 5.3.6.1 Coeficientes de los Modelos de Relaciones SN y Medias.

**Factor C (Densidad):** El factor de densidad muestra un coeficiente alto de  $|0.9418|$  para una densidad alta y  $|-0.3623|$  para una densidad baja. Esto indica que una densidad baja está asociada con una menor aparición de punto negro, mientras que una densidad alta está significativamente asociada con una mayor aparición de este defecto.

**Factor D (Viscosidad):** El coeficiente de viscosidad es alto con  $|0.4541|$  para una viscosidad alta y  $|-0.8622|$  para una viscosidad baja. Esto sugiere que una mayor viscosidad está vinculada con un aumento en la aparición de punto negro, mientras que una viscosidad menor está relacionada con una disminución del defecto.

**Factores A (Humedad):** tiene un coeficiente para humedad alta de  $|0.7362|$  sugiriendo que el aumento de humedad hace que incremente el punto negro y al tener un coeficiente en el nivel bajo de  $|0.3621|$  es menor en comparación al nivel alto, el efecto es más moderado en la aparición de punto negro.

**Factor B (Grano):** Tiene un coeficiente de  $|-0.8622|$  indicando que un aumento en el tamaño de grano reduce el punto negro, mientras que un coeficiente en el nivel bajo de  $|0.034|$  sugiere un impacto casi nulo, indicando que el factor B tiene un efecto mínimo en la aparición del defecto.

El análisis de los coeficientes de señal/ruido indica que la densidad y la viscosidad tienen un impacto mucho más fuerte en la aparición del defecto de punto negro en comparación con la humedad. Las variaciones en la densidad y la viscosidad provocan cambios significativos en la cantidad de defecto, mientras que la humedad afecta de manera menos marcada. Por lo tanto, para reducir el defecto de manera más efectiva, es más recomendable centrarse en ajustar la densidad y la viscosidad, ya que su impacto es más significativo y directo en el proceso.

Taguchi se enfoca en identificar factores de señal y ruido que afectan el rendimiento y la calidad del sistema. La relación señal-ruido es fundamental en su metodología, ya que busca maximizar la señal (la salida deseada) y minimizar el ruido (variaciones no deseadas) para obtener los mejores resultados, incluso en condiciones incontrolables. El estudio realizado por Trejos, Varela, & Carlos (2012) señala que factores como las variaciones en las condiciones ambientales, la degradación de componentes y las diferencias entre productos del mismo diseño son factores de ruido que deben reducirse para lograr un diseño robusto, la relación señal-ruido es vital para asegurar que los productos sean menos sensibles a los cambios del entorno, minimizando pérdidas económicas por condiciones no óptimas y alcanzando los objetivos del proceso bajo factores incontrolables también indica que coeficientes de los modelos de señal-ruido en la metodología Taguchi son clave para medir y mejorar la robustez del diseño, garantizando productos de alta calidad y consistencia en diversas condiciones.

En el estudio realizado por Navarrete (2012), los coeficientes de los modelos y las medias son fundamentales para analizar resultados experimentales y optimizar procesos, determinando niveles de factores de control que mejoran la robustez del proceso frente a factores de ruido. Estos coeficientes permiten definir niveles óptimos de factores que influyen en el resultado deseado, como la contracción en las muestras. Ayudan a crear modelos precisos, libres de interacciones, esenciales para representar escenarios del mundo real. Aunque la metodología Taguchi no considera explícitamente las interacciones en el diseño experimental, comprender y analizar estos coeficientes es vital para asegurar la fiabilidad y efectividad de los resultados y las optimizaciones de procesos.



### 5.3.6.2 Análisis anova

Al emplear la herramienta RStudio para realizar un análisis de varianza (ANOVA), el cual ayudó a evaluar el impacto de los factores de humedad, grano, densidad y viscosidad con respecto al porcentaje de hierro retenido, se indica que ninguno de los factores muestra un efecto estadísticamente significativo a un nivel de significancia de 0.05. El factor de humedad tiene un valor p de 0.263, lo que indica que su influencia en el porcentaje de hierro retenido no es significativa. El factor de grano presenta un valor p de 0.125, indicando que no tiene un impacto considerable en el porcentaje de hierro retenido. El factor de densidad, con un valor p de 0.712, demuestra un impacto mínimo, confirmando que la densidad no posee significancia. Finalmente, el factor de viscosidad, con el valor p más alto de 0.908, muestra que sus efectos son los menos significativos entre los factores analizados. Estos resultados indican que no se ha encontrado evidencia suficiente para afirmar que los factores analizados (humedad, densidad, grano, viscosidad) afecten de manera significativa el porcentaje de hierro retenido.

**Figura 20** Análisis anova

```
> # Mostrar resultados
> summary(modelo_anova_nuevos)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Factor_A_Humedad	1	0.002607	0.002607	1.693	0.263
Factor_B_Grano	1	0.005790	0.005790	3.760	0.125
Factor_C_Densidad	1	0.000242	0.000242	0.157	0.712
Factor_D_Viscosidad	1	0.000023	0.000023	0.015	0.908
Residuals	4	0.006160	0.001540		

**Nota.** Análisis de varianza (ANOVA) del caso de estudio.

## 6. Conclusiones

El objetivo del caso de estudio fue establecer condiciones de operación para el proceso de barbotina y polvo atomizado en la producción de cerámica, en función de este objetivo se concluye que el diseño experimental realizado permitió identificar las condiciones óptimas de operación para el proceso de polvo atomizado, considerando factores como la humedad residual, granulometría del grano, densidad y viscosidad, estas condiciones son fundamentales para garantizar la calidad del producto final y minimizar la presencia de defectos como el punto negro en las baldosas cerámicas. A través del análisis de Pareto se logró identificar que las baldosas claras presentan un mayor índice de punto negro, lo que destaca la importancia de identificar y controlar los factores que influyen en este defecto para

mejorar la calidad en la producción de baldosas cerámicas. El análisis de defectos en baldosas cerámicas es esencial para garantizar su calidad según el estudio realizado por Orts, Enrique, Gozalbo, & Negre (2015), el cual indica que al abordar este análisis ayuda a cuantificar problemas en materias primas, preparación de pastas y procesos de secado, permitiendo mejoras, así como también las causas de los defectos es crucial para implementar soluciones sin afectar otros aspectos del proceso o del producto cabe recalcar que se debe clasificar los defectos críticos y los que afectan durabilidad mejora la calidad y satisface al cliente.

El análisis de la cadena de valor permitió identificar y comprender las variables clave que intervienen en el proceso de producción de barbotina y polvo atomizado en la industria cerámica. Este enfoque facilitó la visualización de todo el proceso productivo, proporcionando una base sólida para futuras mejoras y optimizaciones en la producción, garantizando que los materiales cumplan con las características adecuadas.

Los recursos, tecnología y conocimiento técnico presentes en la organización revelan la viabilidad de implementar las condiciones óptimas de operación en el proceso de producción cerámica, proporcionando una visión integral de los factores que afectan el proceso. Los resultados cualitativos, basados en entrevistas y en el análisis de la nube de palabras, destacan que la humedad y el tamaño de grano son considerados críticos por los operarios, supervisores y técnicos para asegurar la calidad del producto final. Por otro lado, el análisis cuantitativo de coeficientes SN sugiere que, aunque la humedad y el tamaño de grano son importantes, la densidad y la viscosidad juegan un papel crucial en la reducción del defecto de punto negro.

Los resultados obtenidos del estudio de diseño experimental muestran que la configuración óptima para minimizar la aparición de punto negro en el proceso de producción cerámica es: humedad alta, tamaño de grano bajo, densidad alta y viscosidad media. Esta configuración ha logrado reducir el defecto de punto negro a un porcentaje de **0.19**, que es menor en comparación con otros valores obtenidos en diferentes configuraciones. El análisis de señal/ruido revela que en términos generales, un coeficiente alto de densidad (0.9418) y un coeficiente alto de viscosidad (0.4541) están asociadas con un aumento en la aparición de puntos negros, es decir una alta densidad y viscosidad tienden a incrementar el defecto, mientras que una baja densidad y viscosidad tienen el efecto contrario.

Aunque la configuración actual ha dado los mejores resultados en las pruebas, el impacto negativo de la alta densidad y viscosidad en la aparición de puntos negros no puede ser ignorado. Por lo tanto, se recomienda continuar investigando y realizando ajustes en los niveles de estos factores para identificar una configuración que pueda optimizar aún más la reducción de puntos negros sin depender tanto de la humedad alta y el tamaño de grano bajo.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado en Rstudio no detectó efectos estadísticamente significativos de los factores de humedad, grano, densidad y viscosidad sobre el porcentaje de hierro retenido, obteniendo valores p superiores a 0.05 en todos los factores. Mientras que el análisis de coeficientes de señal/ruido indican que tanto la densidad como la viscosidad tienen un impacto relevante en la aparición del defecto de punto negro. Esta diferencia sugiere que a pesar de la falta de significancia estadística en el estudio ANOVA, los factores estudiados pueden influir en la variabilidad del proceso. Por lo tanto es recomendable ajustar la densidad y viscosidad para reducir la aparición de puntos negros, considerando que su impacto puede no haberse reflejado en los resultados de ANOVA.

Se observó una interacción compleja entre las variables estudiadas humedad residual, densidad, granulometría y viscosidad, donde el efecto de cada factor en el porcentaje de hierro retenido depende del nivel de los otros factores. Esta interacción destaca la importancia de considerar todas las variables de manera integral al optimizar el proceso de producción, lo que sugiere la necesidad de un enfoque holístico en la fase de diseño experimental.

Algunas limitaciones como el limitado acceso a la información para la recolección de datos, debido a que la empresa opera bajo estrictas políticas de confidencialidad. Además, fue necesario esperar la aprobación del equipo de laboratorio para proporcionar los datos, lo que dificultó el estudio. Durante el proceso de toma de muestras, se presentaron complicaciones, ya que se tuvo que esperar las aprobaciones de los supervisores de operaciones para proceder con las muestras piloto en el laboratorio, lo que generó retrasos en el estudio. Así mismo, se repitió la toma de muestras en varias ocasiones, ya que algunas no resultaron correctas debido a que aún se estaba aprendiendo a manejar el equipo. Sin embargo, con la ayuda de los operadores, se logró superar estos obstáculos.

Una limitación del proyecto de investigación fue el acceso a la empresa, ya que se rigen por diversos factores y restricciones para tesis, lo cual representó una barrera significativa para el desarrollo del proyecto.

### 6.1 Estudios futuros

Realizar un estudio detallado para optimizar las condiciones de operación del proceso de atomización de polvo, centrándose en los factores críticos como la densidad y la viscosidad, esto podría incluir la exploración de nuevos métodos de control y monitoreo para garantizar estabilidad y consistencia al proceso de fabricación de cerámica.

Realizar un estudio más profundo de las interacciones complejas entre las variables de estudio, especialmente en la relación con la retención de hierro esto podría ayudar a comprender como ciertos factores pueden influir unos con otro sobre todo a optimizar su control para minimizar defectos.

Se recomienda profundizar en las causas de mayor índice de aparición de puntos negros en las baldosas claras, como las impurezas en la materia prima y la barbotina, que podrían estar contribuyendo a la aparición de estos defectos. Un control más riguroso en la selección y preparación de los materiales, especialmente en lo que respecta a la eliminación de partículas no deseadas, es fundamental. Además, el cambio en las características de la arcilla también debe ser analizado, ya que las variaciones en su composición podrían estar afectando el proceso de producción. Finalmente, es importante considerar la implementación de nuevas tecnologías, como técnicas de atomización más avanzadas o métodos de control más precisos, para mejorar tanto la calidad como la eficiencia en la producción cerámica.

## 7. Referencias

- Altamirano, K. A., Romero, R. A., & Ferrer, M. A. (09 de Febrero de 2022). *redalyc*. Obtenido de redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28070565016>
- Amorós, J. L., Fuentes, A. B., Navarro, J. E., & Medall, F. N. (15 de Febrero de 2012). *dialnet.unirioja.es*. Obtenido de *dialnet.unirioja.es*: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8109572>
- arquitectura-sostenible. (17 de Abril de 2023). *arquitectura-sostenible*. Obtenido de arquitectura-sostenible: <https://arquitectura-sostenible.es/ceramica-material-milenario-construccion-sostenible/>
- Auz, G. E. (02 de Octubre de 2018). *bibdigital*. Obtenido de bibdigital: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19769/1/CD-9175.pdf>
- Avalos, J. M., Benites, S. E., Condor, F. T., & Durand, A. J. (02 de Mayo de 2022). *repositorioacademico.upc*. Obtenido de repositorioacademico.upc: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/660229>
- Betancourth, O. O. (12 de Marzo de 2018). *dspace.espace.edu.ec*. Obtenido de dspace.espace.edu.ec: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/8639>
- Calderón, D. C. (03 de Julio de 2020). *repositoriodspace.unipamplona*. Obtenido de repositoriodspace.unipamplona: [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5343/1/Lenis\\_2020\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5343/1/Lenis_2020_TG.pdf)
- Castillo, W. D. (Marzo de 2016). *ucv.ve*. Obtenido de ucv.ve.
- Chavez, G. M., & Mancheno, C. (06 de Julio de 2013). *dspace.ups*. Obtenido de dspace.ups: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4783/1/UPS-CT002639.pdf>
- Delgado, D. D., Panchi, D. V., Salazar, K. T., Pinos, R. L., & Guano, M. B. (30 de Abril de 2021). *tambara.org*. Obtenido de tambara.org: [https://tambara.org/wp-content/uploads/2021/04/DIAGRAMA-ISHIKAWA\\_FINAL-PDF.pdf](https://tambara.org/wp-content/uploads/2021/04/DIAGRAMA-ISHIKAWA_FINAL-PDF.pdf)
- García, D. (23 de 05 de 2020). *academia.edu*. Obtenido de academia.edu: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63405179/Mapeo\\_de\\_procesos\\_y\\_su\\_alcance20200523-11549-9qhrrq-libre.pdf?1590251089=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMapeo\\_de\\_procesos\\_y\\_su\\_alcance.pdf&Expires=1713833289&Signature=cUWDjQNPTsmtx23aQKX-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/63405179/Mapeo_de_procesos_y_su_alcance20200523-11549-9qhrrq-libre.pdf?1590251089=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMapeo_de_procesos_y_su_alcance.pdf&Expires=1713833289&Signature=cUWDjQNPTsmtx23aQKX-)
- Gasch, J. G. (23 de Enero de 2006). *qualicer.org*. Obtenido de qualicer.org: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/0611040s.pdf>

- Guiseppe, D., & Revel, G. (25 de 01 de 2006). *qualicer.org*. Obtenido de *qualicer.org*: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/0063304s.pdf>
- Hernández, A. B., Guillon, M. d., & García, L. A. (21 de Agosto de 2015). *revistas.unc.edu.ar*. Recuperado el 26 de Octubre de 2023, de *revistas.unc.edu.ar*: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/11986>
- Hernández, A., Guillon, M. d., & García, L. (21 de 08 de 2015). */repositoriodspace.unipamplona*. Obtenido de */repositoriodspace.unipamplona*: [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/2296/1/Casadiago\\_2015\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/2296/1/Casadiago_2015_TG.pdf)
- Hernández, R. S., Fernández, C. C., & Baptista, P. L. (24 de Febrero de 2014). *metodos-comunicacion.sociales.uba*. Obtenido de *metodos-comunicacion.sociales.uba*: <http://metodos-comunicacion.sociales.uba.ar/wp-content/uploads/sites/219/2014/04/Hernandez-Sampieri-Cap-1.pdf>
- Jarque, Cantavella, Segarra, Mallol, Cabrera, & Gascón. (25 de 01 de 2006). *qualicer.org*. Obtenido de *qualicer.org*: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/0062322s.pdf>
- Maldonado, E. F., Ramón, E. X., Labanda, D. Q., & Muñoz, V. E. (01 de Mayo de 2017). *dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores*. Obtenido de *dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores*: <https://dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/447/642>
- Navarrete, J. D. (08 de Octubre de 2012). *ciatec*. Recuperado el 25 de Mayo de 2024, de *ciatec*: <https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/47>
- Nebot, J. A., Pastor, C. V., Bellido, G. B., & Mira, J. S. (01 de Diciembre de 2016). <https://repositori.uji.es/>. Obtenido de <https://repositori.uji.es/>: [https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/165626/bruscas\\_estudio\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/165626/bruscas_estudio_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Negre, F., Jarque, C., Feliu, C., & Enrique, J. (06 de Abril de 2007). *qualicer*. Obtenido de *qualicer*: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/9423071s.pdf>
- Orts, M. J., Enrique, J. E., Gozalbo, A., & Negre, F. (07 de 04 de 2015). *qualicer.org*. Recuperado el 27 de Mayo de 2024, de *qualicer.org*: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/9003032s.pdf>
- Palacios, F. N., Lira, A. J., Pacheco, Y. V., & Esquivias, M. T. (09 de 01 de 2020). *scielo.org.mx*. Obtenido de *scielo.org.mx*: <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v21n2/1405-7743-iit-21-02-e1621.pdf>
- Pulido, H. G., & Salazar, R. d. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos* (Vol. 2). México D.F: McGRAW-HILL Interamericana.

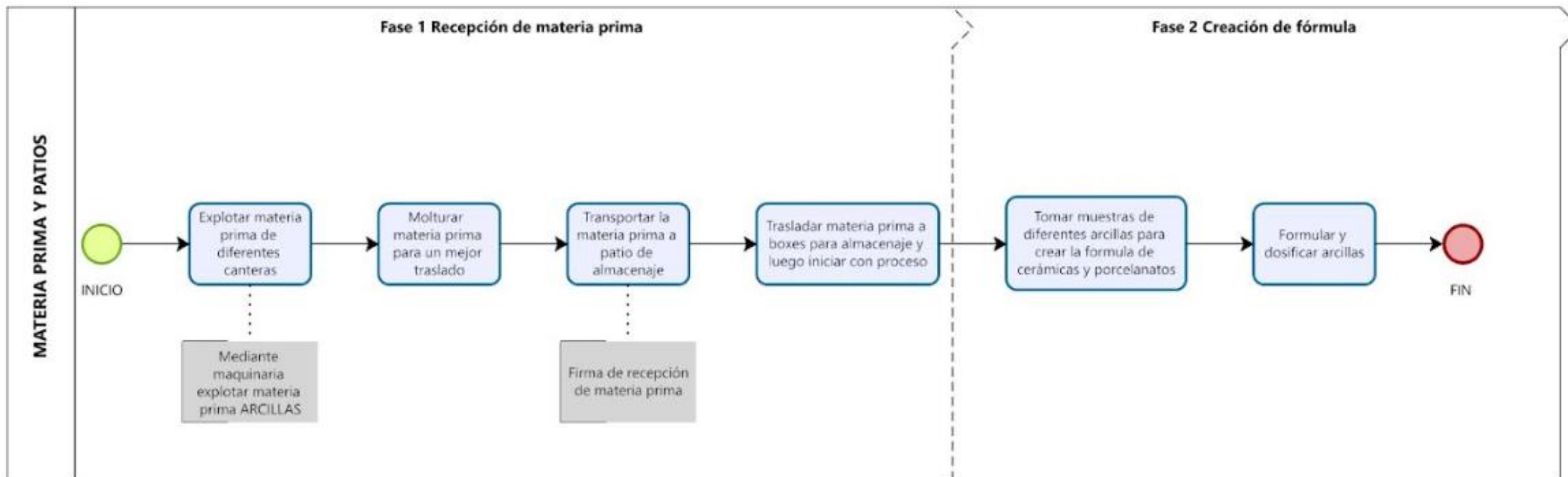
- Reyes, R. H., & Guzmán, J. C. (05 de Julio de 2023). *teceo.slp.tecnm*. Obtenido de teceo.slp.tecnm: <https://teceo.slp.tecnm.mx/index.php/teceo/article/download/72/34>
- Russo, J. A. (21 de Febrero de 2021). *ucab*. Obtenido de ucab: <http://catalogo-gy.ucab.edu.ve/documentos/tesis/36257.pdf>
- SACMI. (2004). *Tecnología Cerámica Aplicada*. Castellón, España: Asociación Española de Técnicos Cerámicos.
- Sanchis, R., Peñarocha, I., Ariño, C., & Romero, J. A. (20 de Agosto de 2014). *researchgate.net*. Obtenido de researchgate.net: [https://www.researchgate.net/publication/224982176\\_Problemas\\_de\\_control\\_con\\_medidas\\_escasas\\_en\\_la\\_industria\\_de\\_fabricacion\\_de\\_azulejos](https://www.researchgate.net/publication/224982176_Problemas_de_control_con_medidas_escasas_en_la_industria_de_fabricacion_de_azulejos)
- Siccha, A., & Ugaz, O. L. (26 de Enero de 2014). *revistas.pucp.edu.pe*. Obtenido de revistas.pucp.edu.pe: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/download/8354/8661>
- Tobón, J. A. (16 de Octubre de 2012). *repositorio.unal.edu.co*. Obtenido de repositorio.unal.edu.co: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11721/8100516.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trejos, E. A., Varela, P. D., & C. A. (Abril de 2012). *redalyc.org*. Recuperado el 25 de Mayo de 2024, de redalyc.org: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84923878009.pdf>
- Valenciana, A. T., & Picón, L. A. (30 de 06 de 2020). *cathi.uacj.mx*. Obtenido de cathi.uacj.mx: <https://cathi.uacj.mx/bitstream/handle/20.500.11961/15518/507-Texto%20del%20art%20c3%adculo-1306-1-10-20200920.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rigchag, D. P. (24 de Enero de 2019). *dspace.esPOCH*. Obtenido de dspace.esPOCH: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10195>
- Martínez, C. M. (12 de Febrero de 2020). *bibliotecadigital.udea*. Obtenido de bibliotecadigital.udea: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16088/1/MolinaCamilo\\_2020\\_CaracterizacionMateriasPrimas.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16088/1/MolinaCamilo_2020_CaracterizacionMateriasPrimas.pdf)



## Anexos

### Anexo A: Diagramas de cada módulo de fabricación de baldosas cerámicas.

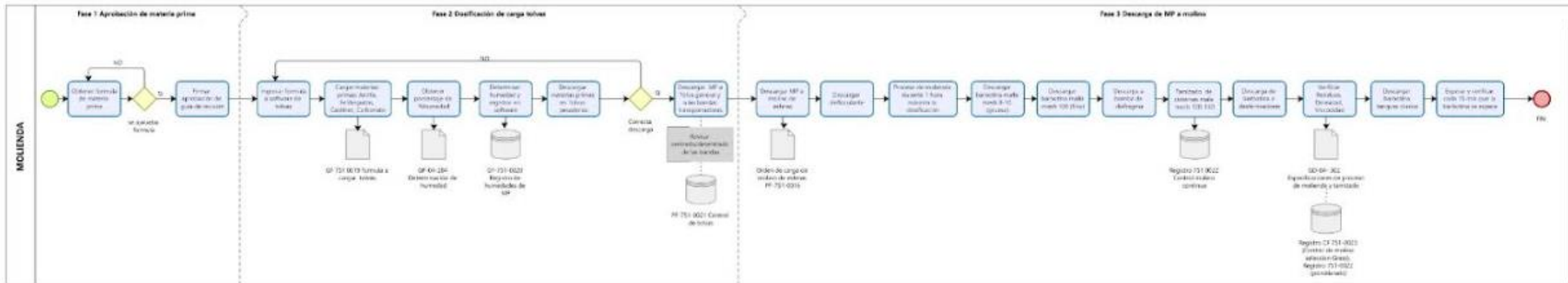
#### 1. Proceso de Materia Prima y Patios



**Nota.** Proceso de obtención de materia prima y traslado a patio de concentración.

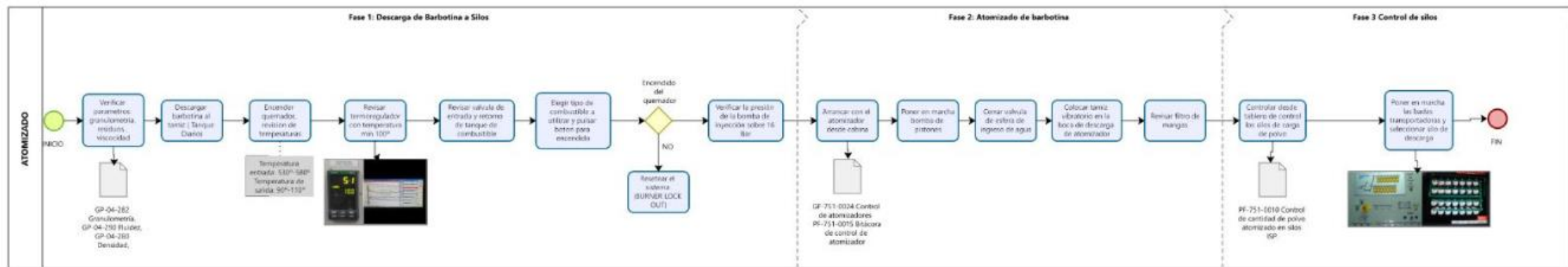


## 2. Proceso de molienda



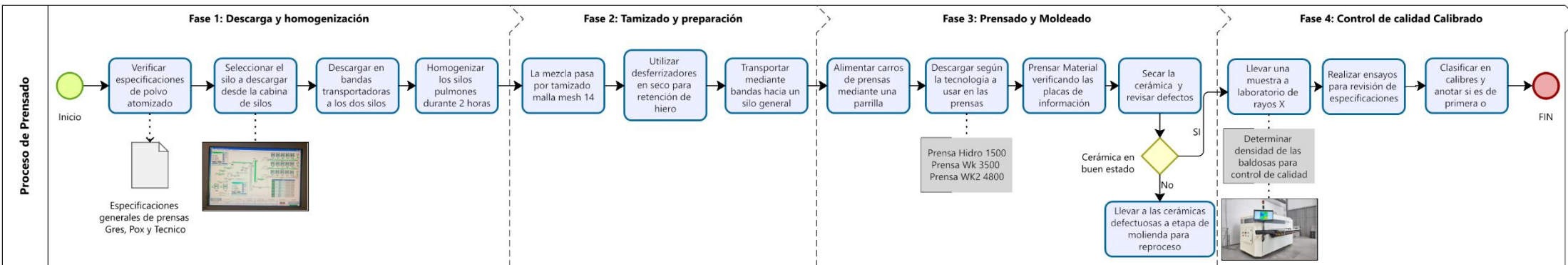
**Nota.** Diagrama de proceso de la etapa de molienda, para la obtención de barbotina.

## 3. Proceso de Atomización



**Nota.** Diagrama de proceso de la etapa de atomización, para la obtención de polvo atomizado

## 4. Proceso de Prensado



**Nota.** Diagrama de proceso de la etapa de prensado, para la obtención de baldosa cerámica compacta.

**Anexo B: Modelo de entrevista para determinar causas.**

## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

## INGENIERÍA INDUSTRIAL

## 1. Datos generales

Cargo		Área		Turno	
Departamento					

## 2. Datos de plan de tesis

**Título:** “Condiciones de operación óptimas para el proceso de atomización de polvo en laproducción de cerámica gres y porcelanato”

**Objetivo:** Establecer condiciones de operación determinadas para el proceso de barbotina ypolvo atomizado en la producción de cerámica gres y porcelanato.

PREGUNTAS DE LA ENTREVISTA
¿Cómo se monitorea la calidad del producto en relación con el proceso de atomización depolvo?
¿Qué parámetros o variables son los que más se controlan para lograr la atomización de polvo de manera óptima?
¿Cuáles son los materiales y equipos clave utilizados en este proceso?
¿Cómo identifica los puntos negros durante el proceso productivo?

¿Cuáles son las principales características que considera al detectar un punto negro?

¿Cómo determina si el tamaño de partícula obtenido en el polvo atomizado cumple con los estándares de calidad establecidos?

De todos los parámetros de control, cuál cree usted que tiene mayor problema al realizar los controles en los procesos.

¿Dentro del proceso de producción de cerámica que proceso considera que contienen las condiciones de operación más críticas para la aparición de punto negro?

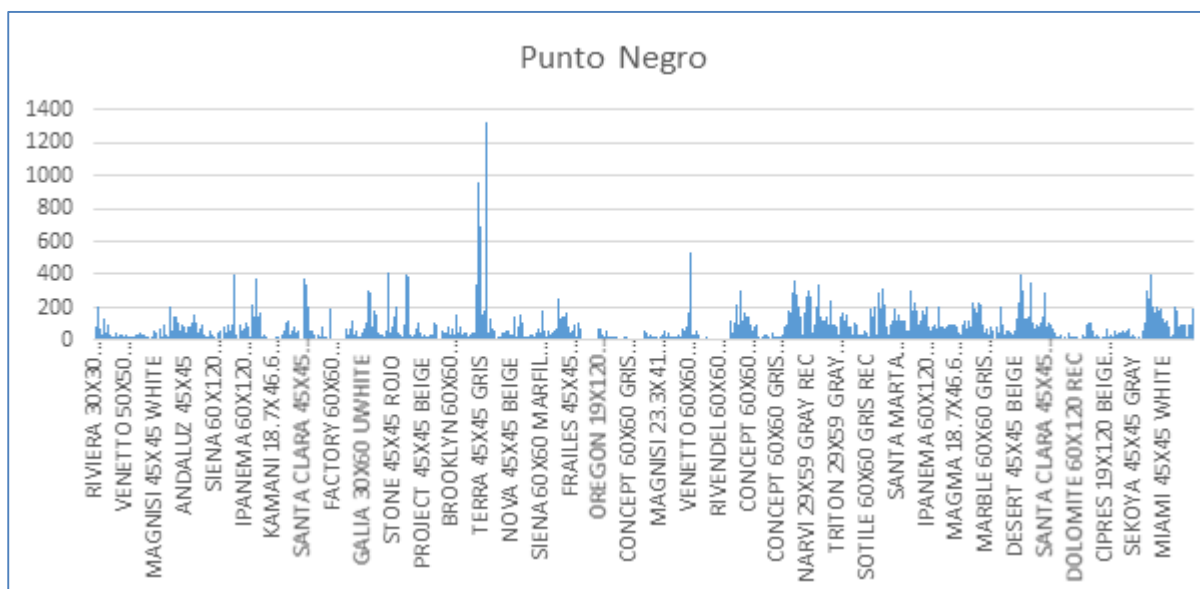
NOMBRE DEL ENTREVISTADOR	FIRMA	FECHA

**Anexo C: Modelo de decisión para elección de material****FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS****INGENIERIA INDUSTRIAL****Elaborado por:** Lisbeth Ponce**Fecha:** 05/03/2024**MODELO DE DECISIÓN PARA MATERIAL**

Para la selección del material en el diseño experimental, se utilizó una base de datos proporcionada por la empresa objeto de estudio, que contiene información sobre los defectos observados desde enero de 2023 hasta el 5 de marzo de 2024. Esta base de datos muestra la frecuencia de los defectos obtenidos en las fechas establecidas.

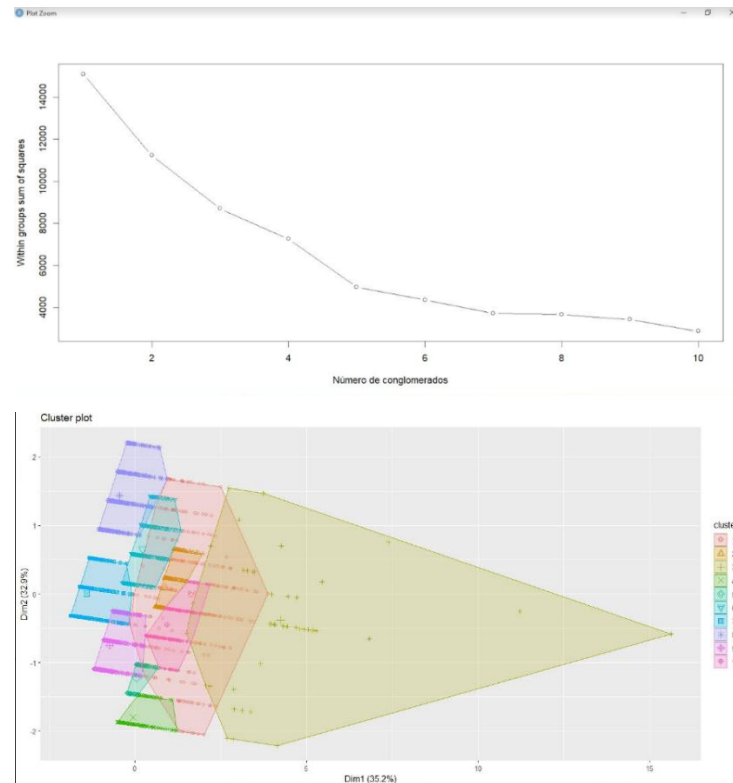
Como punto de partida, se realizó un análisis estadístico de la base de datos, filtrando y depurando las celdas vacías y los valores donde la frecuencia del punto negro era de 0. El objetivo del análisis es identificar la cerámica con el mayor índice de punto negro.

En la siguiente figura, el gráfico de barras muestra la frecuencia de aparición de punto negro para cada uno de los productos. Se observa que el producto con mayor frecuencia es el "Blanco 18.7x46.6 mate", seguido por el producto "Yute 23.3x41 marfil".



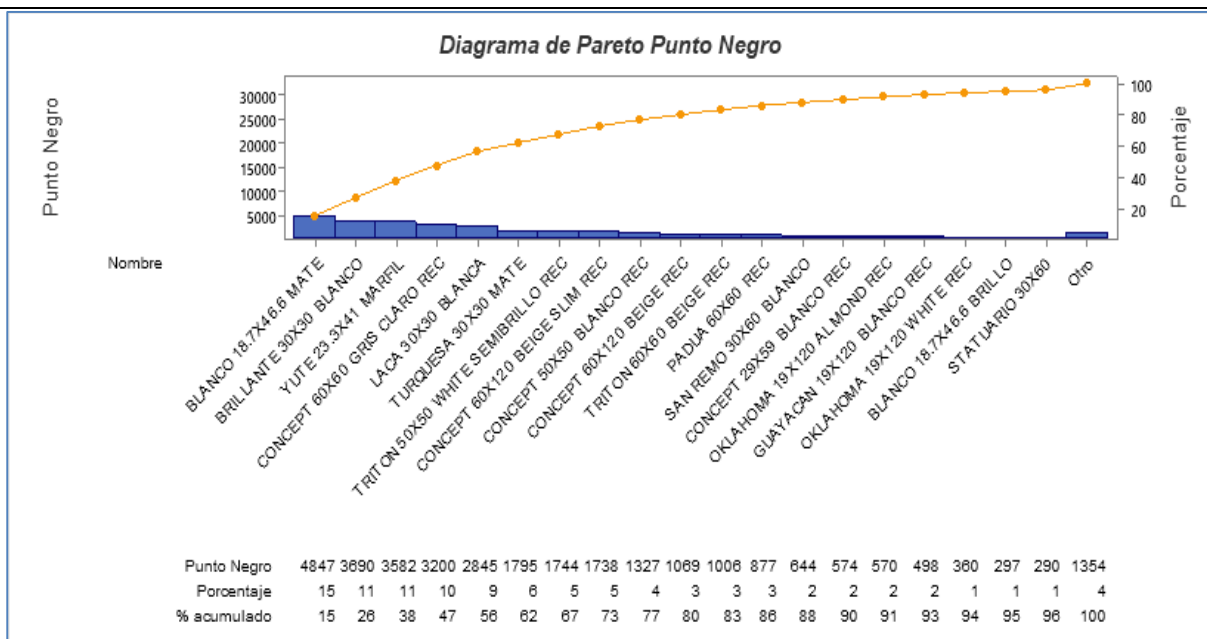
Para profundizar en el análisis de los productos con mayor frecuencia de punto negro, se realizó un análisis de conglomerados por lo que este análisis de conglomerados dio un total de 10 en el caso de estudio, la siguiente figura representa la clusterización realizada, se observa que la mayor

frecuencia se encuentra en el clúster 3, seguido por los clústeres 9 y 10, donde se concentra la mayor cantidad de punto negro.

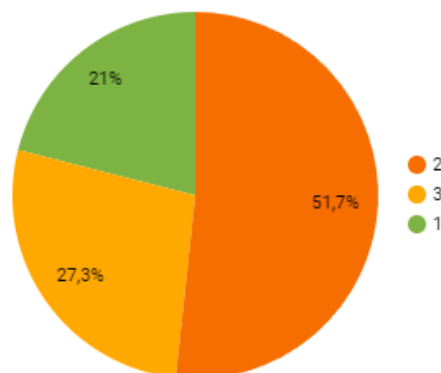


Al observar los clústeres y la gráfica de barras con el objetivo de obtener un análisis más preciso, se decidió analizar solo los datos con una frecuencia mayor a 200, ya que los valores inferiores tienen un impacto menor. Esto se debe a que se busca identificar el producto con la mayor frecuencia de punto negro en un año completo. Una vez realizada la clasificación, se procedió a filtrar la base de datos, conservando únicamente los clústeres necesarios. Luego, se elaboró un diagrama de Pareto en el software Minitab para visualizar el resultado más frecuente de la variable "Punto Negro", en la siguiente figura se muestra el diagrama de Pareto aplicando la regla del 80%-20%.

Se observa que la mayor frecuencia de punto negro se encuentra en las cerámicas de color claro, lo que indica que este defecto es más frecuente en este tipo de cerámicas.

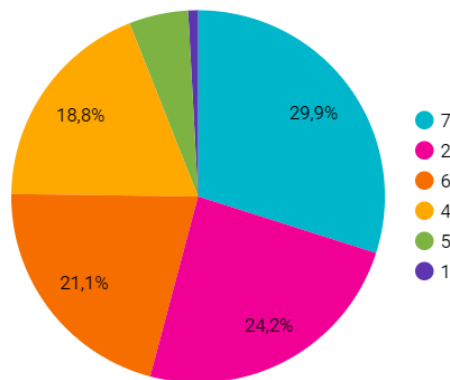


Para un análisis más detallado, se consideraron los hornos y turnos donde se produce una mayor frecuencia de punto negro. En la figura se presenta un diagrama de pastel que muestra la distribución del punto negro en los diferentes turnos de trabajo. Se observa que la mayor incidencia de este defecto se encuentra en el turno 2, con un 51.7%, seguido por el turno 3 con el 27.3%, y finalmente el turno 1 con el 21% de los defectos.



La siguiente figura se analizó el porcentaje de punto negro por los hornos de trabajo en la EOE, como se puede observar el horno con mayor índice de punto negro es el horno 7 con un 29.9%, siguiéndole el horno 2 con el 24.2% es decir en este porcentaje se encuentra la aparición de punto negro en los hornos de trabajo, así como también se puede observar que el horno con menor aparición de punto negro es el horno 1 con el 0.9%.





#### Anexo D: Modelo de elección del diseño experimental

### ***Protocolo de experimentación al utilizar la metodología Taguchi en la industria cerámica***

**Realizado por:** Lisbeth Ponce

**Fecha:** 09/02/2024

#### **Objetivo**

Establecer condiciones de operación determinadas para el proceso de barbotina y polvo atomizado en la producción de cerámica gres y porcelanato.

#### **Objetivo específico**

Desarrollar un diseño experimental para investigar y establecer condiciones de operación precisas entre las variables de estudio y las propiedades de las baldosas antes y después de su cocción.

#### **1. Metodología**

La metodología Taguchi en un experimento para reducir el punto negro en la producción cerámica se basa en la capacidad para optimizar el proceso de manera eficiente y efectiva minimizando la variabilidad y maximizando la calidad del producto final.

La producción de cerámica enfrenta desafíos significativos relacionados con la presencia de defectos como el punto negro, que afectan negativamente a la calidad del producto este se debe a diversas variables que están en el proceso de producción, es por ello que la metodología Taguchi es una elección apropiada ya que podemos evaluar de manera eficiente el efecto de múltiples variables de diseño en el punto negro de la cerámica, identificar la combinación óptima de variables

que minimiza este defecto y determinar las interacciones entre las variables que influyen en el proceso, esto permitirá mejorar la calidad de la cerámica producida.

## 2. Variables del diseño

Las variables para la metodología Taguchi se obtuvieron en base a las entrevistas realizadas a los 3 turnos de trabajo, con ello se logra encontrar las causas para poder solucionar el problema al realizar el contraste de todas las entrevistas realizadas se logró obtener las variables principales para realizar el modelo de experimentación las variables principales son humedad residual y granulometría del grano también se logra obtener otras variables que influyen significativamente al proceso ya que no hay como centrarse en que solo una variable es la que influye en el problema debido a que el proceso de producción es complejo se tiene densidad, viscosidad.

La variable de respuesta o variable de salida es mejorar la calidad de la cerámica y el rendimiento del proceso con la cantidad de defectos (punto negro) en las baldosas cerámicas.

## 3. Diseño experimental

*Factores de diseño*

**Factor A:** humedad residual

**Factor B:** granulometría

**Factor C:** Densidad

**Factor D:** Viscosidad

En el experimento, hemos elegido un diseño experimental factorial 4x3, lo que implica que tenemos 4 factores con 3 niveles cada uno: Bajo, Medio y Alto. Al seleccionar este diseño en el software Minitab, obtenemos un total de 9 corridas, lo que significa que debemos realizar 9 experimentos para cada factor, la matriz de planificación generada por el software muestra cómo distribuir estos experimentos. Cada fila de la matriz representa un experimento diferente, con una combinación específica de niveles para cada variable, los niveles de los factores se distribuyen de forma aleatoria en la matriz para evitar sesgos sistemáticos.

## 4. Procedimiento experimental

1. Para partir con el procedimiento se verifica si la matriz se estructuro de manera correcta, se realiza los experimentos según la matriz de planificación.
2. Se registrará los valores de rendimiento del proceso para cada uno de los experimentos.
3. En el software Minitab se utiliza la función DOE aquí se especificarán los factores y niveles a utilizar, especificar el factor de señal ruido más pequeño es mejor ya que se busca minimizar el efecto de punto negro.

4. Analizar los datos determinando la influencia de cada factor y nivel en la variable de respuesta.
5. Evaluar cada combinación de niveles de los factores de diseño que afecta al rendimiento del proceso.
6. Determinar cuál es la combinación óptima que maximiza el rendimiento o minimiza los defectos mediante el software Minitab.
7. Interpretar resultados esperados con gráficas.