

Cerámica 4.0 :

Automatización y Sostenibilidad en la Producción

Es en esencia, una propuesta de innovación responsable dirigida a ingenieros, investigadores, empresarios, estudiantes y artesanos que buscan comprender cómo la tecnología puede integrarse de manera estratégica en procesos tradicionales para hacerlos más eficientes, sostenibles y competitivos. Propone una transformación profunda en uno de los sectores más emblemáticos de la identidad cultural mexicana: la industria cerámica. A partir de una investigación doctoral desarrollada en la ciudad de Dolores Hidalgo, este libro plantea una solución técnica, viable y contextualizada para uno de los procesos más críticos y tradicionales en la fabricación cerámica. Parte de esa realidad para proponer un sistema automatizado de recuperación y recirculación de barbotina, diseñado bajo los principios de la Industria 4.0 y el análisis del ciclo de vida.

A lo largo de sus capítulos, el lector encontrará un recorrido integral que combina historia, ingeniería, sostenibilidad y análisis científico. Se exploran los fundamentos teóricos de la cerámica desde sus raíces precolombinas hasta su evolución industrial, así como conceptos clave como automatización, modelado paramétrico, dinámica de fluidos computacional (CFD), análisis de elementos finitos (FEA) y análisis de ciclo de vida (LCA).

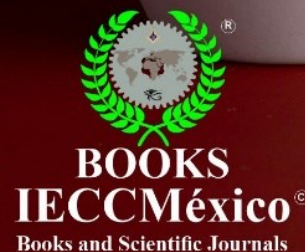
Dr. Alfredo Gutiérrez García: innovación, conocimiento y liderazgo que transforman la educación y la industria.

Hay profesionales que entienden la ingeniería y la educación como motores reales de cambio. El Dr. Alfredo Gutiérrez García pertenece a esa generación de líderes que integran ciencia, tecnología y visión estratégica para generar impacto sostenible.

Su trayectoria no se construye desde una sola disciplina, sino desde la convergencia entre academia, industria, gestión de la calidad y transformación digital.

Académico, investigador y consultor mexicano con más de una década de experiencia, ha impulsado la formación de talento y la innovación tecnológica a través de su labor docente, su actividad editorial y el liderazgo de IECCMÉXICO, institución que hoy es referente nacional e internacional en educación continua, certificación de competencias e investigación aplicada.

Su perfil multidisciplinario, su compromiso con la divulgación científica y su visión integradora lo consolidan como un referente en industria 4.0, desarrollo tecnológico y educación superior orientada al futuro.



EDITORIAL

IECCMÉXICO

Dr. Alfredo Gutiérrez García

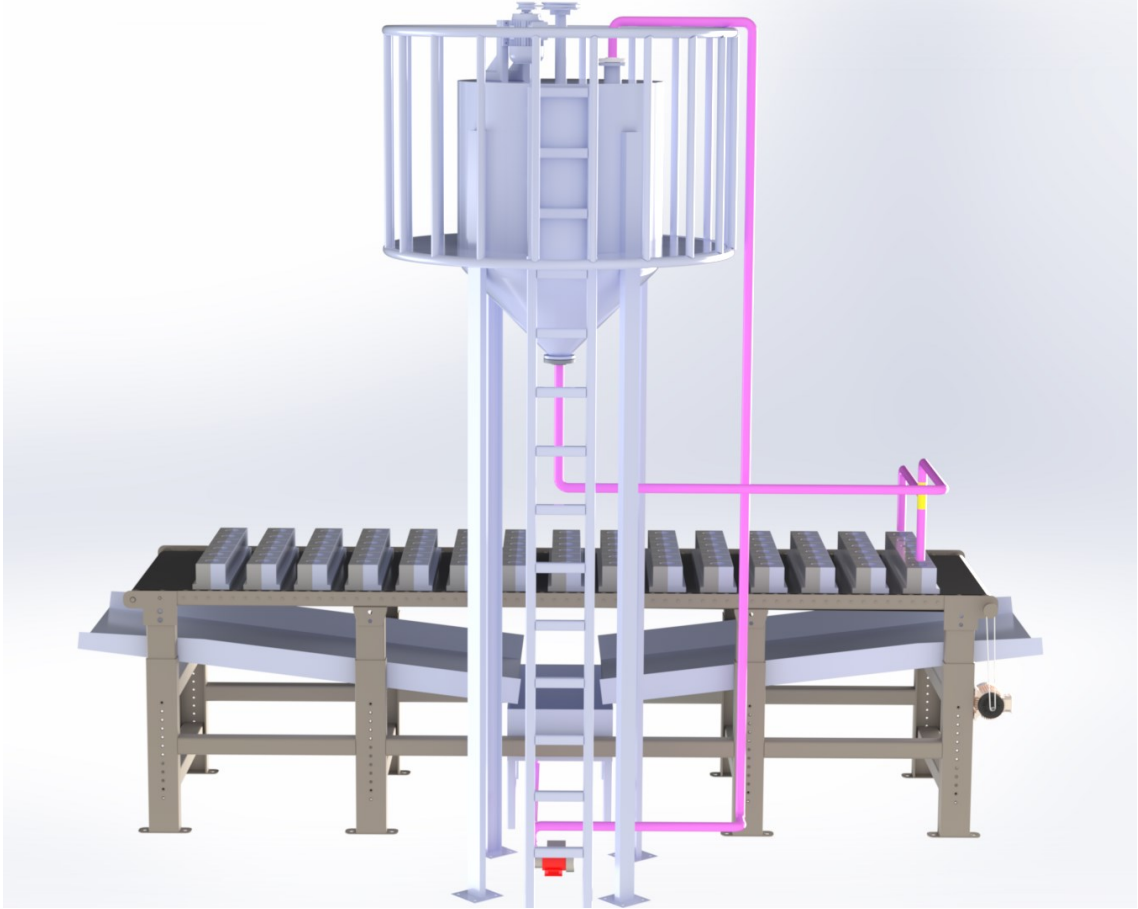
Cerámica 4.0

Automatización y

Sostenibilidad en la Producción



Dr. Alfredo Gutiérrez García



Cerámica 4.0: Automatización y Sostenibilidad en la Producción.

Autor:

Dr. en Ingeniería

Dr. Educación

Dr. Ciencias Económicas y Administrativas

Maestro en Ingeniería Mecánica

Maestro en Administración de Empresas

Ingeniero Industrial

Técnico en Diseño Grafico

Alfredo Gutiérrez García

Marzo 2026

Legal notice

All brand names and product names mentioned in this publication are subject to trademark, brand, or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, or product descriptions, even without a specific mention, does not imply that such names are exempt from legal protection and may be freely used by third parties without the corresponding authorization.

Cover image: PhD. Alfredo Gutiérrez García

Publisher

Editorial IECCMEXICO

Registered trademark of

Quality Consulting Instituto de Educación Capacitación y Certificación de México S.A.S. de C.V.

Address:

El Rosario 82, Colonia San Antonio del Carmen, C.P. 37803, Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional, Guanajuato, México.

Printed in: see last page

ISBN: 978-970-96814-5-1

DOI: <https://doi.org/10.64784/151>

© 2026 PhD. Alfredo Gutiérrez García

© 2026 Quality Consulting Instituto de Educación Capacitación y Certificación de México S.A.S. de C.V.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without prior written permission of the copyright holder.

This work is protected under the **Ley Federal del Derecho de Autor (México)**, the **Berne Convention for the Protection of Literary and Artistic Works**, the **WIPO Copyright Treaty (WCT)**, and other applicable international copyright laws. Any unauthorized use constitutes an infringement and may result in civil, administrative, and criminal liability under applicable legislation.

Agradecimientos.

Al Ing. Gabriel Ángel Aguilar Bárcenas, cuyo acompañamiento técnico, fue clave para el diseño y validación del sistema automatizado. Su habilidad para integrar conceptos de ingeniería, sostenibilidad y producción artesanal permitió transformar una idea en una solución técnica viable, funcional y contextualizada al entorno cerámico local.

Este trabajo no hubiera sido posible sin su apoyo, dedicación y confianza. Mi más profundo respeto y gratitud.

Dedicatoria.

Dedico este trabajo a mi esposa, Gricelda Paola Hernández Monjaraz, por su constante apoyo durante el desarrollo de esta investigación. Su comprensión ante las exigencias del tiempo y la dedicación requerida fue fundamental para mantener el enfoque y la disciplina necesarios. Su presencia estable y su acompañamiento cotidiano representaron un pilar importante en la consecución de esta meta académica.

Índice de contenido.

CAPÍTULO I	25
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	25
1.1 Planteamiento del problema de investigación.....	25
1.2 Problema de Investigación.	28
1.3 Enunciar el problema.	29
1.4 Formulación del problema.	29
1.5 Antecedentes.....	30
1.6 Pregunta central e interrogantes secundarias.....	49
Pregunta central de investigación.....	49
Interrogantes secundarios.	50
1.7 Objetivo general.....	50
1.7.1 Objetivos específicos.....	51
1.8 Hipótesis general.....	52
1.8.1 Hipótesis nula.....	52
1.8.2 Hipótesis alternativa.	52
1.9 Justificación.....	53
2. DELIMITACIÓN.	55
Limitaciones del estudio.....	55
Ámbito temporal.....	56
Ámbito geográfico.	56
CAPÍTULO II	57

3. MARCOS REFERENCIALES.....	57
3.1 Marco teórico.....	57
Barbotina.....	57
Mayólica.....	58
Talavera.....	58
Arcilla.....	58
Caolín.....	58
Límites de Atterberg.....	58
Plasticidad.....	59
Refractariedad.....	59
Porosidad.....	59
Viscosidad.....	59
La automatización industrial.....	59
La Industria 4.0.....	60
Los sistemas mecatrónicos.....	60
El diseño Asistido por computadora (CAD).....	60
La fabricación digital.....	60
El modelado paramétrico.....	60
El control automático de procesos.....	61
Los sensores industriales.....	61
Los sistemas de control inteligente.....	61
La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	61
Las ecuaciones de Navier-Stokes.....	61
El Análisis de Elementos Finitos (FEA).....	62

Tensión-deformación	62
La viscosidad dinámica	62
El número de Reynolds.....	62
Fluido newtoniano.	62
El mallado computacional.	62
La economía circular.	63
La huella de carbono.	63
La reducción de residuos.....	63
El Análisis del Ciclo de Vida (LCA).	63
De la cuna a la puerta.....	63
Estrategias ambientales prioritarias (EPS).	63
Los indicadores ambientales.	64
Impacto ambiental de procesos cerámicos.....	64
3.2 Marco antropológico filosófico.	64
Cerámica como expresión cultural.....	64
Artesanía tradicional y modernidad.....	64
Simbolismo de la arcilla y lo terrenal.	64
Trabajo manual y dignidad humana.....	65
Herencia colonial y patrimonio material.....	65
Arte popular y resistencia cultural.	65
Tecnología y ética del progreso.....	65
Museografía y valoración del objeto cerámico.	66
3.3 Marco histórico.	66
Origen histórico de la cerámica.....	66

Cerámica en civilizaciones antiguas (Egipto, China, Mesopotamia)	66
Introducción de la mayólica en México durante la colonia.....	66
Desarrollo de la talavera en Dolores Hidalgo, Guanajuato.	67
Técnicas tradicionales de vaciado de barbotina.	67
Evolución de la arcilla como material base.	67
La cerámica precolombina en México (olmeca, maya, azteca).....	67
Patrimonio cultural e identidad regional en la cerámica mexicana.	67
CAPÍTULO III	69
4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN Y METODOLOGÍA.	69
4.1 <i>Tipo de investigación</i>	69
4.2 <i>Investigación experimental</i>	72
5. METODOLOGÍA.	74
6. VARIABLES DE ESTUDIO.....	75
7. FUENTES DE INFORMACIÓN.	80
7.1 <i>Variables Primarias</i>	80
7.2 <i>Variables Secundarias</i>	83
8. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	87
9. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.	89
9.1 <i>Definir MAIC</i>	89
9.2 <i>DMedirAIC</i>	93
9.3 <i>DMA analizarIC</i>	99
9.4 <i>DMAI mplementarC</i>	121

Diseño de Experimentos (DOE)	121
Validación mediante simulación CFD	129
Diseño CAD y generación de planos técnicos.....	152
<i>9.5 DMAIC_{controlar}</i>	167
Recomendaciones.	198
CAPÍTULO IV	200
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	200
DISCUSIÓN.	203
REFERENCIAS.	206
ANEXOS.	217

Índice de figuras.

Moldeado a mano y moldeado por urdido.	32
Moldeado a base de moldes.	32
Infografía del proceso de la cerámica.	35
Iván Sutherland, Lápiz óptico y el Sketchpad.....	39
Ecuaciones de Navier Stokes	41
Discretización de elementos finitos de un dominio y representación de un tetraedro con sus números globales de nodos.	43
Resumen de las propiedades de las principales clases de materiales.....	45
Lluvia de ideas de posibles problemas causados por el proceso tradicional de vaciado de barbotina.	91
Modelo 3D del molde cerámico.....	109
Análisis de la geometría realizada para revisar el fluido interno.	110
Simulación del fluido de la barbotina.	111
Simulación de las áreas donde se crea vorticidad en el vaciado de la barbotina.	112
Posturas del operador cargando moldes cerámicos para realizar en vaciado de la barbotina.	114
Grupo A	114
Grupo B.....	115
Grupo A	115
Grupo B.....	116
Grupo B.....	117
Diagrama de pescado de las causas identificadas.	120
Grafica de optimización de respuesta.	127

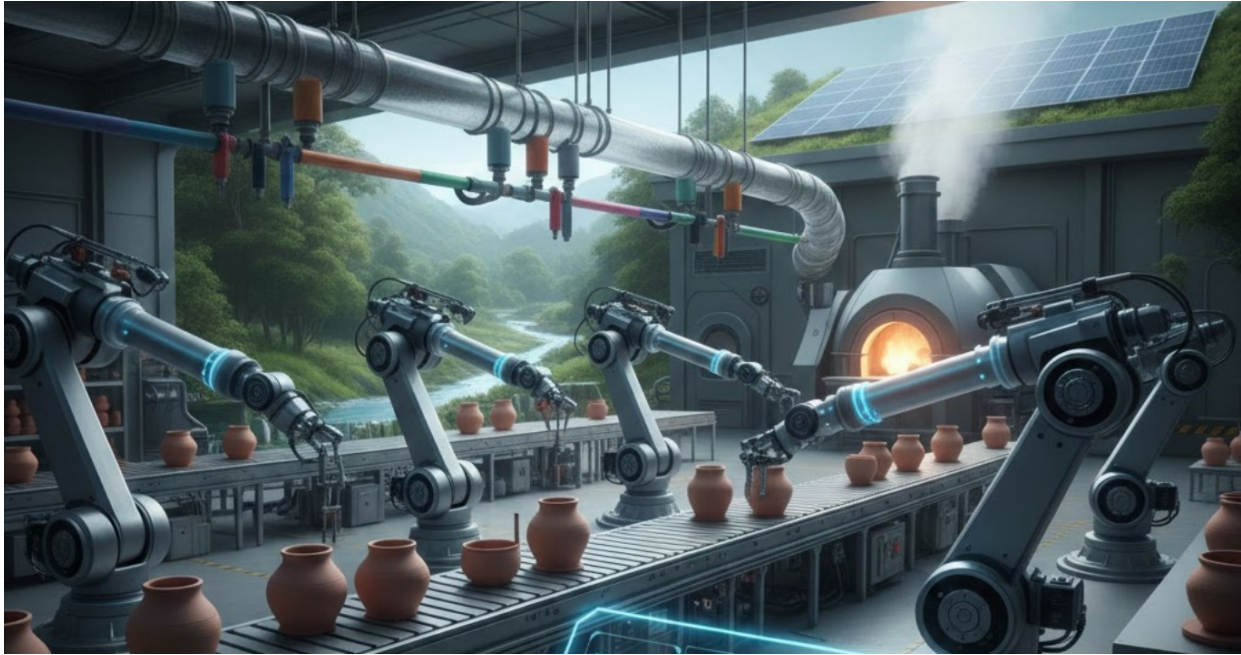
Dimensiones para realizar el modelo en Solidworks.	131
Diseño de modelos 3D en Solidworks.	132
Diseño de barra y configuración de 3 agitadores.	133
Diseño de barra y configuración de 6 agitadores.	134
Tipos de análisis/configuración del modelo.	136
Configuración del modelo/tipo de fluido.	137
Configuración del modelo/condiciones de la pared.	138
Configuración del modelo/condiciones iniciales.	139
Representación del dominio computacional.	140
Fluido total del modelo.	141
Región que ejercerá la fuerza de rotación.	142
Malla del modelo computacional.	143
Resultado de la simulación.	144
Representación de la simulación con tres agitadores.	145
Vista superior de la simulación de trayectorias de fluidos con tres agitadores.	146
Representación de la simulación con seis agitadores.	147
Vista superior de la simulación de trayectorias de fluidos con seis agitadores.	148
Vista personalizada del flujo de pasta cerámica con seis agitadores.	149
Planos 2D de la tasa.	154
Planos 2D del Molde de la tasa.	155
Planos 2D de los perfiles para el cuerpo del sistema.	156
Planos 2D del Ensamble de los perfiles del cuerpo.	156
Planos 2D del sistema de recuperación de la barbotina.	157

Planos 2D del sistema de depósito de recuperación 1.....	158
Planos 2D del sistema de depósito de recuperación 2.....	158
Planos 2D de la flecha con los 6 alabes.	159
Planos 2D de los rodillos motrices.....	160
Planos 2D del silo con su pasillo y escalera de servicio parte 1.	161
Planos 2D del silo con su pasillo y escalera de servicio parte 2.	162
Planos 2D del silo con su pasillo y escalera de servicio parte 3.	162
Planos 2D del sistema eléctrico y mecánico del silo.	163
Planos 2D del sistema ensamblado completamente parte 1.....	164
Planos 2D del sistema ensamblado completamente parte 2.....	164
Planos 2D del sistema ensamblado completamente parte 3.....	165
Planos 2D del sistema ensamblado completamente parte 4.....	166
Panorama general del vínculo entre los mecanismos ambientales, es decir, los puntos medios, y las tres áreas de protección.....	179
Diseño de procesos utilizando la base de datos bioenergiedata_18.....	193
Impacto ambiental del transporte, agua y electricidad.....	194
Diseño de procesos utilizando la base de datos ecoinvent_38_LCIA.....	194
Impacto ambiental del caolín, la arcilla, las partículas diésel y el consumo de agua en kW	195
Simulación de Monte Carlo	196
Ficha técnica de la tasa utilizada como base del diseño.....	217
Fotografías del modelo tomado de base.....	219

Índice de tablas.

Tabla 1 Relación entre variables	80
Tabla 2 Resumen de variables que serán utilizadas en la investigación.	87
Tabla 3 Plan de recolección de datos	96
Tabla 4 Línea base de referencia para la recopilación de los datos.	99
Tabla 5 Tamaño del dominio computacional.....	102
Tabla 6 Dimensiones básicas de la malla.....	102
Tabla 7 Configuración del material	104
Tabla 8 Condiciones de contorno, presión estática y de calor volumétrico.	106
Tabla 9 Resultados del análisis.	106
Tabla 10 Tabla de mínimos y máximos	109
Tabla 11 Ponderaciones con acciones según el método RULA.....	116
Tabla 12 Tandas de mezclas bajo diferentes combinaciones de las variables ajustadas.....	124
Tabla 13 Diseño factorial DOE Factorial 1/8 con 16 corridas.....	125
Tabla 14 Propiedades del material Acero laminado en frío AISI 1020.	133
Tabla 15 Propiedades del material de acero inoxidable recocido.	135
Tabla 16 Propiedades físicas de la pasta cerámica.	138
Tabla 17 Distancia y consumo.....	172
Tabla 18 Parámetros clave por taller.....	172
Tabla 19 Los insumos energéticos incluyen electricidad para mezcladores y bombas, y gasolina o diésel para transporte y maquinaria móvil.	173
Tabla 20 Tipo de transporte utilizado por el taller.....	174
Tabla 21 Los residuos sólidos consisten en arcilla inutilizable, sedimentos y preformas rotas... 175	

Tabla 22 Resumen de LCI	176
Tabla 23 Datos normalizados Midpoint ReCiPe 2016.....	181
Tabla 24 Formación fotoquímica de ozono.	181
Tabla 25 Consumo de agua extraído.....	182
Tabla 26 Resultados de la caracterización de las categorías de impacto clave.....	185
Tabla 27 Valores de referencia globales de las puntuaciones de normalización.	186
Tabla 28 Puntuaciones de impacto normalizadas (por m ³ de deslizamiento)	187
Tabla 29 Puntuaciones de impacto regionalizado vs. global.	188
Tabla 30 Resultados de la contextualización, comparada con la producción cerámica industrial.	191
Tabla 31 Datos de laboratorio para la Porcelana.	218



Resumen.

La presente investigación forma un trabajo final de tesis, en la cual se diseña, propone y justifica la creación de un sistema de recuperación de barbotina cerámica para industrias locales de la ciudad de Dolores Hidalgo. El sistema consiste en un mecanismo que sirve para el vaciado de la barbotina cerámica en sus respectivos moldes de yeso. Se diseñaron todos los elementos en el software CAD Solidworks, el cual fue elegido por ser completamente paramétrico. Se realizaron los diseños de la tasa cerámica, base para este modelo, misma que puede ser remplazada por cualquier tipo de diseño por los artesanos. Se realizó su molde y cavidad, así como su ensamble correspondiente. Además, se diseñó el sistema mecánico que sirve para la automatización del sistema. Este fue diseñado mediante

operaciones de chapa metálica, embutidos y operaciones de troquelado. Se modelaron los perfiles estructurales para el mecanismo y se realizó el ensamble de estos elementos. Se procedió a la creación del sistema de depósito y un silo para el reposo de la barbotina cerámica. Asu vez, todo este diseño que fue realizado a escala real, fue ensamblado mediante sistema de ruteado de tubería rígida que, en su momento, puede ser remplazada fácilmente con sistema de tubería flexible. La validación de todos los elementos fue realizada mediante la edición por etapas y publicación de tres artículos en revistas indizadas y con revisión de pares. Las etapas sirvieron para analizar, cuales serían los elementos suficientes y necesarios para tener un sistema homogéneo en la barbotina. Posteriormente validaciones con simulación de fluidos mediante análisis CFD a fin de garantizar que no existiera velocidad cero en alguna parte de las paredes del depósito (silo), y como tercero, el análisis de la cuna a la puerta mediante el análisis del ciclo de vida del producto mediante el Software OpenLCA. Se abordan en la parte de discusiones, las limitaciones que ha tenido el sistema propuesto, afin de continuar con los siguientes análisis, como lo es, electrónica, electricidad y el análisis del ciclo de vida del producto, de la cuna a la cuna.

Abstract.

This investigation forms a final thesis work, which is designed, proposes and justifies the creation of a ceramic slip recovery system for local industries in the city of Dolores Hidalgo. The system consists of a mechanism that serves to empty the ceramic slip into their respective molds. All elements were designed in Solidworks CAD software, which was chosen for being completely parametric. Ceramic work designs were created, the basis for this model, which can be replicated by any type of design by artisans. If I make your mold and cavity, just like your corresponding assembly. Furthermore, a mechanical system was designed that serves to automate the system. This was designed using sheet metal operations, inlays and die-cutting operations. Structural profiles were modeled for the mechanism and the assembly of these elements was created. We proceeded to create a deposit system and a silo to store the ceramic slip. On the other hand, this entire design, which was carried out at full scale, was assembled using a rigid tube routing system which, at the moment, could be easily replaced with a flexible tube system. The validation of all elements was carried out through the staged editing and publication of three articles in peer-reviewed and peer-reviewed journals. The steps will be useful to analyze which elements would be sufficient and necessary to have a homogeneous system on the barbotine. Subsequently validations with fluid simulation using CFD analysis in order to guarantee that there was no zero speed in any part of the walls of the deposit (silo), and thirdly, the analysis of the corner at the door using the analysis of the life cycle of the product using the OpenLCA Software. In the discussion section, they address the limitations that have existed in the proposed system, in order to continue

with the following analyses, such as electronics, electricity and the analysis of the product's life cycle, from one point to the next.



Introducción.

La producción cerámica ha sido una de las industrias más antiguas y esenciales en el desarrollo de la humanidad, evolucionando desde técnicas artesanales hasta procesos altamente industrializados. En la actualidad, la creciente demanda por productos cerámicos de alta calidad, combinada con la necesidad de minimizar el impacto ambiental y reducir desperdicios, ha impulsado la búsqueda de métodos más eficientes y sostenibles, en este sentido, la automatización sostenible en la producción cerámica se presenta como una alternativa viable para mejorar la eficiencia de los procesos, reducir el desperdicio de

material y disminuir el impacto ambiental bajo un bajo el enfoque "de la cuna a la puerta". Es por ello que la presente investigación se enfoca en el desarrollo de un sistema automatizado para el vaciado de barbotina¹ en moldes cerámicos, optimizando el uso de recursos y mejorando la calidad del producto final, pues tradicionalmente, en la ciudad de Dolores Hidalgo, en el estado de Guanajuato, México, el proceso de vaciado de barbotina en moldes de yeso ha dependido de la intervención manual, lo que genera variabilidad en la calidad de las piezas, tiempos de producción ineficientes y un alto desperdicio de material. La falta de un mecanismo automatizado que permita la recuperación y recirculación de la barbotina contribuye al uso excesivo de materia prima y al incremento de residuos, impactando negativamente en la sostenibilidad del proceso. En este sentido, la implementación de una línea automatizada con estaciones de trabajo optimizadas, basada en el diseño y simulación en el software SolidWorks², permitirá mejorar la eficiencia del vaciado, garantizar la homogeneidad de las piezas y reducir la cantidad de material desperdiciado, para lograr este objetivo, se integrarán análisis computacionales de dinámica de fluidos (CFD) y elementos finitos (FEA) que validen el desempeño estructural y funcional del sistema antes de su fabricación física. Además, se realizará un estudio de ciclo de vida (LCA) mediante el software OpenLCA³ para evaluar el impacto ambiental de la automatización y los materiales utilizados en comparación con los métodos tradicionales, por su parte, en el contexto del enfoque "de la cuna a la puerta", la automatización del proceso cerámico no solo busca optimizar la producción, sino

¹ Es un tipo de engobe, papilla o mezcla de arcilla y agua con una consistencia barrosa o casi líquida, usada en alfarería para crear y unir partes de una pieza cerámica producidas al torno, por medio de moldes o a mano.

² Software de diseño asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) en 3D. Se utiliza para crear modelos, dibujos, ensamblajes y piezas.

³ Software gratuito de código abierto que permite realizar análisis de ciclo de vida (ACV).

también cerrar el ciclo de los materiales mediante la recuperación y reutilización de la barbotina sobrante, reduciendo así la generación de desechos y el consumo de agua, por lo que, la investigación abordará el diseño de un sistema de recirculación que permita recuperar el exceso de barbotina y reincorporarlo al proceso sin comprometer la calidad de las piezas finales. De esta manera, se minimizará la cantidad de residuos generados y se promoverá un uso más eficiente de los recursos naturales, por su parte, a nivel económico, la implementación de esta tecnología permitirá una reducción en los costos operativos, al disminuir el desperdicio de material y optimizar los tiempos de producción. Buscando la reducción de la intervención manual en el vaciado esto también conllevará a beneficios en términos de ergonomía y seguridad laboral, al disminuir la fatiga y los riesgos asociados con la manipulación de materiales pesados, garantizando una mayor precisión en el llenado de los moldes, se reducirá la tasa de defectos en las piezas cerámicas, mejorando la calidad del producto final y aumentando la competitividad de las empresas en el sector, pues, la automatización en la industria cerámica ha sido un tema de interés creciente en los últimos años, especialmente en el marco de la Industria 4.0, donde la integración de tecnologías avanzadas como sensores, sistemas de control inteligente y modelado computacional ha permitido optimizar diversos procesos productivos, pero en la población caso de la presente tesis, esto se ha visto comprometido por la alta competencia exterior y la entrada de nuevos competidores que cuentan con un nivel de automatización que deja en desventaja a los productores locales. En este sentido, la presente investigación busca contribuir al avance del conocimiento en la aplicación de tecnologías de automatización en la cerámica, ofreciendo un modelo replicable que pueda ser implementado en distintas escalas de producción, así mismo, se

analizarán los impactos ambientales de la automatización en términos de Huella de Carbono⁴, consumo energético y uso de recursos naturales, con el fin de desarrollar estrategias que permitan mitigar los efectos negativos y maximizar los beneficios ambientales. Finalmente, esta tesis tiene como propósito demostrar que la automatización sostenible en la producción cerámica es una estrategia viable para mejorar la eficiencia, reducir el desperdicio y minimizar el impacto ambiental, bajo un enfoque "de la cuna a la puerta", pues la integración de herramientas de modelado computacional, análisis de ciclo de vida y estrategias de recuperación de material permitirá desarrollar un sistema innovador que optimice el uso de recursos y promueva la sostenibilidad en la industria cerámica, por lo que los hallazgos de esta investigación contribuirán al desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías en el campo de la ingeniería, abriendo nuevas posibilidades para la mejora continua en la manufactura cerámica y consolidando un modelo de producción más eficiente y responsable con el medio ambiente.

⁴ Indicador ambiental que mide la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) que se liberan a la atmósfera



Analizando las fuentes.

Capítulo I

1. Planteamiento del Problema.

1.1 Planteamiento del problema de investigación.

El problema central que aborda esta investigación es la ineficiencia y falta de competitividad en el mercado del proceso tradicional de vaciado de barbotina en la producción cerámica, caracterizada por el desperdicio de material, la variabilidad en la calidad de las piezas y el impacto ambiental negativo, pues en la industria cerámica es el sector productivo más importante de la ciudad de Dolores Hidalgo, Guanajuato,

México, mismo que tiene gran importancia y presencia a nivel mundial, con aplicaciones que van desde accesorios para la construcción hasta la producción de artículos de uso doméstico, sin embargo, el proceso de manufactura de productos cerámicos enfrenta diversos desafíos relacionados con la eficiencia operativa, la generación de desperdicios, el impacto ambiental y la entrada de nuevos competidores con capacidad de producción mayor, lo que posiciona sus productos a un precio más competitivo en el mercado. Uno de los procesos fundamentales en este rubro, es la producción de piezas cerámicas (tasas para uso doméstico), y por ende, el vaciado de la barbotina en moldes de yeso, el cual, en la mayoría de las empresas de pequeña y mediana escala, se sigue realizando de forma manual, este método tradicional presenta múltiples deficiencias que afectan la productividad y sostenibilidad del proceso, incluyendo la variabilidad en la calidad de las piezas, el desperdicio de material y el consumo excesivo de recursos naturales como el agua y la arcilla.

En este contexto, el vaciado manual de barbotina es un proceso que depende de la destreza del operario, lo que puede ocasionar inconsistencias en el espesor de las piezas, defectos estructurales y tiempos de producción prolongados, por su parte, la barbotina sobrante suele desecharse en lugar de ser recuperada y reutilizada, lo que contribuye al desperdicio de materia prima y al incremento de residuos industriales. Este problema no solo genera pérdidas económicas para las empresas, sino que también tiene un impacto ambiental significativo, debido a la acumulación de lodos cerámicos y al uso ineficiente de los materiales.

Ahora bien, desde un nivel industrial, la falta de automatización en el proceso de vaciado representa un obstáculo para mejorar la eficiencia y competitividad de la producción cerámica

mientras que las fábricas medianas, de más de cincuenta colaboradores han implementado tecnologías semi automáticas para mejorar sus procesos, las pequeñas y micro empresas del sector aún dependen de métodos tradicionales que limitan su capacidad de producción, lo que aumenta sus costos operativos. A su vez, la ausencia de un sistema automatizado que permita optimizar el vaciado, controlar con precisión el flujo de barbotina y recuperar el material excedente representa una barrera para la modernización de la industria cerámica para aumentar la efectividad y producción.

Desde una perspectiva ambiental, el desperdicio de barbotina y la generación de residuos cerámicos representan un problema crítico en el contexto de la sostenibilidad y bajo el enfoque "de la cuna a la puerta", pues la acumulación de residuos cerámicos en los vertederos no solo genera contaminación, sino que también implica una pérdida de recursos valiosos que podrían ser reincorporados al proceso productivo, en este sentido, es fundamental desarrollar estrategias que permitan la reutilización de materiales y la reducción de desechos, promoviendo un modelo de producción más eficiente y ecológicamente responsable, en esta línea, surge la necesidad de diseñar e implementar un sistema automatizado para el vaciado de barbotina en moldes cerámicos, con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso, reducir el desperdicio de material y minimizar el impacto ambiental, este sistema debe integrar tecnologías avanzadas de diseño y simulación para garantizar su viabilidad técnica y económica, permitiendo la replicabilidad en diferentes entornos industriales.

Es por ello que, en este contexto, la presente investigación plantea el desarrollo de un sistema de vaciado automatizado basado en el uso de software CAD/CAE como SolidWorks para

el diseño y validación estructural, análisis de dinámica de fluidos (CFD) para optimizar el flujo de barbotina y análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar la resistencia mecánica de los componentes, además, se implementará un sistema de recirculación de barbotina que permita recuperar y reutilizar el material excedente, reduciendo así la generación de residuos y mejorando la sostenibilidad del proceso, además, como parte del análisis de impacto ambiental, se realizará un estudio de ciclo de vida (LCA) mediante el software OpenLCA para comparar los beneficios ambientales de la automatización frente al método tradicional de vaciado.

1.2 Problema de Investigación.

El proceso tradicional de vaciado de barbotina en la producción cerámica en Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, enfrenta desafíos significativos en términos de eficiencia, calidad y sostenibilidad, pues este método manual, utilizado principalmente por micro y pequeñas empresas, genera variabilidad en la calidad de las piezas, desperdicio de material y un impacto ambiental negativo debido al desecho de barbotina sobrante, aunado a ello, la falta de automatización limita la capacidad productiva y competitividad del sector cerámico local, especialmente frente a nuevos competidores con mayor capacidad de producción y precios más competitivos.

Desde una perspectiva ambiental, la acumulación de residuos cerámicos y el desperdicio de materia prima aumentan la contaminación y representan una pérdida de recursos valiosos que podrían ser reincorporados al proceso productivo bajo el enfoque "de la cuna a la puerta". En este contexto, surge la necesidad de diseñar e implementar un sistema automatizado para el vaciado de barbotina, que optimice el proceso, reduzca el desperdicio y minimice el impacto ambiental.

1.3 Enunciar el problema.

El proceso tradicional de vaciado de barbotina en la producción cerámica de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, utilizado principalmente por micro y pequeñas empresas, presenta deficiencias significativas que afectan la eficiencia, la calidad del producto y la sostenibilidad del proceso, pues la dependencia del trabajo manual genera variabilidad en el espesor y calidad de las piezas, tiempos prolongados de producción y un alto desperdicio de barbotina, la cual es desechada en lugar de ser recuperada y reutilizada, esta situación incrementa los costos operativos, reduce la competitividad del sector local y genera un impacto ambiental negativo debido a la acumulación de residuos cerámicos y el uso ineficiente de recursos naturales.

A pesar de que algunas medianas empresas han implementado tecnologías semi-automatizadas, las micro y pequeñas empresas aún dependen de métodos tradicionales, lo que limita su capacidad de producción y les impide competir con empresas de mayor escala, en este contexto, la falta de automatización y recirculación eficiente de la barbotina es una barrera para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso. Por ello, es necesario desarrollar un sistema automatizado para el vaciado de barbotina, que integre tecnologías avanzadas de diseño y simulación, optimice el proceso, reduzca el desperdicio y minimice el impacto ambiental bajo el enfoque "de la cuna a la puerta".

1.4 Formulación del problema.

¿De qué manera la implementación de un sistema automatizado para el vaciado de barbotina en moldes cerámicos, que incluya el diseño y validación mediante SolidWorks, análisis CFD/FEA y un sistema de recirculación de material, puede reducir el desperdicio, mejorar la

eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental en la producción cerámica de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, bajo el enfoque "de la cuna a la puerta"?

1.5 Antecedentes.

La historia de la cerámica se remonta al período neolítico, cuando las primeras comunidades humanas comenzaron a fabricar utensilios de barro cocido para almacenar alimentos y agua. Hallazgos arqueológicos en regiones como Mesopotamia y China evidencian la temprana adopción de esta técnica. Con el tiempo, la cerámica se diversificó en formas y decoraciones, reflejando las características culturales de cada civilización, por ejemplo, en el Antiguo Egipto, se desarrollaron técnicas avanzadas de esmaltado, mientras que en China se perfeccionó la porcelana, estas tradiciones cerámicas sentaron las bases para el desarrollo de estilos y técnicas en otras partes del mundo (Victoria, 2024).

En este contexto, dependiendo de la calidad, de la elaboración y del esmaltado, se crean diferentes tipos de productos cerámicos, dentro de los cuales se encuentran más comúnmente el de Terracota, pasta porosa, de color rojo natural sin revestimiento (una de las más utilizadas en la región del estado de Guanajuato). Faenza, pasta porosa, coloreada con revestimiento vítreo transparente u opaco. Gres, pasta vítrea compacta. Porcelana, pasta vítrea blanca compacta. Loza, pasta porosa blanca, cubierta con una vetrina. Terracota esmaltada o mayólica (otra de las comúnmente fabricadas en la misma región), pasta coloreada porosa con revestimiento vítreo opaco. Refractario, material poroso, blanco o coloreado, que resiste altas temperaturas sin sufrir cambios sustanciales. Y finalmente, productos cerámicos avanzados, productos muy puros, con composiciones particulares, resistentes al calor y al desgaste químico y con unas propiedades

eléctricas excepcionales, estos se utilizan en todos los sectores industriales y también en el campo médico. (Italian Ceramic Surfaces, 2021).

(Italian Ceramic Surfaces, 2021), empresa líder en la producción de materias primas y tecnologías innovadoras para la industria cerámica indica que, las características de la cerámica principalmente son las siguientes:

1. Características físico-químicas: Porosidad, Color (de rojizo a blanco), Refractoriedad, Capacidad para producir agua durante el secado.
2. Propiedades mecánicas: Dureza, Resistencia a la penetración, Resistencia a la abrasión
3. Propiedades tecnológicas: Plasticidad, Trabajabilidad, Propiedades antibacterianas, Propiedades anticontaminantes.

La producción de objetos de cerámica ha tenido, durante mucho tiempo, un papel protagonista en el desarrollo de la humanidad (Montoya, 1997, p. 5), y el sistema de vaciado de la barbotina juega un papel crucial en la calidad final de los productos cerámicos, misma que representa uno de los factores que más contaminan el medio ambiente, pues, no se tiene el conocimiento ni la infraestructura para hacer eficiente su producción. En este sentido, las técnicas tradicionales de fabricación no han tenido un avance trascendental, pues la preparación de la barbotina comienza con el ablandamiento de la arcilla, depuración, sedimentación y reposo para ser trabajado a mano o mediante moldes como se muestra en la figura uno y dos.

Figura 1.

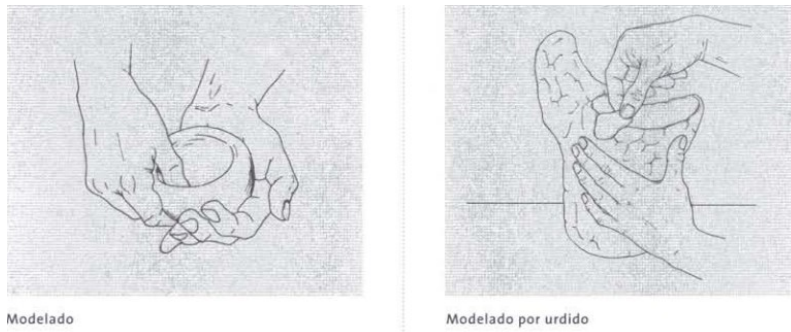


Figura 1 Moldeado a mano y moldeado por urdido.

Nota: Se muestra la forma de moldeado a mano. Historia de la cerámica en el Museo Arqueológico Nacional, Carmen Padilla Montoya, 1997, p. 6, Museo Arqueológico Nacional España (<https://martaceramica.com/barbotina-ceramica/>)

Figura 2.

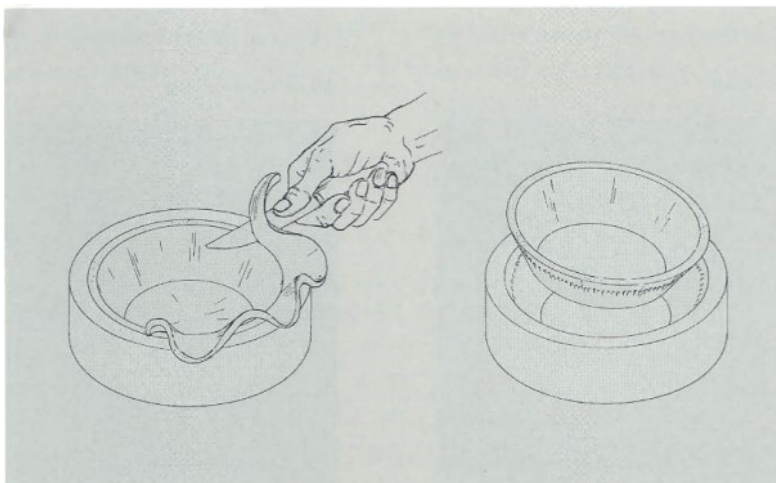


Figura 2 Moldeado a base de moldes.

Nota: Se muestra la forma de moldeado a mano. Historia de la cerámica en el Museo Arqueológico Nacional, Carmen Padilla Montoya, 1997, p. 7, Museo Arqueológico Nacional España (<https://martaceramica.com/barbotina-ceramica/>)

Los primeros objetos cerámicos se remontan al neolítico, momento de la historia en el que se comenzó a trabajar con la agricultura y la ganadería por lo que se necesitó domesticar animales y, en este sentido, surge la necesidad de crear recipientes para una vida sedentaria a fin de utilizarlos para calentar y cocinar alimentos. Con el paso del tiempo, esto dio sentido a nuevas formas y la perfección estética, sobre todo al tratarse de la regularidad y redondez, lo que su vez, dio el paso a la segunda etapa en la que se comenzó a promover la estética mediante el pintado de los recipientes.

Las características de la cerámica tienen un gran estudio, sobre todo en las propiedades de los materiales, pues, estos están dictados por los tipos de átomos presentes y el tipo de unión con la que cuentan. Suelen tener una combinación de enlaces más fuertes llamados iónicos (ocurren entre un metal y no metal), y covalente (ocurre entre dos o más metales compartiendo átomos). La variación en estos es guiada por las múltiples opciones que se pueden presentar por la obtención de la arcilla, según los bancos de donde sea extraída (Franqui Hogar, s.f.), sin embargo, en la figura 3 se representa una infografía general de este proceso.

Figura 3.



CERÁMICA

El arte de fabricar objetos elaborados con arcilla cocida

ETIMOLOGÍA

Procede del término griego *κεραμική* (*keramiké*) forma femenina de *κεραμικός* (*keramikós*) "sustancia quemada".

ORIGEN

Año 24.000 a. C. aproximadamente

En el Paleolítico superior aparecen pequeñas figuras, utilizadas con fines ceremoniales, realizadas en arcilla secada, al sol o alrededor del fuego.

Entre el año 12.000 a. C. y el 7.000 a. C.

En el Neolítico aparecen los primeros recipientes para almacenar alimentos y agua.

Siglo III a. C.

En China empleo de la terracota, arcilla modelada y endurecida al horno.

Del año 618 al 907

En China se utiliza la porcelana durante la dinastía Tang.

Del año 1368 al 1644

En China se perfecciona el uso de la porcelana durante la dinastía Ming y se exporta a Japón y a Europa.



PROPIEDADES

Dureza	Muy alta
Expansión térmica	Alta
Ductilidad	Baja
Resistencia a la corrosión	Alta
Resistencia al desgaste	Alta



Conductividad eléctrica	Depende del material
Densidad	Baja
Conductividad térmica	Depende del material
Propiedades Magnéticas	Depende del material

TÉCNICAS DE MODELADO

- Antiguas
- Pellizco
- Colombín
- Placa
- Chinas
- Terracota
- Porcelana



ETAPAS EN LA FABRICACIÓN

- Extracción** La arcilla se extrae en las canteras, conocidas como "barrenos".
- Molienda** Desmenuzar la arcilla hasta obtener la granulometría deseada.
- Mezclado** La arcilla se mezcla con agua y se extraen las piedras y arena que contiene.
- Maduración** Después de dos semanas la arcilla está preparada para su manipulación.
- Modelado** Antiguamente manual, actualmente máquinas, "galleteras".
- Cortado** Las cortadoras dan forma a las piezas cerámicas.
- Secado** Para eliminar el agua se deja secar la pieza durante 24h.
- Cocción** La arcilla se somete a altas temperaturas.

TIPOS DE ARCILLA

- Terracota** Es la arcilla modelada y endurecida al horno. Temperatura de cocción: 950-1.100°.
- Loza** Su color varía desde un gris oscuro al blanco. Temperatura de cocción: 1.200-1.300°.
- Gres** Es muy poco poroso. Temperatura de cocción: 1.300°.
- Porcelana** De color blanco y poco resistentes en seco. Temperatura de cocción: 1.500-1.600°.
- Caolín** Es indispensable para fabricar porcelana blanca. Temperatura de cocción: 1.300°-1.350.

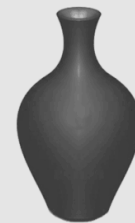


Figura 3 Infografía del proceso de la cerámica.

Nota: Se muestra la historia, propiedades, técnicas de modelado, tipos de arcilla, y etapas de cocción de la cerámica. La cerámica: origen, características técnicas de fabricación, 2025, p. 1, Franquihogar (<https://n9.cl/tp0c7q>).

En México, la cerámica tiene raíces profundas que se extienden hasta las civilizaciones precolombinas, culturas como la olmeca, maya y azteca desarrollaron estilos distintivos, creando vasijas, figurillas y otros objetos tanto utilitarios como ceremoniales, estas piezas se caracterizaban por sus formas, decoraciones y técnicas de fabricación únicas. Con la llegada de los españoles en el siglo XVI, se introdujeron nuevas técnicas, como el vidriado y el uso del torno de alfarero, fusionándose con las tradiciones indígenas y dando lugar a estilos híbridos que perduran hasta hoy (Enraizarte, s.f.).

En la actualidad la cerámica mexicana sigue siendo una forma vigente de arte popular a nivel internacional, dentro de los cuales, se puede encontrar diversas técnicas de trabajar la cerámica con algunas influencias europeas, dentro de los que se encuentra la tradicional Talavera originaria de del Estado de Puebla, la cerámica de barro negro originaria del Estado de Oaxaca y el barro briñado de la ciudad de Tonalá, Estado de Jalisco (Enraizarte, s.f.).

En el estado de Guanajuato, la cerámica ha jugado un papel crucial en la identidad cultural y económica, una de las expresiones más destacadas es la mayólica, una loza esmaltada de origen español introducida durante la colonia, esta técnica se adaptó en Guanajuato, desarrollando características propias que la diferencian de otras regiones, como Puebla. La mayólica

guanajuatense se distingue por su esmalte blanco brillante y decoraciones coloridas, reflejando una fusión de influencias europeas e indígenas (México Desconocido, s.f.).

Dolores Hidalgo, conocido como la cuna de la independencia de México, también es reconocido por su rica tradición cerámica. La ciudad se ha convertido en un importante centro productor de cerámica artesanal, especialmente de talavera, una variante de la mayólica. Los artesanos locales elaboran piezas únicas, desde azulejos hasta vajillas, caracterizadas por sus colores vibrantes y diseños detallados. Esta actividad no solo es una expresión artística, sino también un pilar económico y cultural para la comunidad (Adame, 2020).

Las estimaciones más acertadas asumen que el 80% de su población se sustenta de esta fuente económica al no haber un censo real, en este sentido las piezas elaboradas son pintadas a mano lo cual puede llevar desde veinte minutos hasta dos horas dependiendo de la complejidad de la pieza a cada artesano, a su vez, gran parte de la producción se vende al mayoreo y exportaciones a Estados Unidos de América, Canadá y Europa (Adame, 2020).

(Adame, 2020) en este contexto, indica que la mayor parte de las materias primas se extraen de las mismas localidades cercanas:

El barro que se utiliza procede de la sierra de los alrededores, se extrae en piezas de piedra que serán molidas y hervidas en suficiente agua para disolverlas y crear una pasta que posteriormente será colada para evitar impurezas.

(Adriana, 2024), describe áreas en innovación, experimentación y sostenibilidad como algunos de los retos que deben ajustar en sus estrategias actuales los productores de cerámica:

La cerámica tiene el potencial de ser una de las formas de arte más sostenibles, ya que los materiales básicos, como la arcilla, son naturales y abundantes. Al centrarse en prácticas sostenibles, los artistas pueden crear obras que no solo sean hermosas, sino también responsables con el medio ambiente.

Diversas organizaciones comulgan en que la sostenibilidad en la cerámica es un aspecto crucial en la producción:

La cerámica del futuro será aquella que logre equilibrar la belleza y la funcionalidad con la responsabilidad ecológica. La tradición cerámica, en constante evolución, promete seguir siendo una parte vital de nuestra cultura material y artística (Río, 2024, p. 1).

La barbotina es una suspensión líquida de arcilla y agua, utilizada en cerámica para técnicas como el colado en molde, la unión de piezas (pegado con barbotina) y la decoración. Su uso tiene raíces históricas profundas, evolucionando junto con las técnicas cerámicas a lo largo de los siglos (Kuiper, s.f.).

Para preparar barbotinas cerámicas acuosas estables, diseñadas para partículas ultrafinas (<0.5 micrones) como el titanato de bario (BaTiO_3)⁵. La clave radica en la secuencia de mezcla: primero se disuelve un agente pasivante (ácido oxálico⁶, 0.5–5% en peso) en agua para recubrir las partículas y evitar reacciones no deseadas; luego se añade el polvo cerámico y finalmente

⁵ Material cerámico ferroeléctrico

⁶ Compuesto orgánico que se encuentra naturalmente en plantas y animales.

un dispersante (polietilenimina⁷, $\geq 1\%$ en peso) para reducir la viscosidad (< 3000 cps⁸). Esto permite cargas sólidas altas (hasta 30% en volumen) y suspensiones estables por semanas, ideales para técnicas como fundición en cinta. La adición opcional de aglutinantes orgánicos (ej. PEG o PVP)⁹ podrá facilitar la formación de capas crudas uniformes con poros < 0.5 micrones, críticas para aplicaciones como capacitores multicapa (México Patente n° PA/a/1997/001584, 2002).

Los resultados experimentales para la elaboración de la barbotina pueden demostrar que combinaciones óptimas (ej. 1–3% de ácido oxálico y 1–5% de PEI¹⁰) logran viscosidades < 1000 cps y evitan aglomeración. Por ejemplo, una barbotina con 3% de ácido oxálico, 1% de PEI y 3% de PEG podrá alcanzar 428 cps y excelente homogeneidad, por lo que se resalta la importancia del potencial zeta (± 10 a ± 40 mV) y el pH (7–10) para controlar la estabilidad. (México Patente n° PA/a/1997/001584, 2002).

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) surgido en la década de 1960, nace como una herramienta para optimizar procesos de diseño industrial, su desarrollo estuvo ligado a la necesidad de precisión en sectores como la aeronáutica y la ingeniería mecánica principalmente. El primer sistema comercial, Sketchpad, creado por Iván Sutherland en 1963, permitía manipular gráficos vectoriales mediante un lápiz óptico (figura 4), sentando las bases del CAD moderno (Weisberg, 2022).

⁷ Compuesto que se utiliza en procesos de adsorción química.

⁸ Centésima parte del poise o milipascal por segundo (mPa·s), unidad de medida que se utiliza para designar la viscosidad dinámica de un fluido.

⁹ aglutinantes orgánicos comúnmente utilizados como co-disolventes.

¹⁰ Polietilenglicol es una clase de polímeros que se utilizan como encapsulación de liberación lenta.

Figura 4.

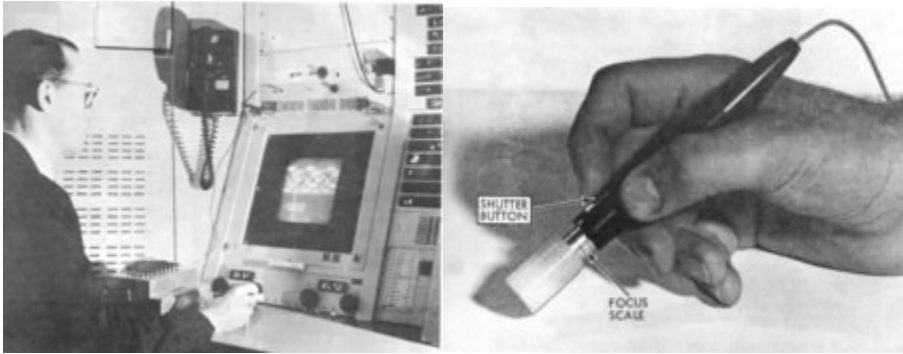


Figura 4 Iván Sutherland, Lápiz óptico y el Sketchpad.

Nota: Se muestra al primer programador informático de modelos CAD. History of CAD, David Weisberg, 2022, p. 1, Shapr3D (https://www.shapr3d.com/blog/history-of-cad?utm_campaign=cadhistorynet/)

En las décadas siguientes, el CAD evolucionó desde sistemas 2D hasta modelado 3D paramétrico, impulsado por empresas como Dassault Systèmes (Dassault Systèmes - SolidWorks Corporation, 2025). Según (Pottman y otros, 2007, p.45), describen la influencia del CAD:

El CAD no solo revolucionó la manufactura, sino que también democratizó el diseño, permitiendo su aplicación en campos como la arquitectura, la medicina y las artes.

El MIT Media Lab exploró el uso de CAD en cerámica artística mediante impresión 3D de arcilla. En su proyecto "Digital Clay", desarrollaron algoritmos para convertir modelos digitales en piezas físicas, manteniendo la expresividad manual donde, la fusión de técnicas ancestrales con CAD permite reinterpretar la cerámica como un medio contemporáneo" (Oxman, 2011, p. 112).

Empresas como Villeroy & Boch y Rosenthal han integrado CAD para fabricar vajillas complejas, este es un caso que destaca el diseño de la colección, donde se usó CAD para crear moldes precisos con geometrías orgánicas, sin embargo, en la actualidad las herramientas de fabricación digital, como las impresoras 3D, pueden trasladar la producción a una escala doméstica, lo que puede afectar la profesión del diseño industrial y el proceso de diseño. (Ramoğlu & Coşkun, 2017, p. 76).


Por su parte, el ajuste digital de composiciones químicas amplía las posibilidades de la cerámica funcional que sea más eficiente y para ámbitos inclusive aeronáuticos (Mahajan & Johnson, 2020). Además, las nuevas tecnologías pueden favorecer la simulación de la producción de productos cerámicos de alta calidad sin la necesidad de tener moldes físicos y, algunas de las desventajas que se pueden encontrar es, que existan formas virtuales que no se podrán obtener físicamente por lo que deben los modelos CAD sujetarse a la naturaleza y limitantes tanto de las formas cerámicas como de la barbotina (Mondragón, 2014, p. 137).

En este contexto, una de las tecnologías más importantes es, la aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), surgida en los años 1960-1970 con el desarrollo de algoritmos para resolver ecuaciones de Navier-Stokes¹¹, inicialmente aplicados en aeronáutica y energía, hoy día, en la industria cerámica demostraron ser fundamental para optimizar procesos y reducir impactos ambientales. Como señalan (Ferziger et al. 2020 p. 112), la CFD permite predecir

¹¹ Son un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido viscoso, estas ecuaciones llevan el nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes.

patrones de flujo y transferencia de calor en sistemas complejos, reduciendo la dependencia de ensayos empíricos costosos.

Figura 5.



Navier-Stokes Equations

3 - dimensional - unsteady

Glenn
Research
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time: t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

Continuity:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

Y - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

Z - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

Energy:
$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

Figura 5 Ecuaciones de Navier Stokes

Nota: Se muestra la forma tridimensional inestable de las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones describen la relación entre la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad de un fluido en movimiento. Glenn Research Center, Nancy Hall, 2021, p. 1, NASA (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>)

En este contexto, tanto el CFD como el FEA (análisis de elementos finitos), forman parte de los estudios más utilizados en la parte de la ingeniería, como menciona (Reddy & Gartling, 2010, p. 26), las disciplinas de transferencia de calor y dinámica de fluidos son temas estrechamente relacionados y constituyen el núcleo de numerosos estudios científicos y de ingeniería. Este es aplicado en tan diversas áreas como la aerodinámica, la meteorología, la

geología y la geofísica, la biología, la ciencia de los materiales y la fabricación dependen en gran medida de la capacidad de predecir, comprender y controlar sistemas fluido-térmicos complejos (Reddy & Gartling, 2010, p. 26).

El estado fluido de la materia, a diferencia del estado sólido, se caracteriza por la movilidad de sus moléculas, lo que influye directamente en sus propiedades mecánicas. En los sólidos, las fuerzas intermoleculares son intensas y responsables de su rigidez, mientras que en los líquidos y gases estas fuerzas son más débiles, facilitando su deformación y movimiento relativo (Reddy & Gartling, 2010). A diferencia de los sólidos, donde la tensión es proporcional a la deformación, en los fluidos esta relación se da respecto a la tasa de deformación temporal. “El parámetro de proporcionalidad en el caso de los fluidos se conoce como viscosidad” (Reddy & Gartling, 2010, p. 26), lo que la convierte en una propiedad fundamental para describir su comportamiento.

(Reddy & Gartling, 2010, p. 27), menciona que, los fluidos se clasifican según su viscosidad y compresibilidad. Un “fluido no viscoso e incompresible se denomina fluido ideal o perfecto”, mientras que un fluido real posee viscosidad finita. Además, si la relación tensión-deformación es lineal, se trata de un fluido newtoniano; de lo contrario, es no newtoniano. Por su parte, el tipo de flujo laminar o turbulento está determinado por el número de Reynolds, que relaciona las fuerzas de inercia con las viscosas (Reddy & Gartling, 2010, p. 27), lo cual servirá de base para identificar la viscosidad de la barbotina en los estudios pertinentes que se realizarán.

Por su parte, para poder analizar los elementos de forma digital, se utiliza el modelo de elementos finitos, dicho modelo indica que se deben construir las funciones de aproximación necesarias para la solución de ecuaciones diferenciales mediante un método variacional o integral

ponderado. En el método de elementos finitos, esto se logra subdividiendo el dominio dado $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$ en un conjunto de subdominios, llamados elementos finitos (Reddy & Gartling, 2010, p. 70), donde este puede ser tan pequeño que pueden considerarse análisis para con un mallado fino, datos analizados con carácter científico, una representación se muestra en la figura 6.

Figura 6.

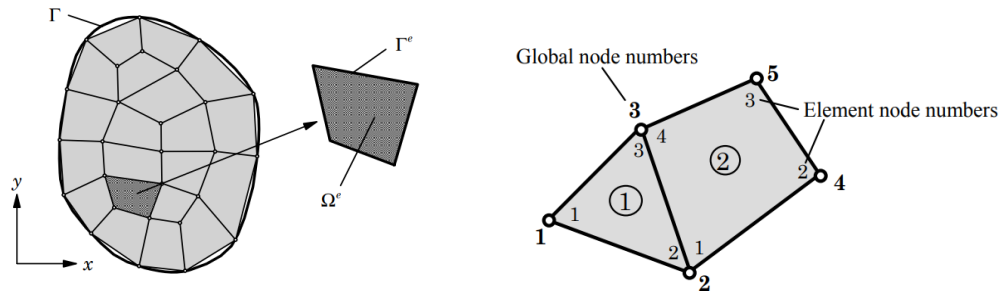


Figura 6 Discretización de elementos finitos de un dominio y representación de un tetraedro con sus números globales de nodos.

Nota: Nota, se muestra la discretización de elementos finitos de un dominio y los nodos globales que se utilizan en las ecuaciones para analizar los fenómenos internos en los materiales y/o fluidos. Reddy & Gartling, 2010, p. 71. CRC Press. (<https://n9.cl/lSac6h>).

Bajo la premisa de del CAD, FEA y CFD, es necesario puntualizar que, para poder satisfacer las restricciones que las ecuaciones y realizar las simulaciones correspondientes, es preciso contar con las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar véase la figura 7 (resumen de las propiedades de las principales clases de materiales), pues las propiedades mecánicas de los metales están fuertemente influenciadas por su microestructura. Por ejemplo, el tamaño del grano,

la distribución de fases y la densidad de dislocaciones pueden afectar significativamente el límite elástico, la ductilidad y la tenacidad ya que la deformación plástica en materiales cristalinos se produce principalmente por el movimiento de las dislocaciones. La facilidad con la que se mueven las dislocaciones determina la resistencia y la ductilidad del material. Factores como el tamaño del grano, el contenido de impurezas y la temperatura pueden influir significativamente en la movilidad de las dislocaciones, afectando así el comportamiento mecánico de los metales (Meyers & Chawla, 2009, p 61), algunos de los elementos clave de las propiedades de los materiales se muestran a continuación:

El endurecimiento por deformación, o endurecimiento por deformación, es el fenómeno por el cual un metal se vuelve más resistente y duro a medida que se deforma plásticamente. Esto se debe al aumento de la densidad de dislocaciones, lo que impide un mayor movimiento de dislocaciones y, por lo tanto, aumenta el límite elástico del material (Meyers & Chawla, 2009, p 71)

La relación Hall-Petch describe cómo el límite elástico de un material policristalino aumenta al disminuir el tamaño de grano. Los granos más pequeños proporcionan una mayor área de borde de grano, que actúa como barrera para el movimiento de dislocaciones, reforzando así el material (Meyers & Chawla, 2009, p 346).

La tenacidad a la fractura es una propiedad crítica que cuantifica la resistencia de un material a la propagación de grietas. Es especialmente importante en aplicaciones estructurales donde la presencia de defectos es inevitable. Los materiales con alta tenacidad a la fractura pueden tolerar defectos más grandes sin sufrir un fallo catastrófico (Meyers & Chawla, 2009, p 405).

La falla por fatiga ocurre bajo condiciones de carga cíclica y se caracteriza por la iniciación y propagación de grietas a lo largo del tiempo. La vida útil a la fatiga de un material depende de factores como la amplitud de la tensión, la tensión media, el acabado superficial y las condiciones ambientales (Meyers & Chawla, 2009, p 486).

Figura 7.

Table 1.1 Summary of Properties of Main Classes of Materials			
Property	Metals	Ceramics	Polymers
Density (g/cm ³)	from 2 to 20	from 1 to 14	from 1 to 2.5
Electrical conductivity	high	low	low
Thermal conductivity	high	low	low
Ductility or strain-to-fracture (%)	4–40	<1	2–4
Tensile strength (MPa)	100–1,500	100–400	–
Compressive strength (MPa)	100–1,500	1,000–5,000	–
Fracture toughness (MNm ^{-3/2})	10–30	1–10	2–8
Maximum service temperature (°C)	1,000	1,800	250
Corrosion resistance	low to medium	superior	medium
Bonding	metallic (free-electron cloud)	ionic or covalent	covalent
Structure	mostly crystalline (Face-centered cubic; FCC; Body-centered cubic; BCC; Hexagonal closed packed; HCP)	complex crystalline structure	amorphous or semicrystalline polymer

Figura 7 Resumen de las propiedades de las principales clases de materiales.

Nota: Nota, se muestra el resumen de las propiedades de las principales clases de materiales. Meyers & Chawla, 2009, p 4. Cambridge University Press. (<https://n9.cl/alzkyi>).

Por su parte, los sistemas de manufactura en la actualidad están teniendo un cambio de paradigma en la sociedad y en la forma en la cual se construyen, formulan, o producen, en este sentido surge el concepto de El análisis del ciclo de vida (ACV), esta es una metodología que permite comparar el impacto ambiental de productos a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la

extracción de materias primas hasta su disposición final. El proceso tradicional del ACV se compone de cuatro etapas: definición del objetivo y alcance, inventario, análisis de impacto y evaluación. Adicionalmente, algunos estudios incluyen una etapa de análisis de mejora (Baumannt & Rydberg, 1994, p. 1).

Este concepto indica que, como lo menciona (Baumannt & Rydberg, 1994, p. 1) los productos pueden generar distintos tipos de emisiones (por ejemplo, uno al aire y otro al agua), es necesario transformar el uso de recursos y sustancias emitidas en parámetros comparables, lo cual se logra mediante métodos de valoración del impacto ambiental.

El estudio compara tres métodos prominentes:

1. Método de Escasez Ecológica (ECO): Basado en la relación entre la carga crítica ambiental de una sustancia y la carga actual de emisiones antropogénicas. Utiliza "ecofactores" que asignan puntos ambientales por unidad de emisión en función de su escasez ecológica.
2. Método de Temas Ambientales (ET): Agrupa las emisiones por "temas ambientales" (calentamiento global, eutrofización, etc.) y calcula la fracción de impacto que tiene el producto respecto a una referencia nacional. Luego aplica factores de ponderación basados en objetivos políticos.
3. Método EPS (Estrategias de Prioridad Ambiental en Diseño de Productos): Desarrollado por el Instituto Sueco de Investigación Ambiental, evalúa los impactos ambientales en términos monetarios, utilizando factores que consideran la gravedad, distribución geográfica, duración, y coste de mitigación de los problemas ambientales.

A su vez, (Baumann & Rydberg, 1994, p. 7) menciona que el uso de una carga crítica (ECO) como estándar es más recomendable que una carga total (ET, EPS), ya que impulsa una acción más directa hacia la reducción del impacto ambiental. También señalan que las diferencias metodológicas reflejan concepciones distintas del mundo: una más biocéntrica (centrada en los límites ecológicos) y otra antropocéntrica (centrada en el valor asignado por la sociedad).

¿Como podemos diseñar productos, elegir materiales y decidir que hacer al final de la vida útil de un producto de manera que produzca menos descargas ambientales y utilicemos menos materiales y energía? Esta es una pregunta que se realizaba (Matthews y otros, 2015), donde hace énfasis en la importancia de conceptualizar en enfoque del ciclo de vida por completo de un producto artificial que abarque desde la obtención de todo lo necesario para su fabricación, pasando por su fabricación, su uso y, finalmente, la decisión sobre qué hacer con él una vez que ya no se utiliza. (Matthews y otros, 2015, p. 11). Este término comúnmente es llamado de la Cuna a la Cuna, esto podría significar algún tipo de reciclaje, o recuperar el producto y reutilizarlo (Matthews y otros, 2015, p. 11), en la mayoría de las ocasiones, estos dan origen a nuevos productos, de la cuna a la puerta, un término común también en el ciclo de vida donde el proceso de fabricación del producto se cuantifica hasta que sale de la fábrica únicamente (Matthews y otros, 2015, p. 11), o de la Cuna a la Tumba esto significa ir desde el nacimiento del producto hasta su muerte (Matthews y otros, 2015, p. 11), donde la cuna es el principio donde se obtiene la materia prima, hasta lo que sucede al terminar de usar los productos.

En este contexto, se busca que el sistema diseñado cumpla con las características antes descritas al reducir el desperdicio teniendo más eficiencia en los procesos, por lo que se utilizará

en enfoque, de la Cuna a la Puerta, derivado del alcance que se tiene bajo control en el diseño de la propuesta de automatización, dentro de los cuales son los siguientes:

Alcance controlable en el diseño:

El enfoque "de la Cuna a la Puerta" se centra en las etapas del ciclo de vida que están bajo el control directo del diseñador o fabricante, desde la extracción de materias primas (cuna) hasta que el producto sale de la fábrica (puerta).

Como señala (Matthews y otros, 2015):

"Si adoptamos una perspectiva 'de la cuna a la puerta', nuestro límite abarcaría solo las etapas previas a la fabricación" (Capítulo 1, p. 18).

Esto es coherente con el objetivo de optimizar los procesos internos de producción para reducir desperdicios, ya que las etapas posteriores (uso, fin de vida) escapan al control directo del diseño.

Enfoque en eficiencia de procesos:

(Matthews y otros, 2015), destaca que el ACV permite identificar "puntos críticos" (hotspots) donde los impactos ambientales o ineficiencias son mayores (Capítulo 1, p. 24).

Al limitar el alcance a "de la Cuna a la Puerta", se prioriza la mejora de eficiencia en la fabricación (ej.: energía, materiales, emisiones), que es donde la automatización puede tener mayor impacto.

Reducción de desperdicios:

(Matthews y otros, 2015), enfatiza que el pensamiento de ciclo de vida evita decisiones sesgadas al considerar todas las entradas y salidas relevantes:

"Para reducir los impactos energéticos y ambientales asociados con los ciclos de vida de productos o procesos, debemos actuar en función de los hallazgos de nuestros estudios" (Capítulo 1, p. 28).

Al centrarse en la fase de producción (controlable), se pueden cuantificar y minimizar desperdicios de materiales, energía o emisiones antes de que el producto llegue al usuario.

Ejemplo de aplicabilidad:

(Matthews y otros, 2015), menciona estudios como el de Coca-Cola (1969), que comparó envases de vidrio vs. plástico analizando costos y recursos hasta la salida de fábrica (Capítulo 1, p. 19). Esto refleja cómo el enfoque "de la Cuna a la Puerta" es útil para decisiones de diseño.

1.6 Pregunta central e interrogantes secundarias.

Pregunta central de investigación. ¿De qué manera la implementación de un sistema automatizado para el vaciado de barbotina en moldes cerámicos, que incluya el diseño y validación mediante SolidWorks, análisis CFD/FEA y un sistema de recirculación de material, puede reducir el desperdicio, mejorar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental en la producción cerámica de Dolores Hidalgo, Guanajuato, México, bajo un enfoque "de la cuna a la puerta"?

Interrogantes secundarios. Por su parte, las cuestiones accidentales que se pretenden analizar en la presente investigación son las siguientes:

1. ¿Qué deficiencias específicas presenta el proceso manual de vaciado de barbotina en términos de calidad, eficiencia y sostenibilidad en las micro y pequeñas empresas de Dolores Hidalgo?
2. ¿Qué beneficios puede aportar el diseño asistido por computadora (CAD/CAE), específicamente mediante SolidWorks, en la automatización del proceso de vaciado?
3. ¿Cómo contribuyen el análisis de dinámica de fluidos (CFD) y el análisis de elementos finitos (FEA) a optimizar el flujo y la estructura del sistema automatizado?
4. ¿Qué características técnicas y funcionales debe cumplir un sistema de recirculación de barbotina para asegurar su reincorporación sin comprometer la calidad del producto?
5. ¿Cuáles son los impactos ambientales del sistema automatizado en comparación con el proceso tradicional, según el análisis de ciclo de vida (LCA)?
6. ¿Cómo puede la automatización mejorar la competitividad de las micro y pequeñas empresas cerámicas frente a la competencia nacional e internacional?
7. ¿Qué implicaciones económicas, sociales y ergonómicas tiene la implementación del sistema automatizado en las condiciones laborales de los operarios?

1.7 Objetivo general.

Diseñar e implementar un sistema automatizado para el vaciado de barbotina en moldes cerámicos, integrando herramientas de modelado computacional (CAD/CAE), análisis de dinámica de fluidos (CFD), análisis estructural mediante elementos finitos (FEA) y un sistema de