



Desarrollo de soluciones digitales y analíticas para el seguimiento de procesos de reacción Batch de poliadición y policondensación.

Interfaz de Usuario mediante WebApps para el Análisis Integral de Batch de poliadición y policondensación

Ggimena Hoyos Osorio

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Asesores

Juan Carlos Quintero Diaz, Ingeniero Químico, PhD. Asesor interno

José Miguel Aguilar Torrealba, Ingeniero Químico. Asesor externo

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Hoyos Osorio, 2024)
Referencia	(Hoyos Osorio, 2024). <i>Desarrollo de soluciones digitales y analíticas para el seguimiento de procesos de reacción Batch de poliadición y policondensación</i> [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Dedicatoria

A mis amados padres, Sandra Osorio y Germán Hoyos, cuya constante dedicación, amor y apoyo han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Su ejemplo de esfuerzo, integridad y perseverancia me ha inspirado a alcanzar mis metas. A mi hermana, Valentina Hoyos, cuya compañía, complicidad y aliento han sido fuente de motivación. Su confianza en mí ha sido un faro de luz en los momentos de desafío, este logro no sería posible sin el sacrificio y la entrega de cada uno de ustedes. Les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todos los miembros de Andercol por brindarme la invaluable oportunidad de crecimiento profesional y personal durante mis prácticas académicas. Su apoyo y colaboración han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Agradezco especialmente a mis asesores de práctica por su guía constante y apoyo. Además, deseo destacar el invaluable acompañamiento y los conocimientos en mejora continua proporcionados por Chelsy Mena González y José Miguel Aguilar Torrealba. Su disposición para enseñar fue crucial para alcanzar los objetivos de este proyecto. A todos ustedes, mi sincera gratitud por su confianza, apoyo y por compartir generosamente su experiencia y conocimientos conmigo.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
1. Planteamiento del problema	10
2. Justificación.....	13
3. Objetivos	14
3.1 Objetivo general	14
3.2 Objetivos específicos.....	14
4 Marco teórico	15
4.1. Reacciones químicas	15
4.2. Procesos de la planta	17
4.3. Azure	18
4.4. Databricks.....	19
4.5. WebbApp	19
4.6. Python y herramientas de análisis	20
4.7. Análisis de Pareto.....	20
4.8. Conceptos estadísticos.....	21
4.9. Six sigma	22
5. Metodología	24
6. Resultados y discusión	26
8. Conclusiones	34
Referencias	36

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis de Problemas y Afectación en la Productividad.	29
--	----

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de barras porcentaje de cumplimiento anual de OEE por reactor en Cartagena 2023.....	10
Figura 2. Diagrama de barras de tiempos improductivos en el reactor principal de recubrimientos en Cartagena por categoría para el 2023.	11
Figura 3. Diagrama de distribución de tiempos de ciclo del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.....	12
Figura 4. Reacción de Polimerización por Condensación.	16
Figura 5. Reacción de Polimerización por Adición.	16
Figura 6. Diagrama de bloque de proceso del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.	18
Figura 7. Diagrama de bloque de proceso del producto pareto de recubrimientos en Barbosa.	18
Figura 8. Diagrama de funcionamiento del aplicativo Análisis de proceso.....	27
Figura 9. Diagrama del aplicativo Análisis de proceso para la curva ideal del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.	28
Figura 10. Comparación anual de la curva promedio de la VPP del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.	30
Figura 11. Aalisis de diferentes lotes de proceso representando la desviación con la curva promedio de la VPP del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.....	31

Siglas, acrónimos y abreviaturas

OEE	Overall Equipment Effectiveness
SPC	Statistical Process Control
°	
DMAIC	Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar
UPR	Unsaturated Polyester Resin
VPP	Variable Principal de proceso
RPP	Reactor principal
RAUX	Reactor Auxiliar

Resumen

El desarrollo de soluciones digitales y analíticas para el seguimiento de procesos de reacción batch de poliadición y policondensación es crucial para optimizar la eficiencia operativa de los reactores empleados y asegurar la calidad del producto final. Este proyecto se centra en la creación de una herramienta que integra interfaces de usuario mediante Streamlit, permitiendo un análisis integral y en tiempo real de estos procesos industriales. Se identificaron problemas relacionados con la falta de monitoreo continuo de las variables principales que afectan el proceso y la dificultad para detectar anomalías en los procesos de reacción, lo que afecta la capacidad de mantener características uniformes y predecibles en el producto final a lo largo de diferentes lotes de producción, lo cual es esencial para cumplir con los estándares de calidad y las expectativas del cliente. La metodología utilizada incluyó la adaptación de herramientas estándar a los requerimientos específicos del sistema industrial, el desarrollo de algoritmos especializados para el análisis de datos y un proceso iterativo de validación y mejora continua. Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la detección de anomalías y en la eficiencia operativa. La implementación de estas soluciones digitales permite una gestión más efectiva de los procesos de reacción química, optimizando tanto los recursos como el tiempo de producción.

Palabras clave: procesos de reacción batch, poliadición, policondensación, eficiencia operativa, calidad, producto, monitoreo continuo, detección de anomalías, herramientas digitales, análisis de procesos, Streamlit.

Abstract

The development of digital and analytical solutions for monitoring batch reaction processes of polyaddition and polycondensation is crucial to optimizing the operational efficiency of employed reactors and ensuring the quality of the final product. This project focuses on creating a tool that integrates user interfaces via Streamlit, enabling a comprehensive and real-time analysis of these industrial processes. Problems were identified related to the lack of continuous monitoring of the main variables affecting the process and the difficulty in detecting anomalies in the reaction processes, which impacts the ability to maintain uniform and predictable characteristics in the final product across different production batches. This consistency is essential to meet quality standards and customer expectations. The methodology included adapting standard tools to the specific requirements of the industrial system, developing specialized algorithms for data analysis, and an iterative process of validation and continuous improvement. The results obtained show a significant improvement in anomaly detection and operational efficiency. Implementing these digital solutions allows more effective management of chemical reaction processes, optimizing both resources and production time.

Keywords: batch reaction processes, polyaddition, polycondensation, operational efficiency, quality, product, continuous monitoring, anomaly detection, digital tools, process analysis, Streamlit.

Introducción

La industria química enfrenta el desafío constante de optimizar sus procesos productivos para mantener la competitividad y satisfacer las demandas del mercado. Los procesos de reacción batch, especialmente en la producción de polímeros mediante poliadición y policondensación, son críticos debido a su complejidad y a la necesidad de mantener una calidad consistente del producto final. Sin embargo, la falta de monitoreo continuo puede conducir a la detección tardía de anomalías resultando en la generación de desperdicios y pérdidas económicas significativas.

El problema principal que se aborda en este proyecto es la ineficiencia en la detección y corrección de desviaciones en tiempo real durante los procesos de reacción batch para la producción de polímeros mediante poliadición y policondensación. La importancia de solucionar este problema radica en la posibilidad de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y asegurar la calidad del producto final. La solución propuesta es el desarrollo de una herramienta digital de análisis de procesos que integre interfaces de usuario mediante Streamlit, adaptadas específicamente para el monitoreo y análisis en tiempo real de estos procesos.

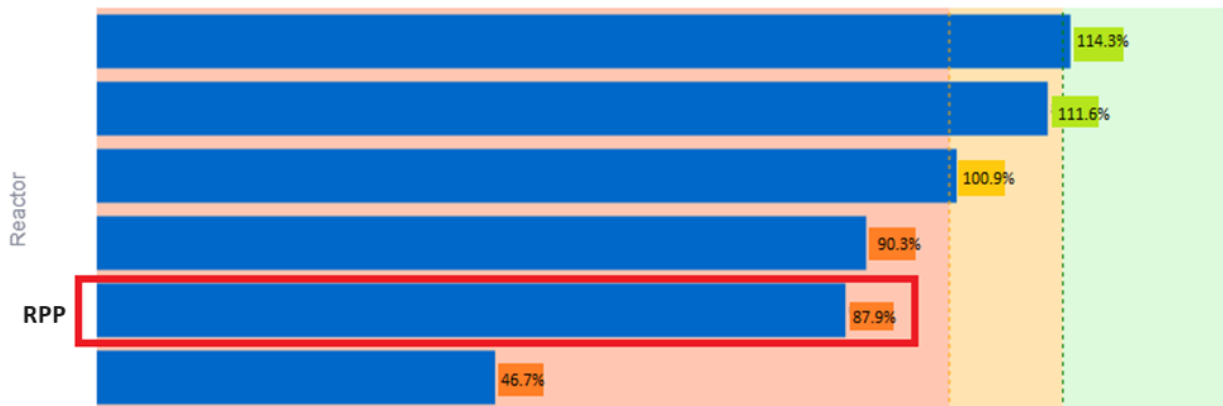
El objetivo general del trabajo es desarrollar e implementar una solución digital y analítica que permita el seguimiento y análisis integral de procesos de reacción batch de poliadición y policondensación. Para alcanzar este objetivo, se empleó una metodología que incluye la adaptación de herramientas estándar a los requisitos específicos del sistema industrial, el desarrollo de algoritmos especializados para el análisis de datos y un proceso iterativo de validación y mejora continua.

Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la capacidad de detección de anomalías y en la eficiencia operativa de los procesos. Esta herramienta no solo optimiza el uso de recursos y tiempo, sino que también garantiza la consistencia y calidad del producto final.

1. Planteamiento del problema

A finales de 2023, en las operaciones de Cartagena, se observa un deterioro de la eficiencia global del equipo (OEE) (Héctor René Álvarez Laverde, 2016), en el reactor principal de recubrimientos alcanzando un cumplimiento del 87.9% de la meta como se evidencia en la figura 1, este valor nos permite evaluar qué tan cerca estuvo cada reactor de alcanzar su rendimiento óptimo esperado, proporcionando una visión clara del desempeño y la eficiencia de cada equipo a lo largo del año. Este problema se ha identificado como consecuencia de incrementos en los tiempos de adecuación de equipo y extensiones de tiempo de proceso. Estos incrementos se reflejan claramente en los reportes de tiempos de paro del reactor y en las curvas de distribución normal de los tiempos de proceso del producto más fabricado, evidenciando un aumento significativo en los tiempos improductivos.

Figura 1. Diagrama de barras porcentaje de cumplimiento anual de OEE por reactor en Cartagena 2023.



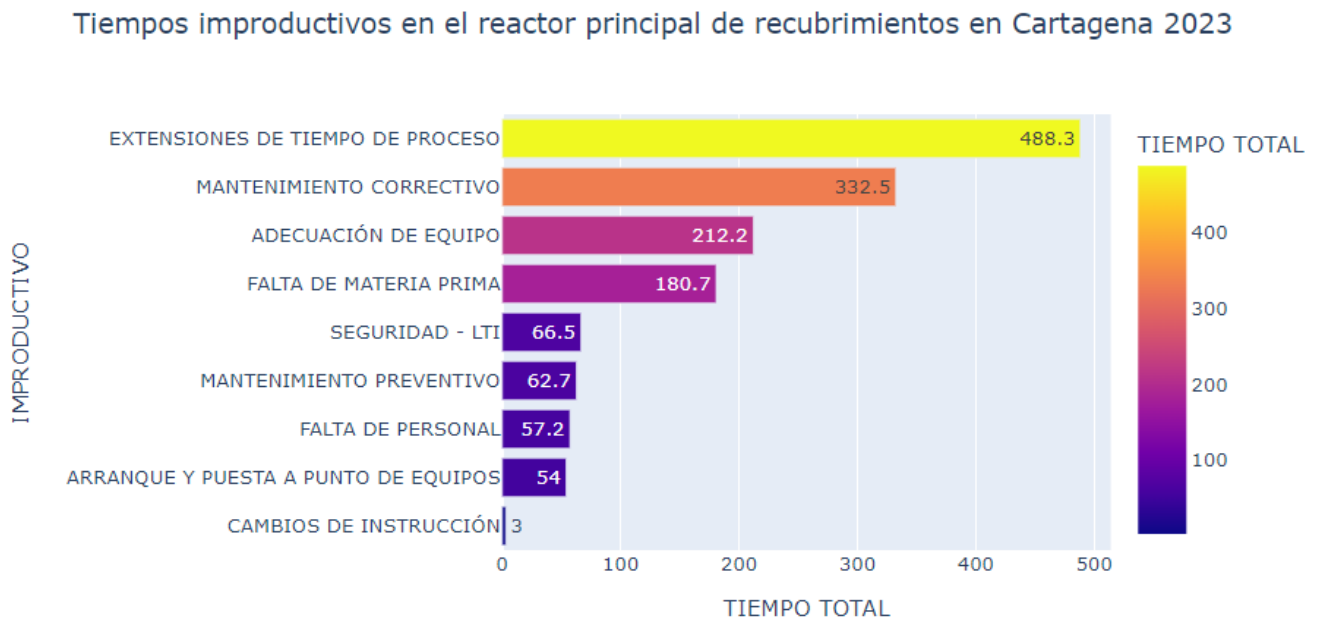
Nota: el eje Y representa los diferentes reactores de la planta de Cartagena, mientras que el eje X muestra el porcentaje de cumplimiento anual del OEE para el año 2023. El porcentaje de cumplimiento se calcula como la diferencia entre el valor anual del OEE del equipo y el valor esperado del OEE, dividido por el valor esperado del OEE, expresado en porcentaje.

El análisis de los tiempos improductivos de 2023, presentados en la Figura 2, revela que las extensiones de tiempo de proceso, el mantenimiento correctivo y la adecuación de equipo son las

principales fuentes de inactividad, con 488.3, 332.5 y 212.2 horas respectivamente. Los mantenimientos correctivos no se analizan en detalle por su naturaleza reactiva y no programada, ya que se realizan por fallos o problemas inesperados en el equipo, lo que dificulta la predicción de su ocurrencia y duración.

Los reportes de tiempos de paro del reactor y las curvas de distribución normal de tiempos de proceso del producto más fabricado presentados en la Figura 3, confirman estos incrementos, destacando la necesidad de priorizar las áreas de extensión de tiempos de proceso y adecuación de equipo.

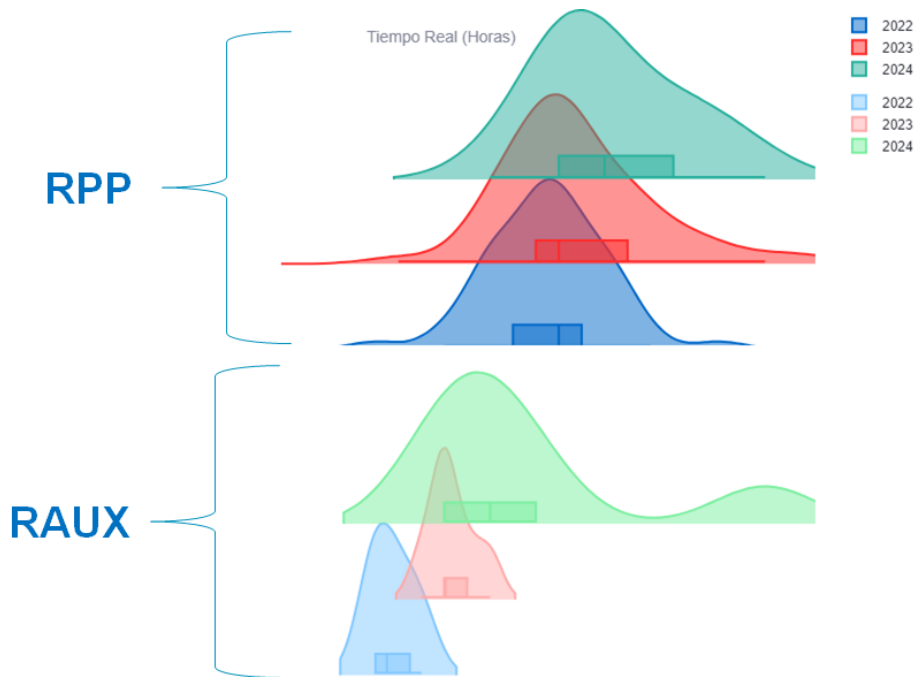
Figura 2. Diagrama de barras de tiempos improductivos en el reactor principal de recubrimientos en Cartagena por categoría para el 2023.



La Figura 3 representa la distribución de tiempos de proceso de los lotes fabricados en el reactor principal RPP y el reactor auxiliar RAUX del producto principal de recubrimientos de Cartagena donde se representan las distribuciones de los lotes realizados en 2022, 2023 y los que

se han realizado en 2024. Este tiempo se mide desde la entrada de la primera gota al reactor hasta que el reactor queda vacío.

Figura 3. Diagrama de distribución de tiempos de ciclo del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.



Aunque la distribución de los tiempos de proceso permite observar si la variabilidad es alta o si la media se ha desplazado, no se dispone de un análisis detallado de los tiempos específicos de las etapas del proceso.

La falta de datos precisos sobre los tiempos de proceso y las desviaciones, dificulta el análisis de novedades en los procesos, impide una comprensión completa de las causas subyacentes de las ineficiencias y, por ende, la identificación y corrección de problemas. Esto afecta significativamente el desempeño de los equipos, lo que tiene una repercusión en el tiempo, siendo este el principal recurso de una empresa.

2. Justificación

La pérdida de eficiencia, evidenciada tiene repercusiones directas en la productividad, los costos operativos y la capacidad de la empresa para cumplir con las demandas del mercado. Esta situación requiere una solución inmediata para asegurar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones.

La implementación de una herramienta analítica para el monitoreo de procesos en tiempo real genera múltiples impactos, el desarrollo de una base de datos robusta que facilita el análisis histórico y la predicción de tendencias, mejorando la toma de decisiones y la planificación de la producción. Estableciendo un sistema continuo de mejora basado en datos en tiempo real y la visualización de las principales variables del proceso permite generar mejoras más precisas e inmediatas para la optimización de los tiempos de proceso lo que reduce los costos operativos, llevando a un incremento en la eficiencia del equipo. Esto no solo disminuye los tiempos muertos y los recursos desperdiciados, sino que también aumenta la capacidad productiva. Lo que se traduce en un mayor retorno de inversión a corto y mediano plazo. La reducción de tiempos y optimización de procesos conlleva una disminución en el consumo de energía y la generación de residuos.

La mejora en los procesos industriales impacta positivamente en el entorno laboral, proporcionando un ambiente de trabajo más estable y eficiente. Los empleados se benefician de un sistema productivo más predecible.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una herramienta digital de análisis de procesos industrial y analítico, destinada a detectar anomalías en tiempo real, para mejorar la eficiencia operativa y garantizar la calidad del producto final en entornos de producción.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar algoritmos especializados para el análisis de comportamientos de lotes durante los procesos.
- Utilizar técnicas analíticas avanzadas para identificar desviaciones en los patrones de producción.
- Proporcionar interfaces finales amigables para los usuarios, permitiendo la visualización rápida de la información generada.

4 Marco teórico

4.1. Reacciones químicas

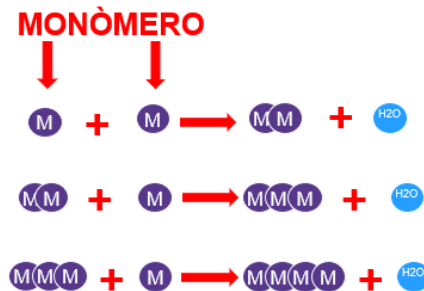
Las reacciones de poliadición y policondensación que se llevan a cabo en la planta se caracterizan por ser procesos altamente dinámicos. Estas reacciones implican la formación de enlaces covalentes entre monómeros para producir polímeros de alto peso molecular. La naturaleza dinámica de estos procesos difiere significativamente de los procesos en estado estacionario.

En los procesos en estado estacionario se alcanza un estado en el que las variables operativas como temperatura, presión y concentración permanecen constantes a lo largo del tiempo, asegurando así la uniformidad en las condiciones de proceso y la calidad del producto final (Soustelle, 2011).

Por otro lado, los procesos dinámicos son aquellos en los cuales las condiciones de operación varían continuamente con el tiempo. Estas variaciones pueden ser resultado de la evolución de las reacciones químicas, fluctuaciones en la alimentación de los reactivos o cambios en las condiciones operativas. La dinámica de estos procesos exige un monitoreo y control constante para asegurar la eficiencia y la calidad del producto, adaptándose continuamente a las condiciones cambiantes dentro del sistema (Upadhyay, 2006).

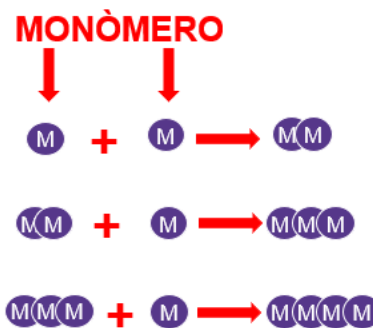
- **Polimerización por Condensación:** En la polimerización por condensación, los monómeros se unen con la liberación de pequeñas moléculas como agua o metanol figura 4. Este proceso es vital para crear polímeros complejos y de alta resistencia (Ebewele, 2000).

Figura 4. *Reacción de Polimerización por Condensación.*



- Polimerización por Adición: La polimerización por adición es un proceso en el cual los monómeros se unen para formar un polímero sin la pérdida de pequeñas moléculas figura 5 (Ebewele, 2000).

Figura 5. *Reacción de Polimerización por Adición.*



Para asegurar la calidad y la correcta aplicación de los productos de polimerización, es esencial llevar a cabo controles rigurosos de diversas especificaciones, tales como el valor ácido, el porcentaje de sólidos y viscosidad. La evaluación de la calidad se realiza midiendo la conversión de los ácidos, lo cual se logra mediante la monitorización de la disminución de la acidez a lo largo del tiempo. Además, se mide el crecimiento del polímero a través de la viscosidad. Una vez alcanzada la calidad deseada, la reacción se detiene de manera inmediata mediante un enfriamiento rápido, lo cual previene cualquier avance adicional de la reacción. Este control preciso es crucial

para asegurar que el producto final cumpla con los estándares de calidad establecidos y sea adecuado para su aplicación prevista (ODIAN, 2004).

- **Valor Ácido:** Este parámetro permite determinar la acidez final de la resina, lo cual es un indicativo del grado de conversión y del tamaño del polímero alcanzado. Además, facilita la estimación de los volúmenes de agua retirados durante el proceso. El valor ácido varía según la referencia específica del producto y se determina mediante una valoración con hidróxido de potasio (andercol, 2024).
- **% Sólidos:** Este valor determina la relación entre la resina sólida y el solvente de dilución. Es crucial para obtener la viscosidad deseada y se ajusta junto con el valor de acidez final, dependiendo de la referencia del producto. La determinación del porcentaje de sólidos se realiza mediante la evaporación de la fracción de solventes volátiles (andercol, 2024).
- **Viscosidad:** Este parámetro permite determinar indirectamente el tamaño del polímero, así como las propiedades de fluidez del producto final. La viscosidad varía según la referencia específica del producto, se mide de forma cuantitativa mediante la viscosimetría Brookfield y de manera cualitativa utilizando la escala de viscosidad Gardner (andercol, 2024).

4.2. Procesos de la planta

El diagrama de bloque de la figura 6 proporciona una visión clara y estructurada de las etapas críticas del proceso de producción del producto pareto de recubrimientos en Cartagena, destacando las fases de Alcohólisis y esterificación además de las operaciones posteriores que garantizan la calidad y las especificaciones del producto final (Andercol 2024).

El diagrama de bloque de la figura 7 proporciona una visión clara y estructurada de las etapas críticas del proceso de poliadición, comenzando con la carga de monómeros o semilla y continuando con el calentamiento y la adición de catalizadores y monómeros adicionales. Se destacan las fases de polimerización, con un control cuidadoso de la exotermicidad, y las operaciones posteriores de descarga, dilución y filtración que aseguran la calidad y especificaciones del producto final, antes del envasado (Andercol 2024).

Figura 6. Diagrama de bloque de proceso del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.

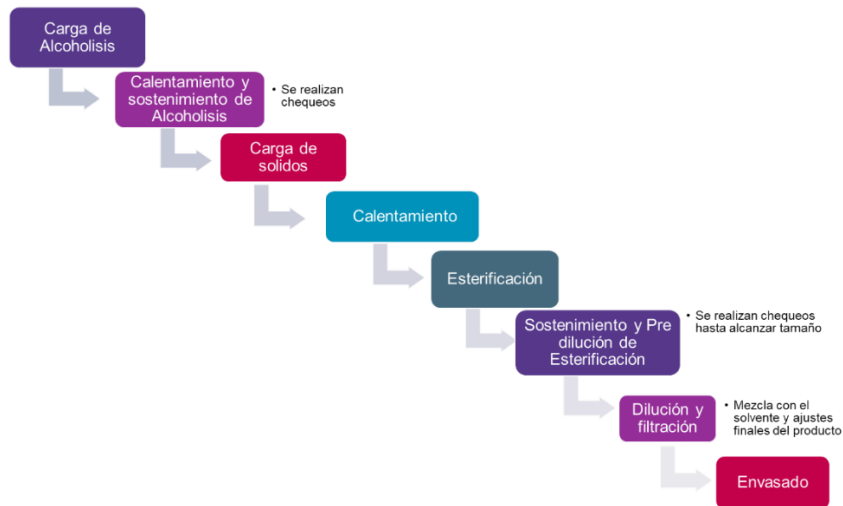
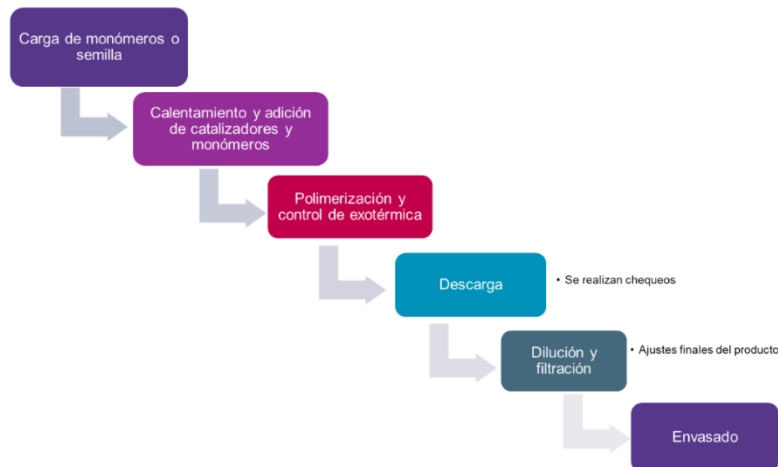


Figura 7. Diagrama de bloque de proceso del producto pareto de recubrimientos en Barbosa.



4.3. Azure

Azure es una plataforma de computación en la nube ofrecida por Microsoft que proporciona una amplia gama de servicios para almacenamiento, procesamiento y análisis de datos, entre otros. Azure permite a las empresas escalar sus operaciones de manera flexible y eficiente, en el contexto de este proyecto, Azure se utiliza para almacenar grandes cantidades de datos generados por los procesos de la planta y para proporcionar la capacidad de procesamiento necesaria para el análisis

en tiempo real y la ejecución de modelos de machine learning complejos que facilitan el desarrollo y la implementación de soluciones predictivas y de optimización. Azure Data Factory actúa como un servicio de orquestación de datos que facilita la ingestión y transformación de datos entre diversas fuentes y destinos, incluyendo Azure Blob Storage, donde se almacenan datos en formato de objetos a escala masiva. En conjunto, Azure Data Factory, Azure Databricks y Azure Blob Storage forman un ecosistema poderoso para la ingestión, procesamiento y análisis de datos a gran escala en la nube de Microsoft (Microsoft, 2024).

4.4. Databricks

Databricks es una plataforma de análisis y procesamiento de datos basada en la nube que facilita la colaboración entre científicos de datos y equipos de ingeniería. La integración con Azure permite aprovechar la potencia de la computación en la nube para procesar grandes cantidades de datos generados durante los procesos de la planta y ejecutar modelos de machine learning complejos. Azure proporciona una plataforma escalable y flexible para almacenar y procesar datos en tiempo real, mientras que Databricks ofrece un entorno de análisis unificado para realizar análisis avanzados y entrenar modelos predictivos (Microsoft, 2024).

4.5. WebbApp

Una webapp, o aplicación web, es un software que se ejecuta en un navegador web y proporciona funcionalidad interactiva a los usuarios a través de internet. A diferencia de las aplicaciones de escritorio, las webapps no requieren instalación y pueden ser accedidas desde cualquier dispositivo con un navegador (Diamond, 2022).

Streamlit es una herramienta que facilita la creación de webapps enfocadas en el análisis de datos y machine learning. Al usar Streamlit, los desarrolladores pueden transformar scripts de Python en aplicaciones web interactivas sin necesidad de experiencia avanzada en desarrollo web. Esto permite a los usuarios interactuar con los datos de manera dinámica y visualizar resultados en tiempo real, permitiendo a los usuarios explorar y entender mejor los resultados de los modelos y

análisis realizados. Streamlit es especialmente útil para la creación de dashboards y herramientas de visualización que pueden ser utilizadas por diferentes partes interesadas dentro de la organización para tomar decisiones informadas basadas en datos (Morgan, 2016)

4.6. Python y herramientas de análisis

Python es un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado en diversas disciplinas debido a su simplicidad y versatilidad. En el contexto del análisis de datos, Python ofrece una vasta colección de bibliotecas y herramientas que facilitan la manipulación, el análisis y la visualización de grandes volúmenes de datos. Para analizar los datos generados durante los procesos de la planta, se emplearán diversas herramientas de análisis implementados en Python (Vahid Mirjalili, 2019). Algunas de las bibliotecas que se utilizarán incluyen:

- **Pandas:** Esta librería se utiliza para la manipulación y análisis de datos estructurados. Específicamente, se emplea para leer y procesar los datos de entrada, calcular las métricas estadísticas necesarias, entre otras funciones (LACEY, 2019).
- **Regex:** Esta librería de expresiones regulares se utiliza para realizar operaciones de búsqueda y manipulación de cadenas de texto. Se emplea para limpiar y formatear los datos de entrada, eliminar caracteres no deseados y extraer información relevante, como fechas e identificadores de lotes (LACEY, 2019).
- **Glob:** Esta librería se utiliza para buscar archivos que coincidan con patrones específicos en el sistema de archivos (LACEY, 2019).

4.7. Análisis de Pareto

El análisis de Pareto es una técnica estadística ampliamente utilizada en la gestión de la calidad y la mejora de procesos para identificar y priorizar las causas principales de un problema. Esta metodología se basa en el Principio de Pareto, también conocido como la regla del 80/20, formulado por el economista italiano Vilfredo Pareto. El principio establece que, en muchos casos,

aproximadamente el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas. Este concepto sugiere que, al identificar y focalizarse en las pocas causas vitales, se puede lograr una mejora significativa en el rendimiento de un proceso o sistema.

La aplicación del análisis de Pareto permite a las organizaciones y equipos de trabajo enfocar sus esfuerzos y recursos en las áreas que tendrán el mayor impacto en la mejora del rendimiento. Esta priorización es crucial para la gestión eficiente de los recursos y para la implementación de acciones correctivas efectivas (OPM, 2015).

4.8. Conceptos estadísticos

La generación de curvas ideales a partir de los datos históricos de lotes conformes es una práctica estadística, donde el enfoque implica el cálculo y representación gráfica de métricas estadísticas clave, como la media y los cuartiles, para comprender la distribución y evolución de los tiempos de producción (Fernandez-Granda, 2017).

La media aritmética es una medida de tendencia central que representa el valor promedio de las variables que afectan la reacción en el tiempo. Esta métrica permite conocer el comportamiento central de los datos y visualizar la evolución del desempeño promedio a lo largo del tiempo. Por otro lado, los cuartiles son medidas de posición que dividen un conjunto de datos ordenados en cuatro partes iguales. En el contexto de este análisis, se utilizan específicamente el cuartil 25 (Q25) y el cuartil 75 (Q75). El cuartil 25 es el valor que deja el 25% de los datos por debajo de él, mientras que el cuartil 75 es el valor que deja el 75% de los datos por debajo de él (Fernandez-Granda, 2017).

Estos cuartiles permiten delimitar el rango intercuartílico, que contiene el 50% central de los datos, excluyendo los valores atípicos. Este rango proporciona información sobre la dispersión de los tiempos de producción, lo que ayuda a identificar patrones y tendencias en los procesos.

- **Media:** La media aritmética representa el valor promedio de los tiempos de los lotes seleccionados. Permite conocer el comportamiento central de los datos.

- Cuartil 25 (Q25): El cuartil 25 es el valor que deja el 25% de los datos por debajo de él. Representa el límite inferior del rango intercuartílico.
- Cuartil 75 (Q75): El cuartil 75 es el valor que deja el 75% de los datos por debajo de él. Representa el límite superior del rango intercuartílico.
- Métodos de regresión: para modelar la relación entre variables.
- Análisis de series temporales: para identificar patrones, tendencias y estacionalidad en los datos.

4.9. Six sigma

Six Sigma es una metodología de gestión de calidad que busca mejorar los procesos mediante la identificación y eliminación de defectos y variabilidad. Su objetivo es alcanzar un nivel de calidad cercano a la perfección, definido como no más de 3.4 defectos por millón de oportunidades. Este enfoque se basa en el uso de herramientas estadísticas y técnicas de mejora continua para lograr un rendimiento consistentemente alto en los procesos organizacionales (change, 2024) (incluir cita y referencia de algún libro o artículo que explique el tema)

Una de las metodologías centrales dentro de Six Sigma es DMAIC, que es un acrónimo de Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (BOSCH, 2020). Cada una de estas fases representa un paso crítico en el proceso de mejora:

- Definir: En esta fase, se identifican los problemas y se establecen los objetivos del proyecto. Se definen claramente los requisitos del cliente y los procesos a mejorar.
- Medir: Se recopilan datos relevantes para comprender el estado actual del proceso. Esta fase implica la medición del rendimiento del proceso y la recopilación de datos sobre las variaciones y defectos.
- Analizar: Los datos recopilados se analizan para identificar las causas fundamentales de los problemas. Esta fase utiliza herramientas estadísticas para determinar las raíces de la variabilidad y los defectos en el proceso.

- **Mejorar:** Con base en el análisis, se desarrollan e implementan soluciones para eliminar las causas fundamentales de los problemas. Esta fase se centra en la optimización del proceso y la implementación de mejoras.
- **Controlar:** Una vez implementadas las mejoras, se establecen controles para asegurar que los cambios se mantengan y que el proceso no vuelva a su estado anterior. Esta fase implica la creación de planes de monitoreo y control para mantener los beneficios logrados.

5. Metodología

En la ejecución de este proyecto, la metodología DMAIC fue crucial para la implementación de las mejoras, el cual es un proceso de six sigma (Pande, Neuman, & Cavanagh, 2004) basado en datos para mejorar los productos y procesos, cada uno tiene entradas, herramientas y salidas, además se adoptó un enfoque metodológico mixto que integre elementos cualitativos y cuantitativos. El proceso se inicia con la revisión documental y entrevistas para comprender a fondo los procesos industriales de Andercol y definir el problema. Simultáneamente, se desarrolló una sólida base tecnológica mediante el estudio de Python, se realizó ingeniería de datos, integrando los registros históricos en tiempo real de las variables de proceso junto con los reportes de producción y calidad. Se aplicó ciencia de datos para desarrollar modelos analíticos utilizando librerías de Python.

La fase siguiente de medición y análisis implica la inmersión en herramientas específicas de desarrollo y en el reconocimiento de Azure para soluciones en la nube (Microsoft, 2024). Posteriormente, se profundiza en Databricks y Streamlit (Max Mowbray, 2022), combinando el aprendizaje teórico con casos prácticos para una comprensión integral, además.

La implementación práctica se inicia con el desarrollo de la solución industrial y la creación de un Mockup, representación visual estática de una interfaz de usuario, utilizada en el desarrollo de software y en el diseño de user interface y user experience. Con el fin de ayudar a visualizar la estructura y el diseño de la aplicación antes de su implementación real y antes de desarrollarla, asegurando que cumpla con las expectativas de usabilidad y estética de los usuarios.

Seguido del análisis de las variables principales para cada proceso junto con el análisis de comportamientos estadísticos para cada una de ellas, así como identificar de los reportes de producción y calidad el histórico de los lotes de proceso a emplear para la construcción de las curvas empleando análisis de comportamientos estadístico y la integración con el código de Python y el desarrollo del aplicativo. Se realizan pruebas preliminares se para ajustes tempranos,

integrando feedback cualitativo con los ingenieros de proceso, haciendo revisión del comportamiento de cada curva ideal de las diferentes variables. La fase culmina con la entrega de la herramienta de análisis de procesos.

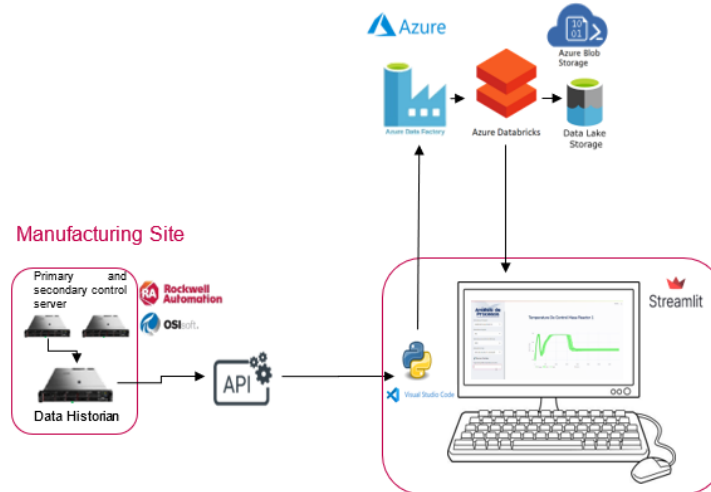
La conclusión del desarrollo incluye la presentación de cierre de las prácticas y entrega del aplicativo llamado "Análisis de Procesos". Se documenta exhaustivamente todo el proceso, asegurando una comprensión completa del proyecto. La revisión general y preparación para la entrega final cierran el ciclo, garantizando una implementación exitosa y satisfactoria. Este enfoque integral fusiona la experiencia en ingeniería química con las herramientas tecnológicas necesarias para abordar eficazmente los desafíos de la optimización de procesos.

6. Resultados y discusión

La implementación de la herramienta digital en las plantas de Cartagena y Barbosa permitió crear curvas ideales para las principales variables que afectan los tiempos de ciclo. Esta herramienta, denominada "Análisis de Procesos", se construyó a partir de datos históricos de producción y permite graficar varios lotes de producción sobre las curvas ideales, facilitando el análisis y la identificación de desviaciones en las etapas de los procesos. La capacidad de comparar el desempeño real con las curvas ideales permite identificar y corregir anomalías y generar planes de mejora destinados a optimizar el desempeño de los equipos y mejorar la eficiencia operativa.

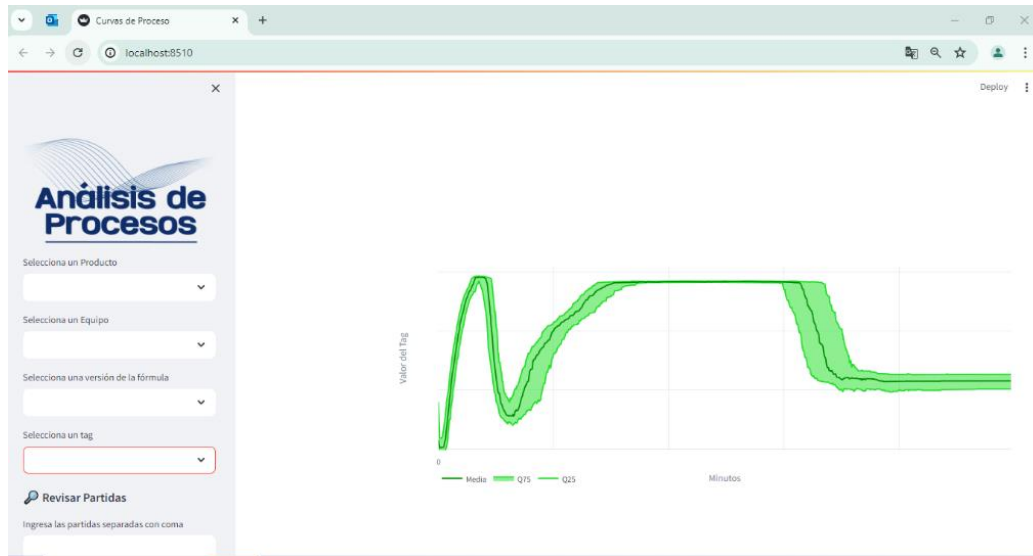
La herramienta se integra eficientemente en el ciclo de mejora DMAIC. Durante la etapa de Definir, se establecieron los objetivos y los procesos críticos. En la fase de Medir, se recopilaban y monitorizaban datos clave del proceso. La etapa de Analizar se benefició significativamente de los algoritmos de detección de anomalías y análisis de series temporales, identificando las causas raíz de las desviaciones. En la fase de Mejorar, se implementaron soluciones basadas en los hallazgos, optimizando los tiempos de ajuste y procesos. Finalmente, en la fase de Controlar, la herramienta proporciona un monitoreo continuo y retroalimentación para mantener las mejoras alcanzadas.

Figura 8. Diagrama de funcionamiento del aplicativo Análisis de proceso.



El diagrama de funcionamiento del aplicativo Análisis de proceso Figura 8 ilustra cómo los datos históricos de producción se recopilan y procesan para generar las curvas ideales. Los datos de los servidores de control primarios y secundarios se almacenan en un historiador de datos. Estos datos se extraen mediante una API y se procesan utilizando herramientas de análisis basadas en Python, como Pandas y regex. Los datos procesados se almacenan en la nube utilizando servicios de Azure, como Azure Data Factory, Azure Databricks y Azure Blob Storage. Finalmente, se utilizan interfaces como Streamlit para visualizar las curvas de proceso y los análisis en tiempo real se puede detallar el Mockup del aplicativo en la figura 9.

Figura 9. Diagrama del aplicativo *Análisis de proceso para la curva ideal del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.*



La visualización de los lotes de producción en relación con la curva ideal y los estados reales de los equipos contribuye significativamente a mejorar la eficiencia operativa y la calidad del producto final. Además, facilita el análisis detallado de las variables principales que afectan el producto, permitiendo a los usuarios comprender mejor el comportamiento de los procesos y tomar decisiones informadas.

Un resultado claro es la visualización en la implementación de la herramienta digital "Análisis de Procesos" en las plantas de Cartagena del producto pareto de recubrimientos, ha proporcionado insights significativos sobre los principales problemas que afectan la productividad. En la Tabla 1 se presentan los hallazgos clave derivados del análisis de datos históricos de producción, destacando las áreas críticas de mejora identificadas mediante la comparación entre el desempeño real y las curvas ideales generadas.

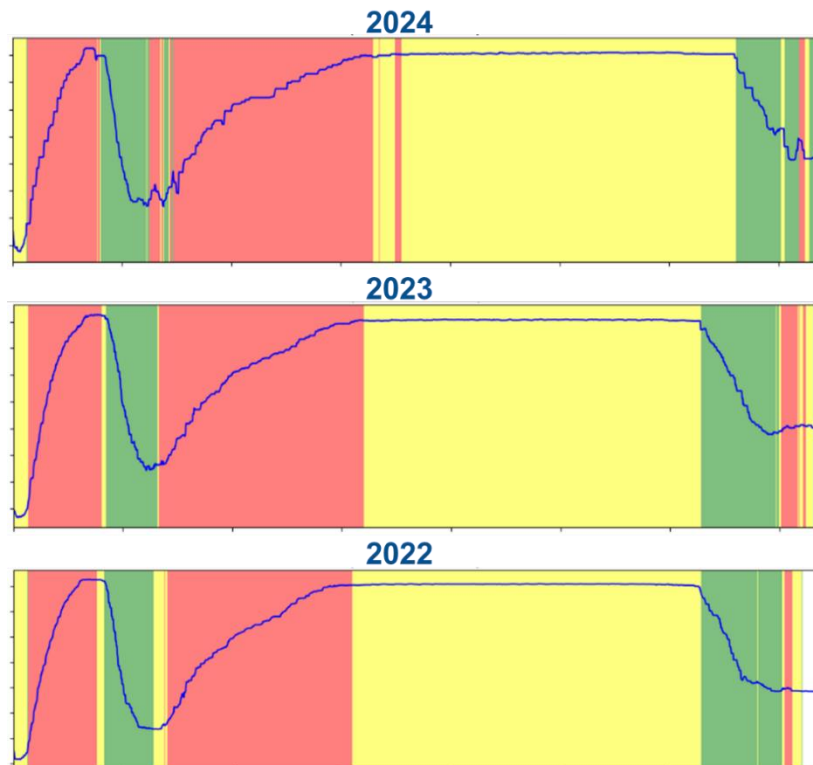
Tabla 1. Análisis de Problemas y Afectación en la Productividad.

Problema Identificado	Posibles Causas	Afectación en la Productividad y Áreas Afectadas
Variabilidad en la producción anual	Cambios en las condiciones de proceso	Consistencia del producto y tiempos de producción no especificados, pero las comparaciones anuales muestran variaciones en la curva promedio de la VPP del producto pareto.
Incremento en el tiempo de calentamiento de esterificación.	Control manual del calentamiento	4 horas adicionales en 2023, aproximadamente 16% de aumento en tiempo de ciclo y consumo de combustible.
Anomalías en los tiempos de ciclo	Procedimientos manuales y recursos limitados	Eficiencia operativa y consumo de recursos, con ayuda de la herramienta de análisis de procesos se ha identificado anomalías en la sintonía de los controles y los tiempos de respuesta de la planta y propuestos planes de mejora.
Cuello de botella en la etapa de esterificación	Ineficiencias en el proceso y control manual	7 de 25 lotes presentan extensión significativa en tiempo de esterificación, lo que representa el 28% de los lotes afectados en 2024, incrementando tiempo de ciclo y costos de producción.
Desviaciones en la curva ideal de producción	Variabilidad en los procesos y falta de sincronización	Calidad del producto y eficiencia operativa no especificada, que es posible observar en las desviaciones al comparar la producción real con la curva ideal del producto pareto de recubrimientos.

Los resultados detallan específicamente las causas de las desviaciones en los tiempos de ciclo y las recomendaciones para optimizar la eficiencia operativa y reducir costos de producción. Dónde se realizó el siguiente análisis y se generó un plan de mejora

La etapa de alcoholísis presenta una duración similar, sin embargo, las extensiones de tiempo de ciclo se están presentando por un mayor tiempo en la etapa de calentamiento de esterificación, evidenciando un incremento de aproximadamente 4 horas desde 2022 como se evidencia en la figura 10. Es difícil asegurar un control eficiente y con tiempos similares durante esta etapa, ya que el calentamiento se controla de forma manual.

Figura 10. Comparación anual de la curva promedio de la VPP del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.



El análisis de los 25 lotes de producción del producto pareto de recubrimientos en Cartagena en 2024, realizado con la herramienta "Análisis de Procesos" y los reportes de planta, ha revelado un cuello de botella crítico en la etapa de esterificación. Específicamente, 7 de los 25 lotes, es decir, el 28%, presentan una extensión significativa en el tiempo de esta etapa como se muestra en la figura 11, lo que se traduce en una reducción del rendimiento operativo y un aumento de los costos de producción. El análisis detallado ha identificado que la simultaneidad entre lotes de lo que va del 2024 es la causa principal de este problema, originado por la falta de sincronización entre etapas, recursos limitados y procedimientos manuales ineficientes.

Figura 11. Aalisis de diferentes lotes de proceso representando la desviación con la curva promedio de la VPP del producto pareto de recubrimientos en Cartagena.



Una posible solución es implementar el calentamiento en rampa, lo cual mejoraría estos tiempos perdidos en el calentamiento. Teniendo en cuenta la producción de 2023 del producto pareto de recubrimientos en Cartagena, se estima alrededor de 240 horas adicionales en calentamiento al año se podrían ahorrar, representando una mejora en el consumo de combustible.

Estos resultados destacan la importancia de la herramienta en la identificación de áreas de mejora y en la implementación de soluciones efectivas para optimizar los procesos de producción, subrayando su adaptabilidad y potencial para ser aplicada a nuevos productos y productos en homologación en diferentes equipos.

La implementación de la herramienta resultó en mejoras significativas en la eficiencia operativa, permitiendo a la planta de Cartagena optimizar sus procesos y reducir tiempos de ajustes previos. Además, facilitó la visualización de las etapas donde se presentaban extensiones de tiempo durante el proceso, generando mejoras enfocadas al cambio. Aunque se lograron importantes avances, la herramienta enfrenta desafíos relacionados con la integración de nuevos datos y la adaptación continua a cambios en los procesos. Los algoritmos y métodos empleados para la detección de anomalías y el análisis de series temporales demostraron ser efectivos en la identificación de desviaciones y patrones.

Las limitaciones de la herramienta sugieren varias oportunidades para futuras investigaciones. En particular, se recomienda la exploración de algoritmos más avanzados y adaptativos que puedan manejar de manera más efectiva la integración de datos en tiempo real y la adaptación a cambios dinámicos en los procesos, abordando comportamientos anómalos que afecten la calidad. Además, estudios adicionales podrían centrarse en la evaluación del impacto a largo plazo de estas herramientas en la eficiencia operativa y la calidad del producto.

Aquellos interesados en replicar este estudio, se recomienda prestar atención especial a la retroalimentación continua de los usuarios finales y la implementación de un sistema robusto para la integración de nuevos datos. Además, es esencial considerar la flexibilidad y escalabilidad de la herramienta para asegurar su relevancia y eficacia a medida que evolucionan las condiciones operativas.

La herramienta se ha adaptado exitosamente tanto para la planta de Cartagena como para la de Barbosa, y actualmente se tienen en el aplicativo 20 productos pareto de cada planta, lo que

demuestra su versatilidad y capacidad de adaptación a diferentes productos. Esto significa que la herramienta es completamente adaptable a todos los productos de las plantas, permitiendo su uso con nuevos productos y cambios en la homologación, lo cual es un resultado significativo, ya que asegura la continua relevancia y utilidad del aplicativo en un entorno de producción en constante cambio.

8. Conclusiones

La implementación de la herramienta de análisis de procesos en la planta de Cartagena no solo mejoró significativamente la eficiencia operativa y la calidad del producto, sino que también estableció una base sólida para futuras mejoras y expansiones. La combinación de técnicas analíticas avanzadas y herramientas digitales ha demostrado ser una solución efectiva para optimizar los procesos industriales. La continua adaptación y evolución de la herramienta, junto con la integración de nuevos datos, será esencial para mantener el análisis de comportamientos de lotes con desviaciones y la mejora continua de los análisis realizados. Además, la herramienta ha demostrado su utilidad en la detección temprana de anomalías y patrones, permitiendo una intervención oportuna y eficiente. La retroalimentación de los usuarios finales ha sido crucial para ajustar y mejorar la herramienta, asegurando su relevancia y eficacia en el contexto industrial en constante cambio. Esta implementación no solo ha cumplido con los objetivos planteados, sino que también ha proporcionado una plataforma adaptable para futuras innovaciones y optimizaciones.

9. Recomendaciones

Para los futuros practicantes en Andercol, se recomienda utilizar el aplicativo “Análisis de procesos” como base para actualizar los estándares de operación. Esto implica visualizar las curvas ideales y las desviaciones encontradas en los procesos. Además, se sugiere desarrollar funciones o modelos predictivos que permitan predecir el comportamiento de las variables en el tiempo y evaluar su impacto en la calidad o la productividad. Estos modelos deben ser tanto predictivos como fenomenológicos, proporcionando herramientas efectivas para anticipar y gestionar las variables de respuesta clave en los procesos industriales.

Referencias

- andercol. (26 de 01 de 2024). Obtenido de <https://andercol.com.co/quienes-somos/>
- BOSCH. (2020). 7. Statistical Process Control SPC. En *Quality Management in the Bosch Group / Technical Statistics Edition 11*. BOSCH.
- change, C. C. (02 de 2024). *SMED - Quick Tool Change*. Obtenido de <https://www.c4change.co.nz/>
- Diamond, S. (2022). *Migrating from a Data Warehouse to a Data Lakehouse*. U.S: John Wiley & Sons, Inc.
- Ebewele, R. O. (2000). *POLYMER SCIENCE AND TECHNOLOGY*. Benin City, Nigeria: CRC Press LLC.
- Fernandez-Granda, C. (2017). *Probability and Statistics for Data Science*. New York: Data Science.
- Héctor René Álvarez Laverde, R. A. (2016). Modelo Estocástico para la eficiencia global de los equipos (OEE): Consideraciones prácticas para su utilización. *Universidad EAN*.
- LACEY, N. (2019). *PYTHON BY EXAMPLE Learning to Program in 150 Challenges*. United Kingdom: Cambridge University.
- Max Mowbray, a. M.-G.-B. (2022). Industrial data science - a review of machine learning applications for chemical and process industries. *ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY*.
- Microsoft. (02 de 2024). Three practical use cases with Azure Databricks Solve your big data and AI Challenges. Medellin.
- Morgan, P. (2016). *DATA ANALYSIS FROM SCRATCH WITH PYTHON*. Davies Company Ebook Converted and Cover by Pixels Studio Published by AI Sciences LLC.
- ODIAN, G. (2004). *PRINCIPLES OF POLYMERIZATION Fourth Edition*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- OPM. (JULY de 2015). *Root Cause Analysis*. Obtenido de OPM.GOV
- Pande, M., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2004). *Las Claves Prácticas de Seis Sigma: Una Guía Dirigida*. McGraw-Hill Interamericana.
- Soustelle, M. (2011). *An Introduction to Chemical Kinetics*. Gran Bretaña y Estados Unidos: ISTE Ltd y John Wiley & Sons.

Upadhyay, S. K. (2006). *Chemical Kinetics and Reaction Dynamics*. Nueva Delhi, India : Anamaya Publishers.

Vahid Mirjalili, S. R. (2019). *Python Machine Learning*. Barcelona: Marcombo.