

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería de Ciencias Naturales y Matemáticas

Reducción del hollín generado en la combustión incompleta de un recubrimiento poliéster en el curado de envases metálicos alimenticios mediante el estudio de la variación de temperatura en el incinerador.

INGE-2710

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniero Químico

Presentado por:

Ivonne Juliette Pazmiño Piedra

Allison Annabell Villafuerte Rivera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Un papel me fue muy poco para las tantas
gracias. Amaré siempre decirlas en persona.

Ivonne

Agradecimientos

A mi mamá, por siempre recordarme con sus palabras y apoyo que puedo hacer todo lo que me proponga. A mi papá, quien siempre estuvo pendiente de mí acompañándome y aconsejándome durante este proceso. A mi pareja, por su gran apoyo y entendimiento en este largo trayecto. A mis gatitas por alegrarme en los momentos más difíciles.

A los técnicos, quienes han sabido guiarnos y brindarnos sus conocimientos para cumplir con parte fundamental del proyecto.

A todos infinitas gracias por ayudarme a cumplir otra etapa más de mi vida.

Allison Villafuerte Rivera

Declaración Expresa

Yo/Nosotros Ivonne Juliette Pazmiño Piedra y Allison Annabell Villafuerte Rivera acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

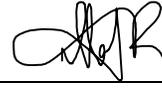
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de Enero del 2025.



Yvonne Juliette Pazmiño

Piedra



Allison Annabell

Villafuerte Rivera

Evaluadores

Nombre del Profesor

MSc. María Verónica Ordoñez

Nombre del Profesor

PhD. Carlos Bucaram

Resumen

La creciente demanda de envases metálicos alimenticios ha impulsado la necesidad de optimizar los procesos de producción, especialmente en la combustión en los incineradores industriales. Este proyecto mejoró las condiciones de producción, respecto al proceso de combustión mediante el ajuste de la temperatura en el incinerador, con el fin de reducir la generación de hollín y mejorar la calidad del producto final. Se ha identificado que la combustión incompleta produce hollín, que se adhiere a los productos y causa el descarte de lotes de las láminas expuestas, lo que representa una pérdida económica significativa. Para ello, se llevó a cabo un diseño experimental en cuatro fases: Se determinó el porcentaje de hollín generado por diferentes recubrimientos; se analizó los grupos funcionales en el recubrimiento prioritario mediante espectroscopia FTIR; se realizaron análisis termogravimétricos para determinar el comportamiento calorimétrico del recubrimiento; y se evaluó 3 temperaturas en condiciones reales de operación y se cuantificó el hollín generado. Los resultados demostraron que un aumento en la temperatura del incinerador redujo significativamente la formación de hollín, lo que resultó en una mejora en la calidad del producto y un ahorro de costos. El análisis termo-económico demostró que el ajuste de las condiciones de operación genera un impacto significativo en la reducción de costos operativos, logrando una disminución del 45% en la formación de hollín, lo que se traduce en una notable reducción en el descarte de láminas defectuosas.

Palabras Clave: Ahorro, calidad, grupos funcionales, industria y termogravimetría

Abstract

The growing demand for metal food containers has driven the need to optimize production processes, particularly in combustion within industrial incinerators. This project improved production conditions regarding the combustion process by adjusting the incinerator temperature to reduce soot generation and enhance final product quality. Incomplete combustion has been identified to produce soot that adheres to products and causes the disposal of bad quality sheet batches, representing significant economic losses. To address this, an experimental design was conducted in four phases: The percentage of soot generated by different coatings was determined; functional groups in the priority coating were analyzed using FTIR spectroscopy; thermogravimetric analyses were performed to determine the calorimetric behavior of the coating; and three temperatures were evaluated under real operating conditions with soot generation quantification. Results demonstrated that an increase in the incinerator temperature significantly reduced soot formation, resulting in improved product quality and cost savings. The thermo-economic analysis showed that adjusting operating conditions generates a significant impact in reducing operational costs, achieving a 45% decrease in soot formation, which translates into a notable reduction in the disposal of defective sheet.

Keywords: *Savings, quality, functional groups, industry, and thermogravimetry.*

Índice general

Evaluadores	6
Resumen	7
<i>Abstract</i>	8
Índice general	9
Abreviaturas	12
Simbología	13
Índice de figuras	13
Índice de tablas	14
Capítulo 1	15
1. Introducción	16
1.1 Descripción del problema	16
1.2 Justificación del problema	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Marco teórico	19
1.4.1 Empaques metálicos y recubrimientos	19
1.4.2 Curado	20
1.4.3 Incinerador	21
1.4.4 Hollín	21
1.4.5 Técnicas de Caracterización	22
1.4.6 Técnicas analíticas	22
1.4.7 Técnicas termoanalíticas	23
Capítulo 2	24
2. Metodología	25
2.1 Esquema del desarrollo del proyecto	25

2.2	Descripción del proceso.....	25
2.3	Diseño de experimentos.....	27
2.4	Recolección de muestra	28
2.5	Análisis de Ceniza	28
2.6	Análisis de Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)....	29
2.7	Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)	29
2.8	Proceso industrial	29
2.8.1	Selección del lote de prueba	29
2.8.2	Calibración del horno en base a las nuevas temperaturas.....	30
2.8.3	Recolección de la muestra luego del cambio en la temperatura del incinerador	30
2.8.4	Prueba en la línea de producción de litográfica	31
2.9	Análisis económico.....	31
Capítulo 3		33
3.	Resultados y análisis	34
3.1	Análisis de ceniza	34
3.2	Análisis FTIR	34
3.3	Reacciones químicas involucradas	36
3.4	Análisis TGA y DSC	37
3.5	Evaluación de la temperatura en un incinerador eléctrico industrial.....	40
3.6	Análisis estadístico	41
3.7	Análisis económico.....	42
Capítulo 4		44
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	45
4.1	Conclusiones.....	45
4.2	Recomendaciones	46
5.	Referencias	47

6.	Anexos.....	50
----	-------------	----

Abreviaturas

DSC	Calorimetría de Barrido Diferencial
FTIR	Espectometría Infrarroja por Transformada de Fourier
TGA	Análisis termogravimétrico
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Association for Test and Materials
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO	Organización Internacional de Normalización
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
DSM	Método seccional discreto
EQ	Ecuaciones
HMOM	Método híbrido de momentos
MOMIC	Método de momentos con cierre interpolativo
GC-MS	Espectrometría de masa con cromatografía de gases
PAHs	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
COVs	Compuestos orgánicos volátiles

Simbología

CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
H ₂ O	Agua
mg	Miligramo
kW	Kilowatt
kV	kilovoltio
ppm	partes por millón
Pr(>F)	Valor de probabilidad asociado al estadístico F
°C	Grados Celsius
CHO	Grupo funcional aldehído
C=O	Grupo funcional carbonilo
USD	Dólar estadounidense
NO _x	Óxidos de nitrógeno
SO ₂	Dióxido de azufre
H ₀	Hipótesis nula
H _a	Hipótesis alternativa

Índice de figuras

Ilustración 1 - Esquema de fase experimental e industrial para la reducción de hollín en la línea de litográfica.....	25
Ilustración 2 - Diagrama del sistema de circulación de aire entre el incinerador y horno.....	26
Ilustración 3 - Esquema de la fase industrial para la toma de datos a nuevas temperaturas de seteados en el incinerador.....	31
Ilustración 4 – Reacción genérica para la formación de poliuretano a partir de isocianato e hidroxilo	37
Ilustración 5 – Reacción de descomposición térmica del poliuretano	37
Ilustración 6 – Reacción de combustión del alcohol y aldehído	37
Ilustración 7 – Curva Porcentaje de pérdida de peso respecto a la temperatura y tiempo	38
Ilustración 8 – 21 discos posicionados en la lámina para atrapar hollín	40
Ilustración 9 – Shapiro-Wilk test de normalidad	41
Ilustración 10 – Análisis estadístico sobre la posición de los discos	41
Ilustración 11 – Distribución del hollín en las diferentes posiciones.....	41
Ilustración 12 – Análisis ANOVA 3 factores.....	42

Índice de tablas

Tabla 1 – Diseño de experimentos	28
Tabla 2 – Resultado prueba de ceniza	34
Tabla 3 – Resultados de la experimentación industrial a los 10 minutos	40

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 Descripción del problema

La demanda de producción de envases metálicos alimenticios ha crecido a la par con la necesidad de preservar alimentos de distintas características orgánicas y químicas (Lestido-Cardama et al., 2022). Actualmente, el tiempo de prolongación de vida, y la prevención de contaminaciones cruzadas del alimento han permitido que los empaques alimenticios sean percibidos como artículos básicos de alta demanda y producción. Las industrias dedicadas su fabricación se enfrentan diariamente al reto de asegurar la calidad y seguridad de sus productos optimizando la generación de gases contaminantes y residuos orgánicos dentro de sus procesos (Mendoza Arteaga et al., 2024; Serrano, 2022). Sin embargo, todo proceso industrial comprende un impacto ambiental, que no sólo se produce al desechar los envases, si no en su elaboración. La fabricación de estos productos utiliza materias primas como agua, energía, combustible, compuestos químicos, entre otros; los cuales generan productos de las reacciones químicas involucradas que afectan a la salud humana y ambiental (Velez, 2021).

La producción industrial de envases metálicos conlleva algunas etapas tales como la línea de corte de las láminas metálicas, el barnizado, curado y el parafinado; siendo el barnizado una de las principales fuentes de emisión de gases contaminantes (Daniel & Loor, 2015). En esta etapa se aplican varios recubrimientos en la lámina metálica que impide el contacto entre el metal y el producto para evitar contaminación, degradación y demás (Daniel & Loor, 2015).

Según Mendoza Arteaga et al. (2024) uno de los parámetros críticos de estas zonas, es la temperatura en el proceso de curado, que si no se controla adecuadamente puede ocasionar la producción de hollín, una baja calidad en el producto final, una vida útil reducida y contaminación de los alimentos.

Sin embargo, durante este proceso en la planta se ha identificado la excesiva presencia de “black smoke” y la generación de hollín, productos de una combustión incompleta, que luego se adhieren al producto final causando el desecho de todo el lote de producción causando una pérdida económica significativa para la empresa.

Xi y coautores (2021) estudiaron el efecto de algunos parámetros en la formación del hollín tales como la adición de aditivos al recubrimiento, el combustible utilizado y el más importante, la temperatura de la cámara de combustión.

Dentro de la planta referida, no se ha hecho un estudio con respecto a la temperatura óptima en la cámara de combustión, o también conocido como incinerador. La temperatura actual operativa es utilizada para todas las líneas de producción (alimenticia, pinturas, etc.), por lo tanto, esta problemática afecta directamente a toda la planta.

La generación de “black smoke” y hollín también contribuye a la contaminación ambiental y tiene efectos nocivos sobre la salud humana. El “black smoke” es una mezcla de gases contaminantes con un alto contenido de carbono. La exposición prolongada a este humo puede ocasionar impactos negativos en el sistema respiratorio, tiene posibilidad de ser cancerígeno, y en casos extremos, ocasiona la muerte (Anair & Monahan, 2004).

Por ello, el propósito de este estudio es optimizar la eficiencia de combustión en un incinerador industrial mediante el ajuste de la temperatura, buscando reducir la cantidad de hollín. Investigaciones previas plantean que, el aumento de la temperatura del incinerador favorece una reacción completa entre el carbono y el oxígeno, lo que resultaría en la formación predominante de CO₂ en lugar de hollín (Blanquart & Pitsch, 2009), optimizando así la eficiencia de la combustión y reduciendo los costos de mantenimiento y producción.

1.2 Justificación del problema

En Ecuador, existen industrias dedicadas a la producción de envases metálicos alimenticios. En Guayaquil, yace una empresa que abastece a más del 80% del mercado en el país. Para el proceso de curado, esta planta cuenta con un horno eléctrico que emite gases de combustión que luego son llevados hacia un incinerador térmico para completar la combustión y que los gases menos tóxicos se liberen al ambiente.

En el proceso de curado de láminas metálicas, si no se controla adecuadamente la temperatura en la cámara de combustión, puede ocasionar una reacción de combustión incompleta en la misma dando paso a la formación de monóxido de carbono y al hollín (Blanquart & Pitsch, 2009) sustancias que son potencialmente nocivas para la salud humana y ambiental.

Una combustión pobre indica un exceso de hollín y advierte una mala conductividad térmica (TSI Incorporated, 2004). Al generarse una gran cantidad de hollín en la planta referida, el mismo se adhiere en el producto final ocasionando el desecho de todo el lote de producción.

Para verificar la hipótesis previamente planteada, se realizarán pruebas analíticas con muestras de recubrimiento poliéster, utilizado en el proceso industrial de curado, en condiciones controladas. La técnica de identificación de compuestos consiste en un barrido de FITR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) y empleando técnicas termo analíticas como el análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría de barrido diferencial (DSC).

Estas herramientas permitirán conocer los gases emitidos y estimar aproximadamente la cantidad de hollín a diferentes temperaturas. Con este estudio, se espera que el ajuste de temperatura permita una combustión más completa, beneficiando tanto a la empresa en términos económicos y de producción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Mejorar la combustión en el proceso de curado de envases metálicos alimenticios mediante la variación de temperatura en el incinerador para la reducción del porcentaje de hollín emitido por la quema de recubrimiento poliéster.

1.3.2 Objetivos específicos

- Emplear técnicas termo analíticas para el estudio del comportamiento químico de los compuestos volátiles partícipes en la reacción de combustión incompleta dentro del incinerador.
- Evaluar la temperatura mínima, operativa y máxima dentro de un incinerador eléctrico para la cuantificación de hollín adherido en las láminas metálicas durante el proceso de curado.
- Evaluar la viabilidad del cambio de temperatura en el incinerador mediante un análisis económico del sistema.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Empaques metálicos y recubrimientos

Es de vital importancia la existencia de industrias dedicadas a la producción de empaques alimenticios debido a que aseguran que la comida se mantenga fresca durante un tiempo prolongado y reduce el desperdicio alimenticio. Existen diversos tipos de empaques como cartón, plástico, vidrio, y latas Williams (2023).

Las latas son uno de los empaques más utilizados para la conserva de alimentos y su ventaja es el tiempo de vida de los alimentos conservados. Las latas requieren un recubrimiento protector conocido como esmalte que evita el contacto entre el metal y el alimento (Lestido-Cardama et al., 2022).

Las resinas epoxi han sido altamente utilizadas como barniz por sus propiedades mecánicas y su resistencia química. Sin embargo, en los últimos años se han tratado nuevas alternativas como el uso de resinas poliéster, acrílicas y demás (Lestido-Cardama et al., 2022).

1.4.2 Curado

Para que el barniz se solidifique y se adhiera a la lámina metálica es necesario la aplicación de calor para dar paso a las reacciones químicas del polímero. Este proceso se conoce como curado.

El calor puede aplicarse con algunos equipos siendo estos dispositivos infrarrojos, hornos o equipos térmicos. Durante este proceso se da una reacción exotérmica, en la cual el control de la temperatura es de suma importancia para evitar degradación de la resina y minimizar el tiempo de curado (Henriquez & Mertiny, 2017). La transferencia de calor dentro de las industrias de barnizado y laminado para los procesos de curado y secado se suelen dar por medio de conducción, convección y radiación.

La conducción permite que el calor se transfiera de la lámina a la resina y de la resina a la lámina. La convección permite que el calor se transfiera por movimiento del material caliente, el cual puede ser desde un serpentín a la superficie de barnizado, o del aire a la superficie de barnizado. Por último, la radiación se da por fuentes de calor emitidas por ondas electromagnéticas (Troyer, 2000).

En la empresa referida, las formas de transferir calor son por convección y conducción donde se utiliza un incinerador que transfiere calor hacia un horno eléctrico por medio de toberas y dispersores, y es dentro del horno, donde la resina procede a solidificarse y adherirse en la lámina. Cabe recalcar, que los gases emitidos por el horno son recirculados hacia el incinerador para aumentar la eficiencia energética.

1.4.3 Incinerador

Dentro de la industria, un incinerador es altamente utilizado para eliminar gases residuales tóxicos o peligrosos emitidos en procesos de combustión (Mugdal, 2014) y los parámetros más importantes son: el tipo de combustible y la temperatura en el incinerador. Mientras más peligrosos sean los compuestos gaseosos, se requerirá una mayor temperatura para destruir estos organismos (Hughes T.W et al., 1975).

Se han realizado algunos estudios donde establecen rangos de temperaturas óptimos en un incinerador. Por ejemplo, según Matee & Manyele (2015) el rango de temperatura debe estar entre 800°C y 950°C para no presentar humo negro y mantenerse bajo los límites máximos permisibles de emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido sulfúrico (H₂S) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Según Jacob y coautores (2021) un incinerador opera entre rangos de 900°C y 1200°C para que se dé la combustión completa de compuestos orgánicos. Según Mohair y coautores (2019) los incineradores están diseñados para trabajar en un rango de 900°C a 1100°C. Un incinerador que trabaja a menos de 800°C puede ocasionar una combustión insuficiente, o también conocida como incompleta, dando paso a la formación de hollín.

1.4.4 Hollín

El hollín está conformado por partículas sólidas provenientes del humo negro ocasionado por combustión incompleta. Es comúnmente observado en la quema de combustibles, por ejemplo, en los gases de escape de vehículos. Con el paso de tiempo, puede ocasionar daños en la cámara de combustión y tuberías (Valencia, 2023).

Los modelos matemáticos reportados que proporcionan información para la cuantificación del hollín tales como el modelo semi-empírico de 2 ecuaciones (2EQ), los modelos basados en el método de momentos con cierre interpolativo (MOMIC) , el método híbrido de momentos (HMOM) , y el método seccional discreto (DSM) tienen un alto nivel de complejidad y

representan un costo económico elevado para ser considerado dentro de un proceso industrial para el control de generación de hollín (Valencia R. ,2023).

Así como el monóxido de carbono, el hollín es imposible de eliminar por completo, pero sí es posible reducirlo para evitar complicaciones (TSI Incorporated, 2004). Existen varias formas de reducir el hollín como variando la temperatura de la cámara de combustión, agregando mayor cantidad de oxígeno y utilizar catalizadores de oxidación (Hendershot et al., 2010).

Según Blanquart & Pitsch (2009) la formación de hollín depende de algunos parámetros siendo la temperatura uno de los más importantes. El estudio descubrió que, a bajas temperaturas, el porcentaje de hollín aumenta hasta cierto punto, en el cual, si se sigue aumentando la temperatura, la cantidad de hollín se reduce.

1.4.5 Técnicas de Caracterización

Para poder entender de donde proviene el hollín, hay que conocer la reacción de combustión que tiene lugar en el incinerador de la planta. Esto permite conocer la temperatura de reacción, el comportamiento de los polímeros y qué polímeros están presentes en el recubrimiento. Para esto, se pueden emplear pruebas como el espectrofotómetro infrarrojo (FTIR), espectrometría de masa con cromatografía de gases (GC-MS) y para el análisis térmico, calorimetría de barrido diferencial (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA).

1.4.6 Técnicas analíticas

La GC-MS está siendo altamente utilizada para la identificación de compuestos volátiles y no volátiles en diferentes muestras (Vázquez-Loureiro et al., 2021). Esta técnica provee información esencial para la caracterización del polímero y ayudará a conocer qué compuestos son los que están siendo recirculados a la cámara de combustión nuevamente. Otra técnica aplicada es el FTIR que permite conocer los grupos funcionales presentes (Vázquez-Loureiro et al., 2021) que se utiliza en conjunta para la validación de los compuestos identificados.

1.4.7 Técnicas termoanalíticas

Para caracterizar el hollín generado en los esmaltes, se utiliza la técnica de TGA y DSC que son pruebas termoanalíticas que otorgan información sobre el comportamiento físico y químico de las muestras bajo un control de temperatura. Además, proveen información sobre la degradación del polímero a las condiciones requeridas.

El TGA en específico permite conocer la cantidad de CO y CO₂ que está formando conforme se quema la muestra, lo que nos da un conocimiento de la cantidad de hollín generada (Biswas et al., 2007). Mientras que el DSC permite obtener las propiedades térmicas de la muestra y lo más importante, el perfil de calor. Este perfil de calor indica como se relaciona la temperatura con el flujo de calor de una muestra y si existe algún pico de reacción que indique un cambio en las propiedades físicas (Tan & Man, 1999).

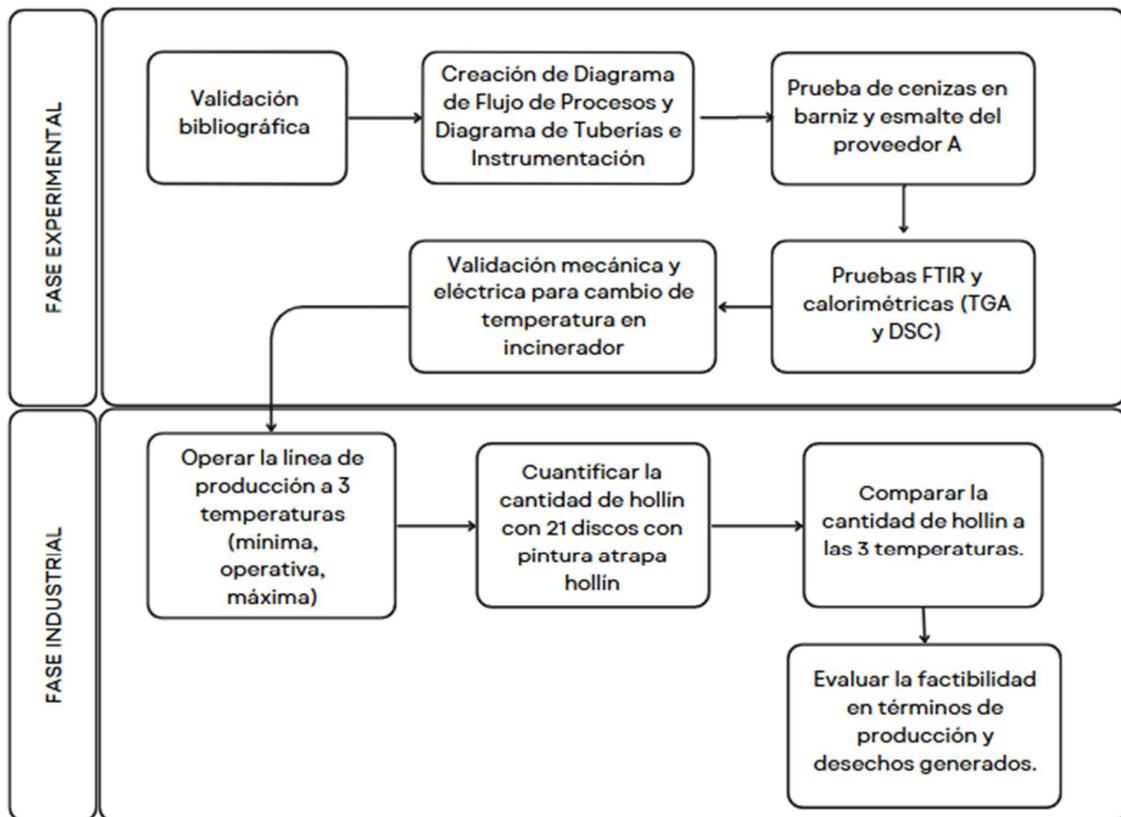
Capítulo 2

2. Metodología

2.1 Esquema del desarrollo del proyecto

A continuación, se presenta la metodología aplicada para el cumplimiento de los objetivos propuestos:

Ilustración 1 - Esquema de fase experimental e industrial para la reducción de hollín en la línea de litográfica.

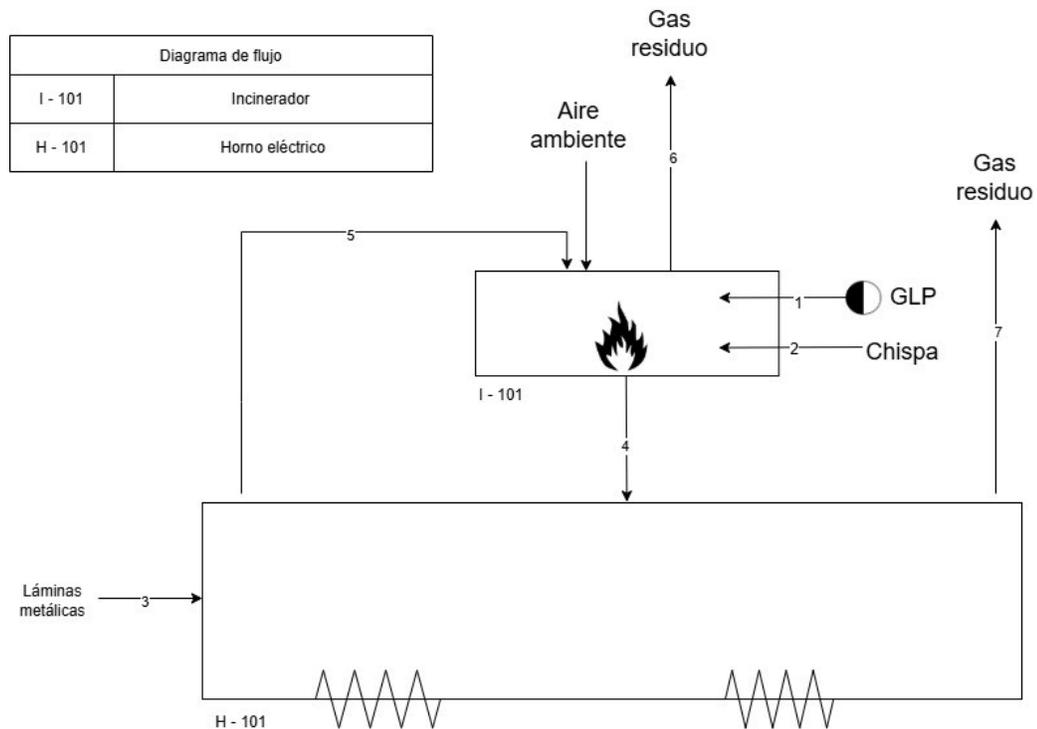


2.2 Descripción del proceso

En el proceso de producción de envases metálicos es necesaria la etapa de barnizado y curado, de tal manera que garantice la seguridad y calidad del producto. Durante el curado se obtiene como resultado una corriente de gases de combustión generada por la quema del recubrimiento poliéster usado en el barnizado. Otro factor que influye en la calidad de combustión de aire es la calidad de llama del quemador. Los resultados del estudio de compuestos de gases fueron de 48.3 %CO [ppm], 12.5%NO_x [ppm] y 11%SO₂ [ppm] a 231°C condiciones del horno, lo cual cumplen con los requisitos de la norma NTE INEN-ISO/IEC 17025:2018, los criterios generales del SAE y los criterios para uso del símbolo del SAE.

En la planta se observa un gran humo negro en la corriente gaseosa resultante lo cual indica la presencia de compuestos entre los cuales está el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), vapor de agua y aire. Dentro de este capítulo, se evalúa la metodología para la disminución del hollín.

Ilustración 2 - Diagrama del sistema de circulación de aire entre el incinerador y horno



Para que el curado se lleve a cabo, se requiere aplicar calor, lo cual se realiza en hornos especializados y a diferentes temperaturas. Adicionalmente se puede añadir materiales como la sílice que se adhiere en el metal a temperaturas superiores a 800°C hasta unos 1200°C (Schoeman et al., 2011). La temperatura dentro de la cámara de combustión afecta directamente las propiedades del recubrimiento, por lo cual, es necesario que sea controlada (Schoeman et al., 2011).

En el proceso industrial, para aplicar calor dentro del horno se utiliza un quemador o un incinerador. Para el caso de estudio, se utiliza un incinerador en donde ocurre la combustión y recircula el aire combustionado hacia el horno nuevamente. El incinerador opera con gas licuado de petróleo (GLP) y trabaja con resistencias eléctricas para generar la chispa.

Además, el aire utilizado para el proceso se aspira del ambiente. El horno es eléctrico y cuenta con toberas que dirige el aire hacia dispersores ubicados en la parte superior del horno.

Cada horno cuenta con un sensor térmico que regula la ubicación de dichos aspersores hasta asegurar que la temperatura sea uniforme en toda la superficie de la lámina. Además, se definió como un ciclo, al periodo que recorre la lámina a través del horno hasta conseguir el curado ideal entre 10 a 12 minutos a 200°C según recomendación del proveedor del esmalte.

2.3 Diseño de experimentos

Para este proyecto, se estableció un diseño de experimentos que consiste en 4 fases. En la primera fase, se determinó el porcentaje de hollín que generan dos tipos de recubrimientos utilizados en la empresa referida por medio de un análisis de cenizas donde se determinó el recubrimiento que requiere mayor prioridad.

En la segunda fase, se realizó una Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y se determinó los grupos funcionales en el recubrimiento prioridad.

En la tercera fase, se realizó un análisis termogravimétrico del esmalte prioridad bajo las temperaturas operativas de la empresa referida. Se realizó pruebas de Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) con lo cual se obtuvo el comportamiento calorimétrico, las temperaturas de reacción y la pérdida de peso respecto a la temperatura.

En la cuarta fase, una vez obtenida la temperatura óptima experimental, se la aplicó en el incinerador de la industria referida donde se observó cómo afectaba bajo condiciones reales el aumento de temperatura. En esta fase, también se cuantificó el hollín con “láminas atrapa hollín”, un método previamente utilizado en la empresa referida.

Finalmente, se evaluó la viabilidad del proyecto mediante un análisis termo económico.

	Número de experimentaciones	Standard utilizado	Resultados esperados
Análisis de Cenizas	1	ASTM D2584-02	Determinar recubrimiento con mayor porcentaje de hollín.
FTIR	1	ASTM E1421	Conocer los grupos funcionales

			presentes en el recubrimiento.
DSC y TGA	4	ASTM E793 – 06 y ASTM E 698 – 99	Determinar las curvas de Calor vs Temperatura y Porcentaje de pérdida de peso vs Temperatura.
Industrial	3	N/A	Cuantificar el hollín producido a diferentes temperaturas usando el método empleado en la empresa.

Tabla 1 – Diseño de experimentos

2.4 Recolección de muestra

Se recolectó dos tipos de recubrimientos: Barniz A y Esmalte A debido a que estos son mayormente usados en la empresa. La muestra fue recolectada el 29 de octubre del 2024 por los operarios de la zona de producción de la empresa referida. Se recolectó 500mL aproximadamente bajo condiciones ambientales. La muestra fue almacenada en envases de vidrio, con una cubierta de papel aluminio entre la tapa y el envase para mayor protección.

2.5 Análisis de Ceniza

El análisis de ceniza fue realizado de acuerdo con el Método de Prueba Estándar ASTM D2584-02 (American Society for Testing and Materials, 2010) para la pérdida por ignición de resinas reforzadas curadas. Este análisis permite conocer la diferencia de peso de una muestra (resina) al haber sido calentada en altas temperaturas siendo el remanente el porcentaje de cenizas. Siguiendo el método estándar, la muestra pesó 5g aproximadamente y se utilizó una mufla de marca Thermo Scientific modelo FB1410M a 565°C. En observaciones adicionales, la humedad relativa promedio fue de 55.23% y la temperatura ambiente promedio de 23.4°C. Con este análisis se obtuvo el recubrimiento de mayor prioridad en el cual se enfocaría el proyecto.

2.6 Análisis de Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

Este análisis fue llevado a cabo el día 15 de noviembre del 2024 con el equipo Spectrum Two FTIR con detector de LiTaO_3 de la marca Perkin-Elmer con un software de verificación Spectrum 10 de la misma marca. El análisis se basó en el standard ASTM E1421 (ASTM, 2021) que establece una muestra líquida de aproximadamente 0.25cm de grosor y deberá entrar en la abertura circular del equipo.

2.7 Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

De acuerdo con Biswas et al. (2007) el análisis TGA y DSC permite conocer el comportamiento calorimétrico de la muestra. Quiere decir, el flujo de calor, la descomposición térmica y peso perdido conforme aumenta la temperatura en condiciones inertes (N_2 , 99%).

Los parámetros para el análisis se establecieron en base a los siguientes estudios sobre polímeros:

En el estudio de Ghazi et al. (2024) se utilizó una tasa de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, en un rango de temperatura de $25\text{-}800^\circ\text{C}$ bajo gas inerte (N_2) con flujo de $50\text{mL}/\text{min}$ y 3mg de muestra. En otro estudio de Biswas et al. (2007) se utilizó $2\text{-}3\text{ mg}$ de muestra con una tasa de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ y un rango de $25\text{-}900^\circ\text{C}$ bajo gas inerte de $20\text{ mL}/\text{min}$. Finalmente, otro estudio de Trovati et al. (2010) se realizó con 5mg de muestra, a una tasa de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ bajo condiciones inertes con flujo de $20\text{mL}/\text{min}$ en un rango de $24\text{-}700^\circ\text{C}$.

Por lo cual, para la experimentación se utilizó 2mg del esmalte A bajo un flujo de gas inerte (N_2) de $20\text{mL}/\text{min}$, en un rango de $25\text{-}1000^\circ\text{C}$ con una tasa de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ para mayor precisión de la curva de calor. Se decidió aumentar el rango para observar el comportamiento más allá de la temperatura operativa de la empresa (700°C) para evaluar el comportamiento del gas a tales condiciones. El equipo utilizado fue un Analizador Térmico SDT modelo Q-600 de la marca TA Instruments el cual fue alimentado con un tanque de nitrógeno comprimido al 99.99% de la marca Indura.

En esta ocasión, se consideró como variables independientes el tiempo y el aumento de la temperatura; y como variables dependientes la pérdida de porcentaje de peso y el flujo de calor.

2.8 Proceso industrial

2.8.1 Selección del lote de prueba

Se seleccionó una orden de compra que contenga la combinación del esmalte seleccionado, para replicar el proceso de producción a baja escala. Se utilizó láminas que se

consideraron excesivas en producción, más no las indicadas para el proceso debido a los costos involucrados.

2.8.2 Calibración del horno en base a las nuevas temperaturas

La modificación de la temperatura influye directamente en la cantidad de calor que recibe el horno. Para cumplir con las recomendaciones del proveedor del barniz a la temperatura de 200°C a 10 minutos aproximadamente, se realizó el control térmico del horno. La alimentación de las láminas continuó hacia el horno, luego de comprobar que los sensores térmicos ubicados en la parte superior de las láminas cumplieron con la transferencia de calor homogénea en la misma.

2.8.3 Recolección de la muestra luego del cambio en la temperatura del incinerador

Dentro de la alimentación de las láminas metálicas barnizadas con los recubrimientos especificados por la orden de prueba se colocó una lámina con 21 discos adheridos con cinta térmica de la marca Kapton y se pasaron dos capas de la pintura encima de toda la lámina llamada “Atrapa hollín” de la marca HOLA, utilizada para capturar el hollín residual del ambiente.

En base al procedimiento de la empresa empleado únicamente luego del mantenimiento y limpieza de las líneas de litográfica, se hicieron modificaciones de este a partir de las pruebas termogravimétricas experimentales obtenidas.

El procedimiento modificado consistió en ingresar una lámina metálica sin barniz, y cubrirla con 21 discos con dos capas de atrapa hollín a la cara superficial expuesta al horno. Luego de cada ciclo, se procedió a tomar la lámina de metálica con el hollín adherido en los 21 discos y se registra la diferencia de pesos entre el disco neto menos el peso de la pintura atrapa hollín, el cual sería el hollín adherido total por área superficial (1m^2). La idea principal fue extrapolar la técnica termogravimétrica a condiciones industriales, considerando como variable principal la influencia de la temperatura en condiciones del horno y el incinerador.

Además, para esta fase se establecieron las siguientes asunciones para facilidad de cálculo:

- Todas las órdenes de producción tienen el mismo costo y tiempo de producción
- Todos los cálculos se basan en la idealidad debido a la complejidad de los datos

Los cálculos de energía consumida se llevaron a cabo en base a las siguientes fórmulas:

$$\text{Consumo de energía por hora} = \frac{\text{kW por orden de producción}}{\text{horas de producción}}$$

Ecuación 1 – Unidades del consumo de energía por hora

$$\text{Costo energético} \left(\frac{\text{kW}}{\text{h}} \$ \right) = \text{Consumo energético} * \text{Precio unitario de electricidad} (\$)$$

Ecuación 2 – Costo energético

Donde los kilowatts por orden de producción provienen de la base de datos.

El precio de la electricidad depende de cada país. Para Ecuador, el precio actual de la electricidad para las personas naturales es de USD 0,10 el kilovatio hora, mientras que, para empresas que requieran mayor consumo, el costo es de USD 0,07 el kilovatio hora según el consumo mensual de la misma (Tapia, 2024).

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Análisis de ceniza

Para el análisis de ceniza realizado a los siguientes recubrimientos: Barniz A y Esmalte A, se obtuvo el porcentaje de ceniza remanente al ser expuestos a una temperatura de 565°C de acuerdo con el Método Estándar ASTM D2584-02. Como se observa en la Tabla 2 – Resultado prueba de ceniza el recubrimiento con mayor porcentaje de ceniza es el Esmalte A, el cual previamente ha sido clasificado cualitativamente, por la empresa referida, como generador de hollín. Para este proyecto, se asume que el 100% de la ceniza recolectada representa el hollín y otros compuestos orgánicos carbonizados.

MUESTRA	PARÁMETRO	UNIDAD	Resultado
Barniz A	Ceniza	%	<0.1
Esmalte A	Ceniza	%	24.03

Tabla 2 – Resultado prueba de ceniza

Los resultados arrojados, permitió continuar el estudio termo calorimétrico enfocado al esmalte A para las fases de experimentación industrial y de laboratorio.

3.2 Análisis FTIR

El espectro FTIR presentado en el anexo 1 se observan diferentes picos que representan estructuras moleculares específicas que permiten identificar, ya sea, grupos funcionales o compuestos; este último, siempre y cuando el equipo tenga una base de datos amplia y actualizada. Sin embargo, debido a la ausencia de una base de datos para la interpretación de los espectros, el análisis de los picos fue realizado de manera manual junto con una exhaustiva revisión bibliográfica para la identificación y comparativa de compuestos en común de otros recubrimientos de origen similar.

Este procedimiento implicó la identificación visual del rango de onda característica y la comparación de los picos con estudios bibliográficos sobre los grupos funcionales hallados y los compuestos relacionados.

Se reconoce que la interpretación manual de los rangos de número de onda puede estar sujeta a error humano, sin embargo, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para confirmar los hallazgos de manera confiable.

En el anexo 1 se observan diferentes picos entre centrados y dominantes. En aproximadamente 3500cm^{-1} existe un pico centrado, lo cual indica presencia del grupo hidroxilo (-OH) probablemente con presencia de agua (H_2O), metanol o grupos terminales en resinas poliéster con un rango de onda de $>3000\text{cm}^{-1}$ (Hadjiivanov, 2014; Kizil et al., 2002; Nandiyanto et al., 2023). Se observa otro pico semi dominante y largo en aproximadamente 3000cm^{-1} , lo cual se aproxima a enlaces C-H de compuestos alifáticos con rango de onda de $2870\text{-}2895\text{cm}^{-1}$, asimismo, los estudios establecen que podría existir la presencia de aldehído que se ubica en un rango de onda de $2700\text{-}2800\text{cm}^{-1}$ (Coury & Dillner, 2008; He et al., 2017; Nandiyanto et al., 2023).

En el mismo rango, podría existir presencia de xileno, que tiene enlaces alifáticos, con un rango de $3100\text{-}2890\text{cm}^{-1}$ (Sangeetha et al., 2020; Yost et al., 2003). El siguiente pico está en el rango de $1800\text{-}1600\text{cm}^{-1}$, el cual se asocia al grupo carbonilo (C=O) típico en un poliéster o poliuretano con un rango de $1725\text{-}1750\text{cm}^{-1}$ (Coury & Dillner, 2008; Nandiyanto et al., 2023; Oyerinde & Bello, 2016). En el siguiente pico dominante y largo, en aproximadamente $1300\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, se halló que pertenece a un amino aromático con rango de onda de $1250\text{-}1340\text{cm}^{-1}$ (Jeyanthi & Gnana Sambandam, 2021; Nandiyanto et al., 2023). Finalmente, el último pico que se ubica en un rango de $1200\text{-}1000\text{cm}^{-1}$ lo cual podría pertenecer a un cianato (Haji Badri et al., 2010; Nandiyanto et al., 2023). Por último, se observa un pico débil en 650cm^{-1} lo cual indica presencia de un pigmento (frecuencias menores a 1000cm^{-1}), siendo el más utilizado en recubrimientos blancos, el óxido de titanio (TiO_2) (Primet et al., 1970).

Los hallazgos fueron posteriormente corroborados mediante validación interna por parte del personal técnico especializado de la entidad industrial colaboradora. En cumplimiento con los acuerdos de confidencialidad establecidos, se omite la denominación química específica de los compuestos que participaron en la reacción explicada en la sección 3.3. Sin embargo, se proporciona el grupo funcional al que pertenecen: metilo, aminas aromáticas, uretano, hidroxilo, éster y aldehído.

A partir de la obtención de los grupos funcionales, se decidió estudiar cada uno de ellos. Según el estudio de Guerrero Peña et al. (2016), el metilo o metil tiene una alta reactividad formar compuestos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) conocidos como los precursores del hollín. A altas temperaturas, los hidrocarburos se descomponen en moléculas más pequeñas con radicales libres (metil, metileno) que tienden a reaccionar con facilidad. Estos radicales se combinan y reaccionan con otros grupos alifáticos (o polímeros como el poliuretano o poliéster) para formar estructuras más complejas (PAHs). A medida que el hollín madura, su

estructura se hace más compacta, grafitica y menos reactiva. Además, tiene una alta probabilidad de supervivencia a altas temperaturas, lo cual significa que requiere mayor energía (o temperatura) para oxidarse por completo (Blanquart & Pitsch, 2009).

Con respecto al grupo éster, de acuerdo con el estudio de Lemaire et al. (2013) si se introduce un metil éster como reactivo a la reacción se logrará reducir la cantidad de hollín generado debido a que el grupo éster favorece a la descarboxilación por el oxígeno sobrante y libera CO_2 en etapas tempranas.

Asimismo, en otro estudio, se menciona que los aldehídos, alcoholes y ésteres tienen menor tendencia de formar hollín. Los aldehídos tienen una estructura más estable (-CHO) en donde el oxígeno forma parte de un enlace doble carbono-oxígeno (C=O) lo cual facilita la oxidación en etapas tempranas y da lugar a la formación de CO_2 (Barrientos et al., 2013).

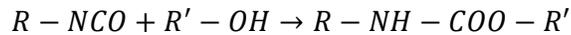
Por lo cual, uno de los compuestos que ayuda a la formación de hollín es el metileno como radical libre. Previamente se mencionó que, junto con la información actual, sería posible realizar un análisis calorimétrico para conocer el comportamiento del recubrimiento.

3.3 Reacciones químicas involucradas

La reticulación es un proceso químico mediante el cual las cadenas poliméricas se conectan entre sí a través de enlaces covalentes, formando una red tridimensional termoestable. Los enlaces cruzados son el producto de este proceso y aquellos que unen estas cadenas, otorgando al material propiedades como mayor resistencia mecánica, estabilidad térmica y resistencia química (Raimond & Charles, 1995).

En el sistema descrito (anexo 3), el esmalte que ingresa al horno está compuesto por solventes junto con reactivos. El proceso de curado a 200 °C da lugar a una serie de reacciones químicas que forman una red reticulada (De Lucas, 2018). Es altamente probable que el isocianato (-NCO) reaccione con los grupos hidroxilo del poliéster (-OH) para formar enlaces de poliuretano (-NH-COO-), esta reacción también se ilustra en Ilustración 4. Por otro lado, el reactivo que actúa como agente de reticulación reacciona con los grupos funcionales del poliéster para formar una red tridimensional termoestable. Durante este proceso, se generan subproductos como alcohol, agua y aldehído, derivados de la evaporación y descomposición parcial de los compuestos presentes en el esmalte (De Lucas, 2018). Estos subproductos son liberados como gases durante el curado, mientras que la reticulación forma un recubrimiento final duro y resistente que representaría a las resinas y pigmentos.

Ilustración 4 – Reacción genérica para la formación de poliuretano a partir de isocianato e hidroxilo



Por ende, los compuestos que van dirigidos al incinerador son los solventes y los productos de la reacción en el horno: poliuretano, alcohol, agua y aldehído. A una temperatura de 700°C, la interacción de poliuretano, enlaces cruzados, alcohol, agua, aldehído, combustible y aire forman reacciones químicas complejas dependiente de algunos parámetros. A esa temperatura, el poliuretano da paso al pirólisis, descomponiéndose en dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y aminas, mientras que el aldehído y el alcohol se oxidan a CO₂ y agua (NSF, 2015). Estas reacciones se muestran en la Ilustración 5 y Ilustración 6 respectivamente. En presencia de una combustión incompleta, este compuesto polimérico produce hollín, hidrocarburos intermedios y monóxido de carbono. Por lo tanto, el poliuretano es un compuesto que, a altas temperaturas y condiciones no equilibradas, forma monóxido de carbono y por ende, hollín.

Ilustración 5 – Reacción de descomposición térmica del poliuretano

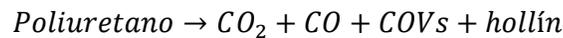
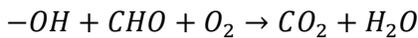


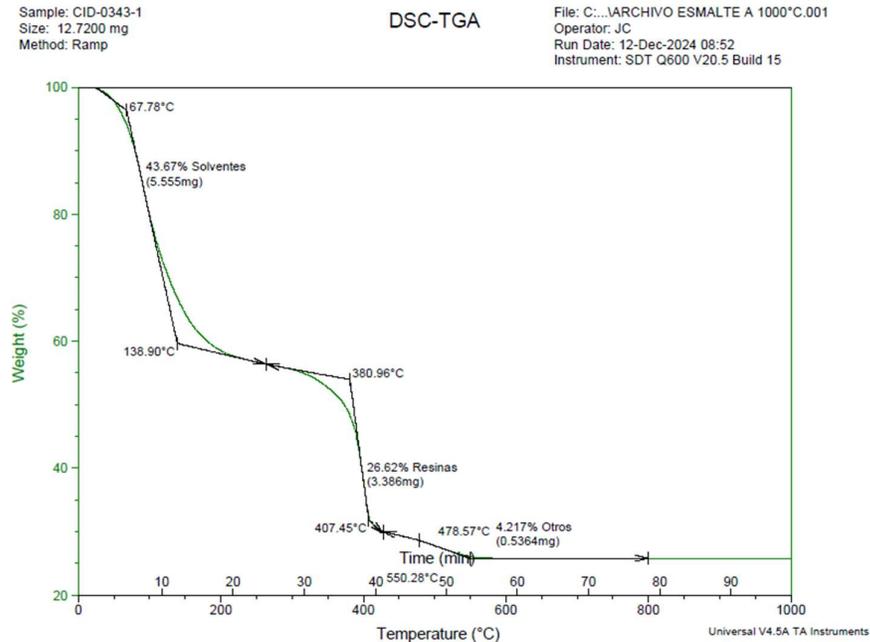
Ilustración 6 – Reacción de combustión del alcohol y aldehído



3.4 Análisis TGA y DSC

Se obtuvieron dos gráficas para el comportamiento calorimétrico del Esmalte A dentro del incinerador, que actualmente opera a 700°C. La Ilustración 7 representa la pérdida de componentes volátiles en el recubrimiento dentro del horno. Mientras que, la curva DSC (véase anexo 2) representa el flujo de calor o energía requerida para que el recubrimiento experimente cambios físicos o químicos.

Ilustración 7 – Curva Porcentaje de pérdida de peso respecto a la temperatura y tiempo



En la Ilustración 7 se observa una caída a los 20 minutos de un 43.67% del porcentaje de peso de compuestos con bajo punto de evaporación. Se comparó con los grupos encontrados en el FTIR, y tanto el éster, amina, metileno, metanol, xileno y agua tienen un bajo punto de evaporación que no pasa de los 300°C (Dreisbach & Martin, 1943; Katritzky et al., 1998). Cabe acotar que aproximadamente el barniz ingresa al horno a esa temperatura y por ello comienza a formarse la nube de compuestos orgánicos volátiles que son luego extraídos (véase anexo 3) y llevados al incinerador para eliminar la carga de los contaminantes.

Y se investigó que algunos de esos compuestos son solventes muy utilizados para recubrimientos de metales alimenticios (Monaghan & Pethrick, 2012), por lo que ese porcentaje perdido representaría los solventes en el Esmalte A. De ahí, se observa una pérdida de 27% de un poliéster que tiene una temperatura de descomposición en 300-400°C (Levchik & Weil, 2004) lo cual indicaría que esta región pertenece a las resinas. Finalmente, ese 4.21% que se pierde podría deberse a una mezcla de pigmentos junto con aditivos. Tanto las resinas como los pigmentos son los que se adhieren a la lámina metálica en el horno y, por ende, requieren un alto punto de evaporación y son aquellos que le dan protección, resistencia y durabilidad al esmalte. El 27% remanente representaría la cantidad de cenizas u hollín que no se logra reducir, y como se observa en la gráfica, ese porcentaje se mantiene hasta una temperatura de 1000°C.

Esto significa que los componentes, de acuerdo con el anexo 3, que son dirigidos al incinerador son los solventes y productos de una combustión previa, y son estos los causantes de la formación de hollín.

Por otro lado, también se realizó un análisis DSC para entender el comportamiento de los compuestos en el recubrimiento.

El anexo 1 muestra algunos picos fuertes y otros que son más largos y ensanchados. En el primer rango de 50-200°C no se observan picos ni exotérmicos ni endotérmicos significativos, esta región podría representar la evaporación de los solventes previamente mencionados. Existe un pico endotérmico en la región de 350-389°C que pudo darse debido a una ruptura de enlaces débiles que requiere calor. En la región de 389-415°C se presenta un pico exotérmico pronunciado con un punto máximo en 414.76°C con una reacción de enlaces cruzados como se mencionó anteriormente. También es donde la resina se endurece y adhiere al esmalte. El segundo pico exotérmico se observa en 414-531°C el cual representa la descomposición térmica del poliéster en compuestos más pequeños y simples con alta reactividad. Finalmente, en la región mayor a 600°C no hay picos significativos.

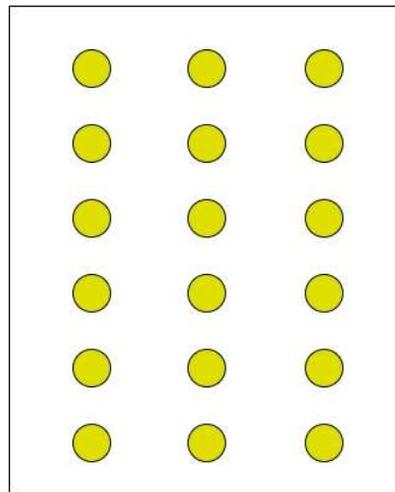
La importancia de poder entender el comportamiento del esmalte en las láminas es conocer lo que ocurre energéticamente en las regiones que corresponden a cada equipo, es decir 200°C para el horno y 700°C para el incinerador. Cuando ingresa la lámina al horno, se desprende la mayoría de los solventes y comienza a quemarse el resto del polímero. En esta parte, los compuestos orgánicos volátiles son llevados por un ducto de escape el cual alimenta al incinerador a tal temperatura para eliminar los gases que puedan representar un riesgo para la salud y ambiente.

El incinerador es un equipo de gran relevancia para las industrias que requieren altas cargas de calor, ya que permite reducir significativamente los costos energéticos mediante la reutilización del calor de los gases de combustión (Véase anexo 3). Durante el proceso, el flujo de aire ingresa y seca el esmalte en las láminas; al contener compuestos tipo solventes, estos forman una nube al ser expuestos al horno. Esta nube de solventes ingresa por los ductos del incinerador, el cual distribuye el vapor hacia las toberas del horno mediante un sistema de recirculación de gases combustionados.

3.5 Evaluación de la temperatura en un incinerador eléctrico industrial

Para esta evaluación, se utilizaron las temperaturas mínimas, operativas y máxima permisible en el incinerador de la empresa. Las cuales son: 600, 700 y 800°C respectivamente en la línea 1 de producción del área de litográfica. La lámina trabaja en esta empresa es de 83.5cm de largo y 70cm de ancho. Debido a que el hollín se adhiere a la lámina de manera aleatoria, se colocaron 21 discos del mismo tamaño, con una diferencia mínima de peso y con 5cm de diámetro en posición ordenada y con separación para observar la cantidad de hollín que se adhería en cada disco como se observa en la Ilustración 8.

Ilustración 8 – 21 discos posicionados en la lámina para atrapar hollín



La prueba se llevó a cabo durante 10 minutos, que es el tiempo recomendado por el proveedor para que el esmalte se adhiera a la lámina. Se realizaron dos réplicas más para la primera temperatura, pero al observar que los resultados eran extremadamente similares, se decidió descartar las réplicas.

Los resultados de la Tabla 3 muestran que, en efecto, la temperatura en el incinerador sí afecta en la formación del hollín. Como se observa, a una temperatura de 800°C, la cantidad de hollín es de 0.01g, mientras que, en 600°C es de 0.05g.

Temperatura (°C)	Gramos de hollín (g)
600	0.0539
700	0.0233
800	0.0127

Tabla 3 – Resultados de la experimentación industrial a los 10 minutos

3.6 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico ANOVA, se requiere evaluar la distribución de los datos con el test de normalidad de Shapiro-Wilk, el cual permite conocer la probabilidad de que los datos se desvíen de la normalidad. Para que se cumpla la normalidad, el valor p (p-value) debe ser mayor a 0.05 (Luzuriaga Jaramillo et al., 2023). Como se observa en la Ilustración 9, el valor p es de 0.26, por lo cual se concluye que los datos son normalmente distribuidos. También se observa que la constante W tiene un valor de 0.97, muy cercano a 1, mostrando que tienen alta normalidad.

Ilustración 9 – Shapiro-Wilk test de normalidad

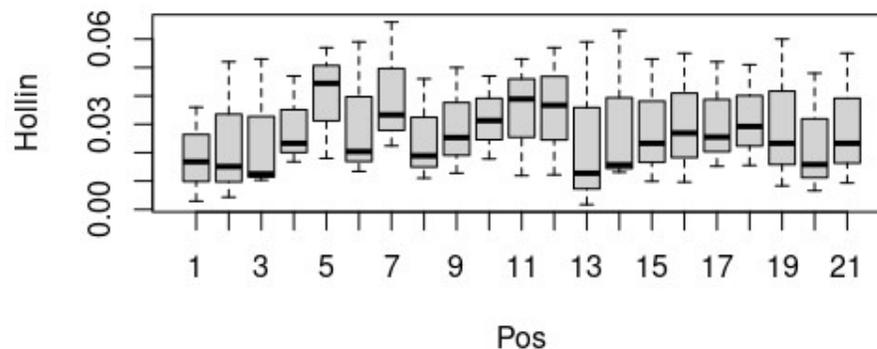
```
Shapiro-Wilk normality test
data: mod1$residuals
W = 0.97645, p-value = 0.2681
```

Para confirmar que la posición de los discos no tiene una influencia significativa en la adherencia del hollín se realizó el análisis ANOVA. La hipótesis nula (H_0) es que no hay efecto del factor posición en cuanto a la cantidad de hollín, mientras que la hipótesis alternativa (H_a) es que al menos una de las posiciones tiene un valor de hollín significativamente diferente. Este análisis se realizó en RStudio donde se tuvo como resultado un valor $\text{Pr}(>F)$ igual a 1, lo cual significa que no se rechaza la hipótesis nula por lo cual no hay efecto de la posición en cuanto a la cantidad de hollín generado como se observa en la Ilustración 10.

Ilustración 10 – Análisis estadístico sobre la posición de los discos

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Pos	20	0.001669	0.0000835	0.171	1
Residuals	42	0.020457	0.0004871		

Ilustración 11 – Distribución del hollín en las diferentes posiciones



Asimismo, se realizó un análisis ANOVA de 3 factores para confirmar que los gramos de hollín generados a las temperaturas mencionadas son diferentes entre sí. La hipótesis nula es que el factor de la temperatura sí tiene influencia con los valores de hollín generados, mientras que la hipótesis alternativa es que la temperatura no tiene influencia y la cantidad de hollín generada es la misma. Para que la hipótesis nula se rechace, el valor p necesita ser mayor a 0.05.

El resultado se puede observar en la Ilustración 12 donde se confirma que tanto a 600°C y 700°C como en 600°C y 800°C la hipótesis nula no se rechaza, y por ende la temperatura tiene gran influencia en la generación de hollín debido a que el valor p es 0. Mientras que, en 700°C y 800°C el valor p es de 0.01. Debido a que el valor es menor a 0.05, se concluye que todas las temperaturas afectan para la formación de hollín y, por ende, no se rechaza la hipótesis nula.

Ilustración 12 – Análisis ANOVA 3 factores

Col Mean- Row Mean	T600	T700
T700	4.285038 0.0000*	
T800	6.776927 0.0000*	2.491889 0.0191*

3.7 Análisis económico

El análisis se realizó con la base de datos proporcionada por la empresa colaboradora. Por acuerdos de confidencialidad, los resultados se presentan en porcentajes con valores enteros.

El estudio abarcó cuatro rubros: la cantidad de dinero perdida anualmente por láminas defectuosas de hollín, la cantidad de desechos (láminas metálicas) generadas anualmente por el hollín, el nuevo gasto generado implementando la propuesta y finalmente, la cantidad de dinero ahorrado si se implementa la propuesta.

En el área litográfica, la empresa produce un aproximado de 2 millones anuales, las cuales aproximadamente 22 mil son las defectuosas por hollín representando un 1.1% de la producción. Dentro de producción se consideran diferentes rubros como mantenimiento, materia prima, electricidad, combustible, alquiler de sitio, entre otros. Por lo cual, el costo de producción de una lámina metálica de alta calidad es de aproximadamente \$0.5, mientras que, la producción de una lámina metálica de baja calidad con hollín cuesta 51 veces más.

Estas láminas de baja calidad son vendidas como chatarra por un precio menor al costo de producción una relación 3:10 por kg de desperdicio, generando pérdidas en la empresa. El

precio perdido por todas las láminas de baja calidad debido al hollín en el área litográfica anualmente es de 1.5 millones de dólares considerando solamente la materia prima. Si se consideran los rubros de mantenimiento, combustible, energía, entre otros, las pérdidas alcanzan los 2 millones anualmente.

A pesar de que existe un aumento de flujo de combustible, el aumento de la temperatura permite reducir estas pérdidas. Actualmente, a la temperatura de operación se consume un aproximado de 30 mil dólares anuales en combustible, y 15 mil dólares anuales en electricidad donde se pierde 1.1 % de láminas defectuosas. Al aumentar la temperatura, se aumenta el flujo de combustible.

Tanto la temperatura como el combustible aumentan en un 12%. Con la nueva temperatura, se obtiene un consumo eléctrico de 20 mil dólares, y en combustible a 35 mil dólares.

Sin embargo, el ahorro más significativo es con respecto a las láminas desechadas. Al aumentar la temperatura, se reduce la cantidad de hollín en un 45%, lo que permite un ahorro de 22 mil láminas que representa 1.5 millones.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se empleó un estudio calorimétrico con pruebas DSC, TGA y FTIR. Con respecto al FTIR, se obtuvieron las longitudes de onda del Esmalte A y se realizó un estudio bibliográfico para la obtención de los componentes pertenecientes al esmalte. Se obtuvo como grupos funcionales principales: ésteres, metileno, aldehído y xileno. Y como compuestos principales: poliuretano, benceno, metanol y agua. A partir de estudio, se concluyó que uno de los precursores de la formación de hollín es la descomposición del poliuretano a altas temperaturas. Con la prueba TGA se confirmó la información obtenida en el FTIR gracias a sus puntos de evaporación y se estudió la pérdida de peso del recubrimiento. Los hallazgos más importantes se obtuvieron con el análisis DSC, donde se concluyó que en 200°C se evaporan la mayoría de los solventes que posteriormente reaccionan a temperaturas mayores en el incinerador donde los polímeros se descomponen en compuestos más sencillos y de alta reactividad formando los PAHs, precursores del hollín.
- La metodología utilizada para la cuantificación del hollín fue adherir 21 discos, con pintura atrapa hollín, a una lámina metálica utilizada en la empresa, a 3 temperaturas: 600°C, 700°C y 800°C; la mínima, operativa y máxima permisible respectivamente. Se colocó la lámina 10 minutos dentro del horno (tiempo recomendado de operación) y al finalizar el curado, se cuantificó los 21 discos y la cantidad de hollín adheridos a los mismos. A la menor temperatura, se obtuvo en promedio una cantidad de hollín de 0.05g, a 700°C una cantidad de hollín de 0.03g y a 800°C se obtuvo 0.01g. Con los resultados obtenidos, se concluyó que la temperatura del incinerador sí tiene una influencia significativa en la formación de hollín en el horno. Esto se respalda con los resultados obtenidos en el análisis estadístico ANOVA.

- La factibilidad de la propuesta fue evaluada considerando las pérdidas por las láminas metálicas desechadas, las pérdidas en rubros de combustible y electricidad y el ahorro anual al implementar la propuesta. Las láminas desechadas anualmente son de 22 mil láminas, el 1.1% de la producción. En combustible se pierde 30 mil dólares y en electricidad 15 mil dólares. Con la propuesta implementada se ahorrarían 1.5 millones anuales en rubros de combustible, electricidad, mantenimiento, alquiler del lugar, entre otros. Por lo que se concluye, que la propuesta es altamente factible.

4.2 Recomendaciones

Tras culminar las actividades previstas en la propuesta, se han identificado las siguientes recomendaciones claves para mejorar y ampliar los resultados alcanzados en este estudio.

- Dado que el estudio se ha realizado en base al esmalte mayormente utilizado en la empresa, es crucial ampliar el alcance de la investigación aplicando la metodología propuesta con los demás esmaltes. Esto permitiría validar la metodología asegurando su precisión y aplicabilidad. Además de realizar los ajustes necesarios y genere una visión más completa y representativa de los procesos.
- Se sugiere colocar un filtro de fibra de cuarzo, el cual no es reactivo y resiste hasta 550°C, para recolectar el hollín en los tubos de escape de tal manera que el mantenimiento al equipo sea más eficaz y eficiente. Además, se podría facilitar la cuantificación de hollín que se queda atrapado en los tubos de escape.
- Para complementar la propuesta del proyecto, se recomienda hacer un estudio de la relación entre el combustible y el oxígeno en condiciones operativas, y realizar un análisis de gases de las corrientes de entrada y de salida.

5. Referencias

- Anair, D., & Monahan, P. (2004). *Sick of Soot - Reducing the Health Impacts of Diesel Pollution in California*. www.ucsusa.org
- ASTM. (2021). *Practice for Describing and Measuring Performance of Fourier Transform Mid-Infrared (FT-MIR) Spectrometers: Level Zero and Level One Tests*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1421-99R21>
- Biswas, B., Kandola, B. K., Horrocks, A. R., & Price, D. (2007). A quantitative study of carbon monoxide and carbon dioxide evolution during thermal degradation of flame retarded epoxy resins. *Polymer Degradation and Stability*, 92(5), 765–776. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.02.006>
- Blanquart, G., & Pitsch, H. (2009). Analyzing the effects of temperature on soot formation with a joint volume-surface-hydrogen model. *Combustion and Flame*, 156(8), 1614–1626. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.04.010>
- Daniel, J., & Loor, Z. (2015). *Propuesta para Aumentar la Productividad en un Proceso de Latas Barnizadas para Conservas*.
- Ghazi, S., Marefat Seyedlar, R., Naderpour, N., & Imani, M. (2024). A thermogravimetric analysis of residual char formation by gilsonite-filled, polyfurfuryl alcohol composites: acid treatment of gilsonite. *Discover Chemical Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43938-024-00054-9>
- Hendershot, R., Lebrecht, T., & Easterbrook, N. (2010). *Use Oxygen to Improve Combustion and Oxidation*. www.aiche.org/cep57
- Henriquez, R. G., & Mertiny, P. (2017). Filament winding applications. In *Comprehensive Composite Materials II* (pp. 556–577). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10313-3>
- Hughes T.W, Horn D.A, Sandy C.W, & Serth R.W. (1975). *Air pollution in coating - include coating e incinerator. 1.* <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9101RDC3.txt>
- Lestido-Cardama, A., Sendón, R., Bustos, J., Nieto, M. T., Paseiro-Losada, P., & Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A. (2022). Food and beverage can coatings: A review

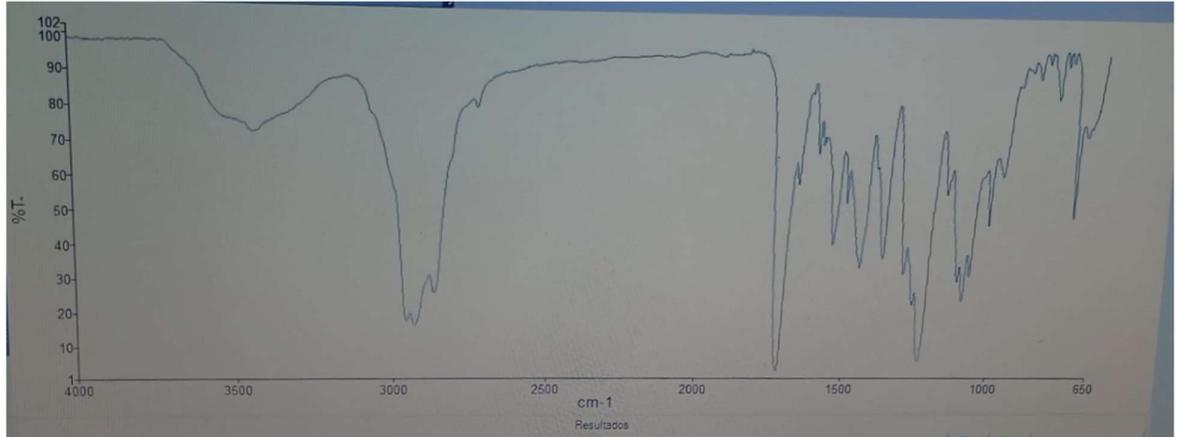
- on chemical analysis, migration, and risk assessment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3558–3611. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12976>
- Matee, V. E., & Manyele, S. V. (2015). Analysis of Temperature Profiles and Cycle Time in a Large-Scale Medical Waste Incinerator. *Engineering*, 07(10), 717–732. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.710063>
- Mendoza Arteaga, F. L., Romero Tumbaco, M. I., García Loor, G. M., & Abambari Vera, J. A. (2024). Análisis de la incidencia de la temperatura durante el doble cierre en el envase metálico 307 de la Máquina Cerradora FR 400. *Revista Científica y Arbitrada Del Observatorio Territorial, Artes y Arquitectura: FINIBUS*, 7(14), 67–76. <https://doi.org/10.56124/finibus.v7i14.007>
- Mugdal, D. (2014). *DEVELOPMENT OF COATINGS FOR INCINERATOR ENVIRONMENT USING D-GUN TECHNIQUE* [Thesis]. <http://hdl.handle.net/123456789/14540>
- Schoeman, R. M., Supervisor, V., Jf, D., & Van Rensburg, J. (2011). *Design and development of an automated temperature controller for curing ovens*.
- Serrano, C. (2022, October 4). *Industria alimenticia busca empaques más sostenibles*. El Vistazo.
- Tan, C. P., & Man, Y. B. C. (1999). *Analytical, Nutritional and Clinical Methods Section Differential scanning calorimetric analysis for monitoring the oxidation of heated oils*. www.elsevier.com/locate/foodchem
- Tapia, E. (2024, October 16). ¿Cuál es el costo real de la energía eléctrica en Ecuador? *Primicias*. <https://www.primicias.ec/economia/precio-real-energia-ecuador-subsidio-cortes-luz-81293/>
- Trovati, G., Sanches, E. A., Neto, S. C., Mascarenhas, Y. P., & Chierice, G. O. (2010). Characterization of polyurethane resins by FTIR, TGA, and XRD. *Journal of Applied Polymer Science*, 115(1), 263–268. <https://doi.org/10.1002/app.31096>
- Troyer, T. (2000). *Curing and Drying Technologies for Coating and Laminating* (Journal of Industrial Textiles, Ed.; 3rd ed., Vol. 29, pp. 240–248). Technomic Publishing Co. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1177/152808370002900306>
- TSI Incorporated. (2004). *An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis*.

- Valencia, R. (2023). *Desarrollo de modelos de formación de hollín para la identificación vía modelamiento numérico de las principales especies químicas precursoras de hollín en flujos turbulentos reactivos.*
- Vázquez-Loureiro, P., Lestido-Cardama, A., Sendón, R., López-Hernández, J., Paseiro-Losada, P., & Rodríguez-Bernaldo de Quirós, A. (2021). Identification of volatile and semi-volatile compounds in polymeric coatings used in metal cans by gc-ms and spme. *Materials*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/ma14133704>
- Velez, P. (2021, March 5). *¿Cuánto contaminan los envases y empaques de alimentos?*
- Williams, S. (2023, March). *CAN COATINGS: UNLOCKING THE FUTURE OF SUSTAINABLE PACKAGING.*
- Xi, J., Yang, G., Cai, J., & Gu, Z. (2021). A Review of Recent Research Results on Soot: The Formation of a Kind of Carbon-Based Material in Flames. In *Frontiers in Materials* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.695485>

6. Anexos

Anexo 1.

Curva FTIR del Esmalte A a temperatura ambiente



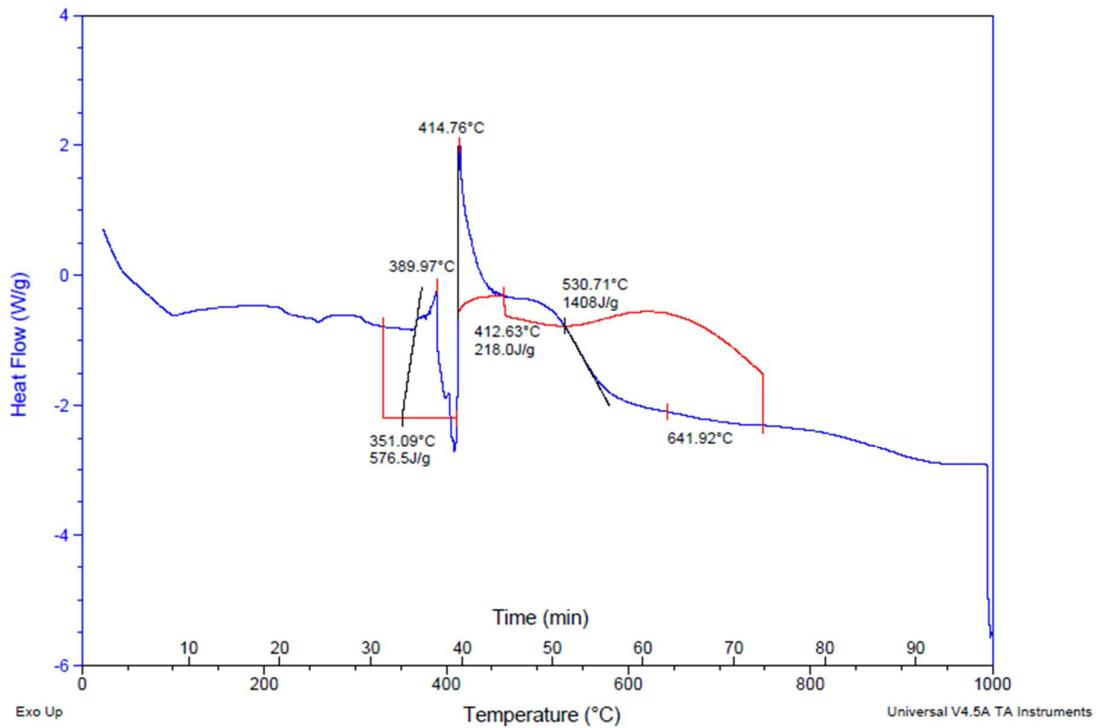
Anexo 2

Curva de flujo de calor vs tiempo del Esmalte A

Sample: CID-0343-1
Size: 12.7200 mg
Method: Ramp

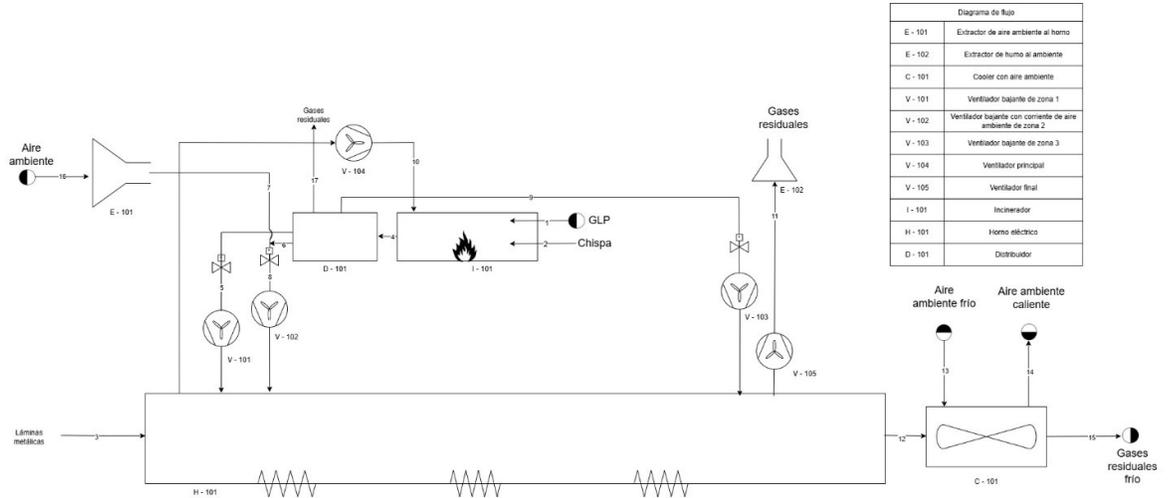
DSC-TGA

File: C:\...ARCHIVO ESMALTE A 1000°C.001
Operator: JC
Run Date: 12-Dec-2024 08:52
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15



Anexo 3

Diagrama de flujo de procesos



Anexo 4

Diagrama de tuberías e instrumentación

