



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Incremento del caudal de producción de resina PET PCR
mediante el rediseño de los parámetros de materias primas,
procesos y calidad de producto terminado utilizando diseño
experimental.”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS

Presentado por:

Geovanny Patricio Criollo Llumiugsi

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2023

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi directora de proyecto, la MSc. Sofia Anabel López Iglesias, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, y especialmente a mi familia por darme la apoyarme a poder continuar mis estudios.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado con
esfuerzo por varios meses
está dedicado a mis Madre,
Hermana, familiares,
colaboradores y amigos.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Sofia Anabel López I., MSc.
DIRECTORA DE PROYECTO**

**María Laura Retamales G., MSc.
VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Geovanny Patricio Criollo
Llumiugsi

RESUMEN

El presente proyecto, consistió en el incremento del caudal de producción de una planta de descontaminación y peletizado de RESINA PET PCR mediante el diseño de experimentos.

El lugar donde se desarrolla el proyecto es una de las empresas más reconocidas en el mercado de reciclaje y manufactura de RESINAT PET PCR de grado alimentario, la cual surte de materia prima a varias empresas dedicadas a la elaboración de envases que se encuentran en contacto con alimentos de consumo humano. El proceso inicia con el reciclaje de botellas PET PCR las mismas que son almacenadas para posterior ser alimentadas al proceso de Molienda y Lavado, donde serán convertidas en hojuelas o escamas con un mínimo contenido de contaminantes. Estas escamas se convierten en la materia prima del proceso de Descontaminación y Peletizado, donde se descontaminan, se recupera un alto porcentaje de las propiedades físicas y químicas de su estado virgen, es fundido, filtrado, granulado, cristalizado y envasado para el envío a sus clientes.

El objetivo de proyecto es incrementar el caudal promedio de producción que se encuentra en 1176 Kg/h hasta septiembre de 2022, alcanzando el valor nominal declarado por el fabricante de la maquinaria que es 1350 Kg/h. Identificando los factores que influyen sobre la variable de respuesta y sus niveles óptimos de operación mediante la implementación del diseño experimental factorial 3^3 .

Se parte de la identificación de los factores que intervienen en el proceso, desde los factores de calidad de materia prima, hasta factores que influyen en el proceso. Clasificándolos como controlables y no controlables de acuerdo con su naturaleza. Al realizar el análisis a los factores controlables los cuales poseen una data histórica se define que los factores a estudiar son: La cantidad de contaminantes que contiene la materia prima, su densidad y su porcentaje de humedad.

Al finalizar la etapa de experimentación se tiene como resultado que los niveles óptimos de operación de los factores estudiados son: la cantidad de contaminantes debe ser entre 0 ppm y 20 ppm, la densidad mínima de la materia prima debe ser 340 Kg/m^3 y el porcentaje de humedad debe estar entre 0,75% y 0,80%. Para verificar los niveles obtenidos se desarrollan pruebas de verificación, las mismas que arrojan como resultado que el proceso es capaz de alcanzar el valor de caudal nominal declarado por el fabricante e incluso superarlo, alcanzando en promedio un caudal de producción de 1399,9 Kg/h.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL	III
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Descripción de la empresa.....	1
1.2. Descripción del Proceso.....	3
1.3. Justificación.....	5
1.4. Definición del problema.....	7
1.5. Objetivos del proyecto.....	8
1.6. Estructura del proyecto.	8
1.7. Metodología.	9
CAPÍTULO 2	12
2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	12
2.1. Identificación del problema.....	12
2.2. Elección de factores y niveles.	12
2.3. Elección de la variable de respuesta.....	23
2.4. Elección del diseño experimental.....	24
2.5. Desarrollo del experimento.	27
2.6. Análisis de datos.	28
CAPÍTULO 3.....	38
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	38
3.1. Determinación de las condiciones óptimas de los factores de estudio.....	38
3.2. Corridas de verificación.....	39
CAPÍTULO 4	44
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
4.1. Conclusiones.....	44
4.2. Recomendaciones.....	44
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ABREVIATURAS

IV	Viscosidad Intrínseca
PET	Tereftalato de polietileno
PCR	Reciclado post consumo
ISO	Organización Internacional de Normalización
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INVIMA	Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos
EFSA	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
FSSC	Certificación del Sistema de Seguridad Alimentaria

SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
Kg	kilogramos
m ³	Metros cúbicos
TN	Toneladas
dL/g	Decilitro / Gramo
#	Número
%	Porcentaje
ppm	Partes por millón
Kg/h	Kilogramo / Hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de obtencion de escama PET PCR lavada en caliente.....	3
Figura 1.2. Proceso de obtencion de resina PET PCR grado alimentario.	5
Figura 1.2. Producción anual de Resina PET PCR. (Se excluye el año 2021 debido a que la línea no estuvo disponible por un periodo de 3 meses debido a un daño). ..	6
Figura 1.3. Caudal promedio de producción de Resina PET PCR. (Se excluye el año 2021 debido a que la línea no estuvo disponible por un periodo de 3 meses debido a un daño).	6
Figura 1.4. Carta de control de caudal de producción (del 23 al 29 de noviembre 2022)...	7
Figura 2.1. Variables de las etapas del proceso de descontaminación y peletizado.....	12
Figura 2.2 Diagrama Causa Efecto.	14
Figura 2.3 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para densidad de materia prima.	19
Figura 2.4 Resultado de prueba T para una muestra en Minitab para densidad de materia prima.	19
Figura 2.5 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para contaminantes.....	21
Figura 2.6 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para contaminantes.....	21
Figura 2.7 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para porcentaje de humedad.	22
Figura 2.8 Resultado de prueba T para una muestra en Minitab para porcentaje de humedad.	22
Figura 2.9 Elección de diseño experimental.....	24
Figura 2.10 Definición de numero de niveles y repeticiones.....	24
Figura 2.11 Definición de niveles para factores de estudio.	25
Figura 2.12 Software de monitoreo de variables del proceso.....	28
Figura 2.13 Análisis de varianza de los factores estudiados.	31
Figura 2.14 Diagrama de Pareto para los factores de estudio.....	32
Figura 2.15 Gráfica de residuos del error para la variable de respuesta “caudal de salida de producto terminado”.....	35
Figura 2.16 Grafica de probabilidad normal de residuos.	36
Figura 2.17 Grafica de corridas para el residuo.	37
Figura 3.1 Función optimizador de respuesta para Caudal de producción.	38
Figura 3.2 Niveles óptimos para factores de estudio para obtener el valor máximo de la variable de respuesta.	39
Figura 3.3 Grafica de caudal de primera corrida de verificación.....	40
Figura 3.4 Grafica de caudal de segunda corrida de verificación.	40
Figura 3.5 Grafica de caudal de tercera corrida de verificación.....	41
Figura 3.6 Grafica antes – después primera corrida de verificación.	41
Figura 3.7 Grafica antes – después segunda corrida de verificación.....	42
Figura 3.8 Grafica antes – después tercera corrida de verificación.	42
Figura 6.1 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo a la realización de la primera corrida de verificación.....	3
Figura 6.2 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la primera corrida de verificación.....	3
Figura 6.3 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo a la realización de la segunda corrida de verificación.	4
Figura 6.4 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la segunda corrida de verificación.	4

Figura 6.5 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo la realización de la tercera corrida de verificación.	5
Figura 6.6 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la tercera corrida de verificación.	5
Figura 6.7 Sistema de homogenización y alimentación de materia prima con espacio para izado de 8 sacos.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Identificación de factores controlables y no controlables del proceso.....	13
Tabla 2	Determinación y justificación de factores de estudio.	14
Tabla 3	Validación de factores controlables.....	15
Tabla 4	Niveles para los factores de estudio.....	23
Tabla 5	Diseño factorial completo (3 Factores – 3 niveles).	25
Tabla 6	Datos recolectados para análisis.....	28
Tabla 7	Ajuste del modelo.....	32
Tabla 8	Residuos para caudal de producción.	32
Tabla 9	Validación de hipótesis de grafica de corridas para residuo.	36
Tabla 10	Cronograma de corridas de verificación.	39
Tabla 11	Resumen comparación entre corridas de verificación y estado planta previo....	42
Tabla 12	Características de producto terminado antes y después de la mejora.....	43

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES.

1.1. Descripción de la empresa.

El presente proyecto se desarrolla en una empresa nacional de procesamiento de polímeros plásticos tipo PET PCR (Reciclado Post Consumo), la misma que inicio sus operaciones en el año de 1975 como una de las empresas pioneras en el área textil, principalmente en la tintura y enconado de hilos. Con el paso de los años ha venido expandiendo su portafolio de servicios incluyendo en el 2008 una planta de elaboración de productos de limpieza, en el 2012 una planta de procesamiento de botellas PET PCR y una planta de procesamiento de resina PET PCR de grado alimentario. La empresa está comprometida con la calidad de sus productos estando en constante innovación tecnológica y de conocimiento de su recurso humano y certificando sus productos con sellos de calidad como: INEN, ISO, FSSC, FDA, INVIMA, EFSA. Y certificaciones de sus clientes más importantes y reconocidos a nivel mundial como: PEPSICO, COCA COLA, J&J. Lo que le ha dado un reconocimiento a nivel internacional en el mercado de RESINAS PET PCR – GRADO ALIMENTARIO.

La resina PET PCR de Grado Alimentario producida está destinada a mercados internacionales donde la misma ha ganado una alta reputación por su calidad. Y donde ha sido muy bien cotizada sobre todo en regiones donde se ha afianzado la cultura de circularidad, en estas se elaboran botellas destinadas a contener bebidas para consumo humano.

La planta tiene instalada una de las tecnologías más reconocidas en la descontaminación de PET PCR y viene operando desde el año 2012. La línea de producción ha venido incrementando su capacidad en estos últimos años de acuerdo con la necesidad de sus clientes, la cual va creciendo a medida que la sociedad se va concientizando en el uso de materiales reciclados post consumo y adoptando el concepto de circularidad.

El incremento en la producción de RESINA PET PCR ha sido evidente al paso de cada año, esto ha hecho que la planta vaya buscando maneras de alcanzar las especificaciones técnicas de capacidad productiva de su línea, para mantener satisfecha la necesidad de sus clientes además de mantenerse como una de las principales empresas en el sector.

Política de calidad de la empresa.

Ser una empresa especializada en el procesamiento de resina PET PCR de grado alimentario, filamentos sintéticos para aplicaciones textiles e industriales y productos de limpieza con microfibra de poliéster, con altos estándares de calidad que satisfacen las expectativas de los clientes, sustentando en el cumplimiento de los requisitos legales y reglamentarios, con el respaldo tecnológico y un grupo humano capacitado, bajo una estrategia de mejora continua del Sistema de Gestión de la Calidad.

Valores:

Austeridad. - Somos responsables de optimiza todos los recursos que intervienen en nuestros procesos.

Integridad. - Estamos comprometidos a cumplir nuestras labores con el nivel más alto de conducta ética donde quiera que nosotros funcionemos.

Innovación. - Aceptamos los cambios como reto de mejora en todos los niveles, estimulando la creatividad y participación de todos los trabajadores.

Disciplina. - respetamos y cumplimos las leyes, normas, procedimientos e instrucciones dentro de la compañía.

Trabajo en Equipo. - Estamos comprometidos en lograr nuestros objetivos mediante el apoyo y colaboración entre todos.

Descripción de la Operación.

Externa: la operación inicia con las personas que recolectan las botellas en: las calles, hogares, basureros, puntos de recolección, etc. Los mismos que transportan las botellas a los centros de acopio de la empresa para que sean preclasificadas y prensadas en pacas de entre 500 Kg y 1000 Kg. Una vez identificadas y pesadas las pacas son transportadas hacia las instalaciones de la empresa donde serán acopiadas.

Interna: Una vez se reciben las pacas de los centros de acopio son: pesadas, identificadas, caracterizadas e ingresadas al sistema ERP de la empresa, para mantener la trazabilidad del material.

Molienda y Lavado de botellas: En la primera etapa las botellas de PET PCR ingresan a una línea de “Molienda y Lavado” **Figura 1.1**. Donde serán alimentadas las pacas de los centros de acopio de la empresa en mezcla con material que ingresa de proveedores externos que puede ser en pacas como a granel. Mientras el material alimentado a la línea avanza por el proceso se retirarán contaminantes ferromagnéticos, no ferromagnéticos, botellas de colores (verde, ámbar, azul, etc. Solo se procesa botellas transparentes y celestes), polímeros distintos al PET (PVC, PP/PE, Caucho, etc.), material orgánico, vidrio, piedras, etc. a través de maquinaria especializada para cada tarea. Se tritura las botellas en un molino el cual corta las botellas en fragmentos con áreas que van desde 0,001 mm (finos), hasta fragmentos de aproximadamente 20 mm, a este material se lo conoce como “ESCAMA PET PCR”. Las escamas son transportadas por sistemas aerodinámicos para ayudar a retirar fragmentos de etiquetas, las escamas son lavadas en reactores que contienen una mezcla de NaOH, agentes de limpieza, agentes para evitar formación de espuma, agua (Licor de lavado) y temperatura. Al finalizar el lavado son secadas, se realiza una nueva clasificación a la escama previa a ser empacada en maxi sacos de entre 1000 Kg y 1100 Kg. Los cuales son identificados, muestreados y colocados en una zona de transición, mientras el área de control de calidad inspecciona las muestras de cada uno y le asigna una calidad, basada en parámetros de contaminantes y características físicas que presenta cada maxi saco (Lote).

Una vez entregada la RESINA PET PCR a los clientes estos se encargan en un 95% de elaborar botellas de bebidas destinadas para consumo humano, utilizando la resina PET PCR con resina PET virgen a diferentes porcentajes según las características del producto final (botella) necesarias.

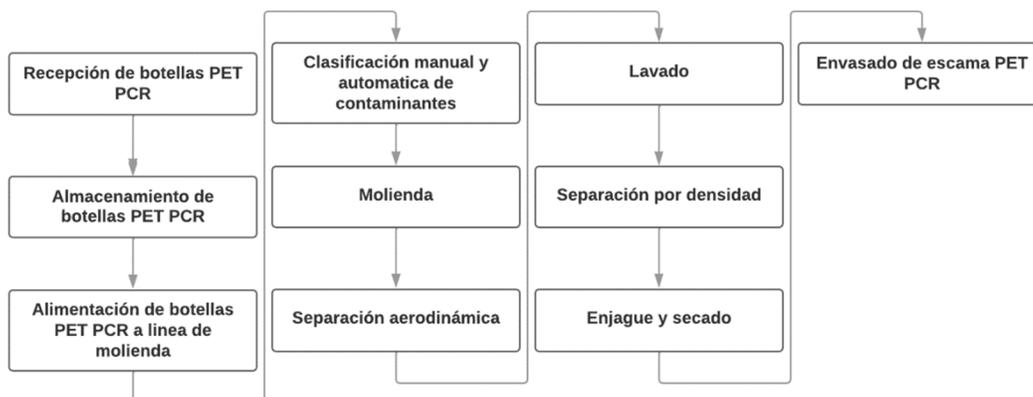


Figura 1.1. Proceso de obtención de escama PET PCR lavada en caliente.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

1.2. Descripción del Proceso.

El proceso de transformación de escamas de PET PCR en pellets o llamada “RESINA PET PCR” de grado alimentario, consta de subprocesos especializados donde se trata de recuperar en un alto porcentaje las características físicas y químicas de una resina PET virgen. Además de darle un grado de inocuidad que se ajuste a los requerimientos de entes de control nacionales e internacionales. Para la elaboración de envases que van a contener alimentos destinados para consumo humano **Figura 1.2.**

Alimentación de escama.

Es la primera etapa del proceso donde se toman los lotes (Maxi sacos) de entre 1000 Kg y 1100 Kg que ya han sido calificados por el área de calidad y autorizados para ser utilizados en el proceso. Los sacos se disponen en parejas en la estación de alimentación donde se disponen aproximadamente 5 lotes por cada hora dependiendo del consumo de la línea.

Descontaminación.

Las escamas alimentadas son ingresadas en reactores de descontaminación, los cuales generan presiones negativas por un periodo de tiempo para elevar la temperatura en su interior y volatilizar los contaminantes adheridos a las escamas. A partir de este proceso el material adquiere la característica conocida como “FOOD GRADE”. Lo que significa que el material es apto para entrar en contacto con alimentos destinados al consumo humano.

Reactor de reconstitución molecular.

Una vez descontaminado el material ingresa a un reactor donde la temperatura se eleva por los 200 °C y en agitación constante, lo cual ayuda, que las cadenas de polímero se regeneren a un porcentaje aproximado de 80% de su estado virgen, principalmente ayudando a elevar la viscosidad intrínseca del material, parámetro fundamental ya que este le dará su grado de resistencia estructural.

Extrusión.

Las escamas son arrastradas por un tornillo sin fin a lo largo de la camisa de extrusión donde se va elevando la temperatura en sus diferentes zonas, para obtener al final de esta una pasta semilíquida que es básicamente el polímero fundido.

Filtrado.

El polímero fundido es filtrado por un juego de filtros de diferente luz de malla donde el diámetro de abertura final es menor a 50 micras (μm). De esta manera se asegura que todos los contaminantes sólidos que pudiesen haber estado en la escama, van a ser retenidos y se asegura el paso únicamente del polímero PET a las siguientes etapas del proceso.

Corte.

Una vez el polímero atraviesa el gabinete de filtrado, atraviesa un dado de extrusión donde se forman hilos (Espaguetis). Los cuales son estirados y enfriados para ser cortados en pellets o gránulos de aproximadamente 2,5 mm de diámetro.

Cristalizado.

Con el fin de estabilizar y recuperar el porcentaje más alto de características del PET virgen, buscando realinear las moléculas y obtener altos grados de cristalinidad y temperatura de fusión. Los gránulos de PET se mantienen a temperaturas por sobre los 150 °C, durante un periodo de tiempo de 20 min dentro de un reactor de cristalización.

Tamizado.

Los gránulos son tamizados para separar los gránulos de tamaños grandes o que por causa de la temperatura han sido deformados o se han formado aglomeraciones de más de 2 gránulos, de igual manera se retiran los gránulos de tamaños pequeños y polvos finos, que se forman por el choque entre gránulos o de los gránulos contra las paredes del sistema de transporte.

Envasado.

Al final los gránulos son empacados en maxi sacos (lotes) de entre 1100 Kg y 1250 Kg, con una funda interna de polietileno de grado alimentario para salvaguardar el grado de inocuidad de la RESINA PET PCR. Una vez empacados los sacos son pesados, identificados, muestreados y sellados hasta que el área de control de calidad les asigne una calidad dependiendo de sus características.

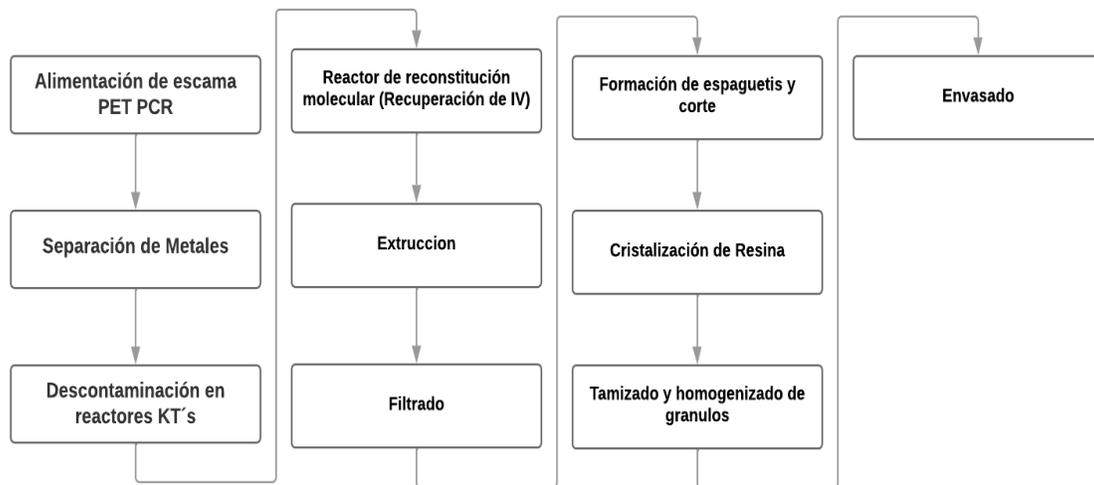


Figura 1.2. Proceso de obtención de resina PET PCR grado alimentario.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

1.3. Justificación.

La adopción de la cultura del reciclaje en países europeos y norte americanos además de la inclusión del concepto de circularidad, han hecho que las industrias busquen la inclusión de materiales reciclados post consumos (PCR) en las mezclas con las que se realizan los envases y empaques para sus productos, de acuerdo con las características de inocuidad de estos.

Sumado a esto se han ido incluyendo leyes y regulaciones locales, regionales e internacionales para la inclusión progresiva de materiales PCR en porcentajes cada vez mayores, buscando ayudar a la reducción del impacto ambiental que generan los polímeros plásticos utilizados para fabricar envases y empaques para distintos productos.

Organismos de control como FDA, EFSA, INVIMA, INEN, entre otros. Han sido los encargados de acreditar y controlar tanto las tecnologías de descontaminación para materiales PCR, así como los productos elaborados con las mismas. Para garantizar que los envases fabricados con estos cumplen con los límites máximos de migración específica, migración global y metales pesados. Dando así la confianza suficiente para que se puedan utilizar estos materiales PCR en la industria alimentaria.

Estas garantías han hecho que la demanda de materias primas PCR, crezca a medida que las reglamentaciones han ido exigiendo a las empresas manufactureras de envases plásticos incrementar el uso de estos, Por lo que cada vez más empresas recicladoras adecuan sus líneas de producción para ser capaces de cubrir esta creciente demanda, aprovechando el máximo porcentaje de capacidad productiva instalada, a través de la implementación de metodologías Lean Manufacturing, análisis de capacidad de procesos, implementación de indicadores de producción, entre otras estrategias que les permita aprovechar al máximo sus tecnologías instaladas.

Dentro de la industria donde se lleva a cabo el presente proyecto, ha sido evidente el incremento de producción anual y de su caudal promedio hora, el mismo que pese a estas tendencias de incremento no llega al nominal declarado por el fabricante de la tecnología.

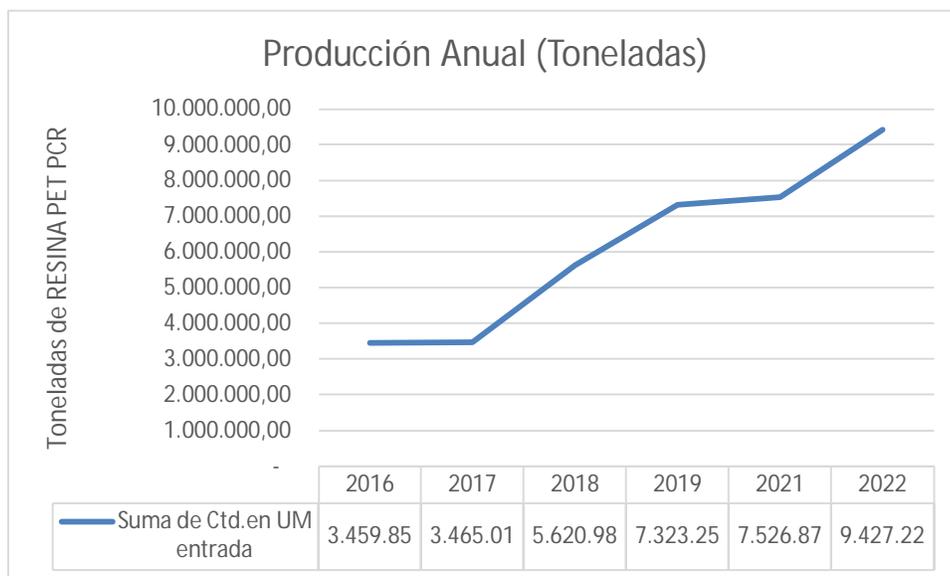


Figura 1.2. Producción anual de Resina PET PCR. (Se excluye el año 2021 debido a que la línea no estuvo disponible por un periodo de 3 meses debido a un daño).

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

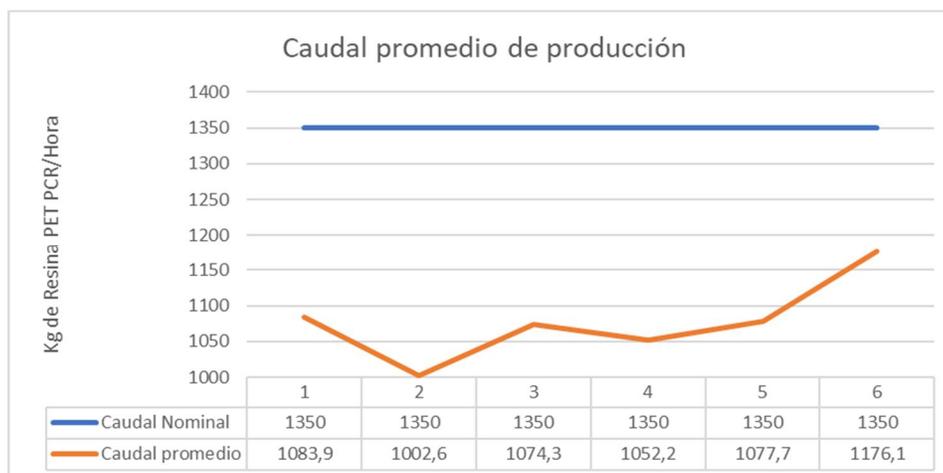


Figura 1.3. Caudal promedio de producción de Resina PET PCR. (Se excluye el año 2021 debido a que la línea no estuvo disponible por un periodo de 3 meses debido a un daño).

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se aprecia en la **Grafica 1.1.** y **Grafica 1.2.** tanto la producción anual como el caudal promedio hora, se han ido incrementando a lo largo de los años desde su implementación. Pero también es necesario medir la variabilidad que este último indicador presenta, por lo cual no se ha podido alcanzar los valores nominales declarados por el fabricante **Grafica 1.3.**

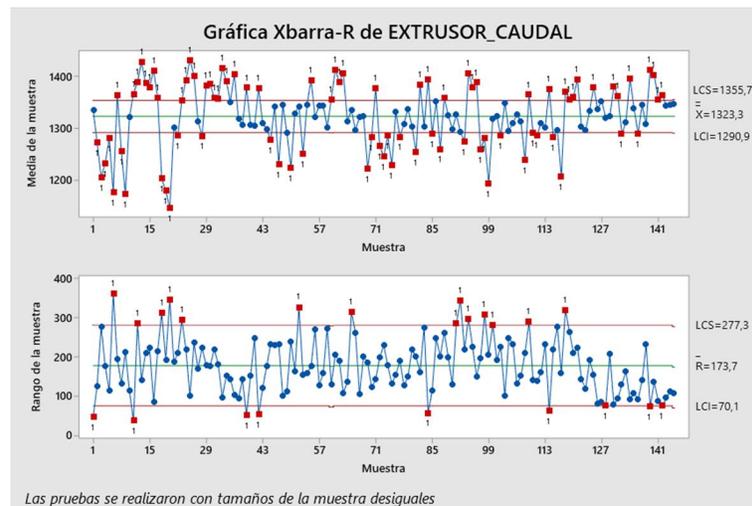


Figura 1.4. Carta de control de caudal de producción (del 23 al 29 de noviembre 2022).

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Esta alta variabilidad presente en la línea de producción es una de las causales que no permite que se llegue a los valores de 1350 Kg/h, siendo que, como se observa en la **Grafica 1.3.** la línea de producción es capaz de llegar a los valores nominales declarados, pero tan solo por periodos cortos de tiempo.

De allí que se da la necesidad de estudiar los fenómenos que favorecen a la línea de producción para poder llegar a sus valores nominales. Poniendo principal énfasis en la materia prima y sus características, siendo que esta tiene recomendaciones de tolerancia para sus parámetros de control y que la materia prima utilizada se encuentra en un 70% rodeando los límites máximos recomendados para contaminantes y límites mínimos para propiedades como densidad, % de humedad y granulometría.

1.4. Definición del problema.

En la planta de descontaminación y peletizado a desde enero de 2016 a septiembre de 2022 alcanzado un caudal promedio anual máximo de 1176 Kg/h, del caudal nominal declarado por el fabricante de la máquina que es de 1350 Kg/h, teniendo una pérdida de 150 Kg/h, lo cual a final de un mes regular de operación significa una pérdida de 100 Toneladas de producto RESINA PET PCR.

1.5. Objetivos del proyecto.

Objetivo General.

Incrementar el caudal de producción en la planta de descontaminación y peletizado de resina PET PCR tomando como referencia el caudal nominal entregado por el fabricante de la maquinaria de 1350 Kg/h, mediante la realización de diseño de experimentos.

Objetivos Específicos.

- Definir el modelo de diseño experimental a utilizar.
- Determinar los factores y que tienen efecto sobre el caudal de producción en la planta de descontaminación y peletizado de resina PET PCR.
- Llevar a cabo el diseño experimental variando los parámetros definidos para su estudio.
- Validar los niveles de operación adecuados para aumentar el caudal de producción.

1.6. Estructura del proyecto.

Incrementar el caudal de producción en la planta de descontaminación y peletizado de resina PET PCR. Tomando como referencia el caudal nominal entregado por el fabricante de la maquinaria, mediante la realización de diseño de experimentos.

En los siguientes capítulos se describirá la metodología, parte experimental y resultados, describiendo desde la parte científica la herramienta elegida en el Capítulo 2.

A continuación, en el Capítulo 3 se evidenciará la información seleccionada de acuerdo con lo expuesto en la justificación del presente proyecto. Procediendo a definir el problema en base a las condiciones actuales del proceso y de las expectativas intrínsecas en los objetivos fijados, respecto a la incapacidad de lograr alcanzar el caudal nominal reportado por el diseñador de la maquinaria.

Previo al desarrollo de la parte experimental se establecerán los parámetros con los cuales se desarrollará el modelo de diseño experimental. Los mismos que a medida que avance la parte experimental serán modificados para registrar las respuestas que estos produzcan en la línea productiva y que se utilizaran para estructurar las conclusiones previo a finalizar el presente proyecto.

El presente proyecto concluye en el Capítulo 4 donde se establecerán los niveles de operación adecuados para los parámetros estudiados, buscando la menor diferencia entre el caudal de producción obtenido y el caudal de producción nominal reportado por el fabricante de la maquinaria.

Por último, el Capítulo 5 recoge las conclusiones y recomendaciones en relación con los resultados obtenidos y los niveles que se esperan poder alcanzar con la aplicación de la herramienta de mejora con respecto al caudal de producción de RESINA PET PCR.

1.7. Metodología.

Mongotmery (2004) afirma que “la introducción formal del diseño experimental en las etapas iniciales del ciclo de desarrollo, en las que se diseñan nuevos productos, se mejoran los diseños de productos existente y se optimizan los procesos de manufactura, suele ser la clave del éxito global del producto. (pág. 569). También define al diseño de experimentos como “la prueba o series de pruebas en las que se hacen cambios intencionales en las variables de entrada de un proceso para poder observar e identificar los cambios correspondientes en la variable de salida”. (pág. 572).

Los datos que se obtienen de experimentos diseñados se pueden utilizar para ajustar modelos empíricos, los cuales son continuos en los parámetros de entrada identificados gracias al enfoque multivariado. Una característica de estos modelos es que pueden predecir aproximadamente los resultados del sistema (por ejemplo, la eficiencia) para configuraciones que no se han probado explícitamente. En este sentido, los experimentos diseñados, aplicados deberían superar a los experimentos de caracterización clásicos, que solo arrojan información sobre un número limitado de puntos operativos (Delbeke O., Laget H., Hollevoet S. y otros, 2022) es por esta razón que en la presente propuesta se busca incrementar la eficiencia del proceso de descontaminación y peletizado.

EL diseño de experimentos constituye una poderosa herramienta de enfoque para la mejora de procesos. Para aplicar este enfoque Mongotmery (2004) especifica que “es necesario que todos los participantes del experimento tengan desde el principio:

- Una idea clara del objetivo del experimento.
- Cuales son exactamente los factores que van a estudiarse.
- Como va a conducirse el experimento.
- Un conocimiento cualitativo de la forma en que se analizaran los datos.

Para llevar a cabo el diseño experimental, el procedimiento recomendado se basa en 7 puntos en los cuales se especifican el orden y la forma de aplicar cada uno para alcanzar los objetivos planteados.

A continuación, se enuncia y describe cada uno de los puntos:

- Identificación del problema.

Mongotmery (2004) afirma lo difícil que es muchas veces el percatarse de que existe un problema que requiere experimentos formales diseñados, lo que dificulta la exposición clara del problema. Es por esto es necesario que se desarrollen ideas del porqué de las causas del problema y de los objetivos que se esperan alcanzar. Para afianzar las posibles causas del problema es necesario que se involucren a todas las áreas y personal involucrados con el proceso, con particular interés sobre las observaciones que puedan dar los operarios involucrados con el proceso, ya que son los más relacionados con el proceso y suelen conocerlo más a fondo teniendo una visión amplia de los factores que lo afectan y que suelen ser ignorados por el resto de involucrados.

- Elección de factores y niveles.

Para establecer los factores y los rangos en que se van a variar para las corridas durante la experimentación, es necesario tener un vasto conocimiento del proceso de forma práctica además de tener una comprensión de teórica. Se debe complementar todo esto con la investigación de los factores que pueden ser importantes y restar importancia a experiencias anteriores, de manera esencial cuando se inicia con la experimentación. “Cuando el objetivo es el tamizado de los factores o caracterización del proceso, suele ser mejor trabajar con un número reducido de niveles de los factores, la mayoría de las veces se utilizan dos niveles” Montgomery (2004).

- Selección de la variable de respuesta.

La principal característica que debe tener la variable de respuesta es que debe asegurar que la información que proporcione es de utilidad para el proceso que se estudia. Se debe tener en cuenta que tanto el promedio como la desviación estándar de la variable o característica medida pueden considerarse como una variable de respuesta. No es de extrañarse que se pueda tener más de una variable de respuesta. Para asegurar los resultados obtenidos es necesario que el instrumento de medida tenga una capacidad adecuada, ya que, si esta es pobre, puede hacer necesario el que se ejecuten más réplicas de la experimentación.

- Elección del diseño experimental.

Al realizar de manera correcta los 3 pasos anteriores, es relativamente sencilla la elección del diseño, “se debe tener en cuenta el tamaño de la muestra (número de replicas), la elección del orden de las corridas en las corridas experimentales” Montgomery (2004). y respetar las restricciones de aleatorización.

- Realización del experimento.

Al desarrollar el experimento debe ponerse singular atención al proceso para validar que las actividades se están realizando de la manera en que fueron planificadas. La incurrancia en cualquier error en la realización del procedimiento experimental destruirá la validez del experimento. Para procesos complejos se suele subestimar los aspectos logísticos y de planeación al correr un experimento diseñado, por lo que se debe poner en primer lugar la planeación.

- Análisis de datos.

Se deben utilizar métodos estadísticos y software especializado para analizar los datos obtenidos, para que tanto los resultados como las conclusiones sean objetivos y no se basen en la apreciación del experimentador. Si se realiza el experimento correctamente desde su diseño hasta su ejecución los métodos estadísticos necesarios no son complicados. Adicional al software especializado utilizado para el análisis de los datos los métodos gráficos ayudan a la interpretación de estos. Es muy importante que se analice los residuales y la verificación de la validez del modelo.

- Conclusiones y recomendaciones

Al finalizar el análisis de datos el experimento debe llegar a soluciones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción, con frecuencia los métodos gráficos ayudan a la presentación de los resultados a otras personas. Adicional se deben realizar corridas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

CAPÍTULO 2

2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.

La metodología implementada para el desarrollo del presente proyecto, parte del análisis de capacidad productiva de la planta de Descontaminación y Peletizado de los últimos 6 años, la bibliografía y manuales técnicos entregados por el fabricante y análisis de datos disponibles. Se parte con la realización de un diseño factorial completo general, donde se consideran a la cantidad de contaminantes, densidad y porcentaje de humedad de la materia prima, como factores de estudio para incrementar el caudal productivo y reducir la variabilidad del proceso.

2.1. Identificación del problema.

Como se ha descrito en el capítulo 1 de este escrito, el problema se encuentra definido de la siguiente manera.

En la planta de descontaminación y peletizado a desde enero de 2016 a septiembre de 2022 alcanzado un caudal promedio anual máximo de 1176 Kg/h, del caudal nominal declarado por el fabricante de la máquina que es de 1350 Kg/h, teniendo una pérdida de 150 Kg/h, lo cual a final de un mes regular de operación significa una pérdida de 100 Toneladas de producto RESINA PET PCR.

2.2. Elección de factores y niveles.

Con ayuda del personal encargado del proceso y la bibliografía (manuales) entregados por el fabricante de la maquinaria. Se establecen los factores (variables o parámetros) en la etapa de alimentación (Materia prima) y en el proceso. Teniendo en cuenta que la variable de respuesta es el caudal de salida de producto terminado (Figura 2.1).

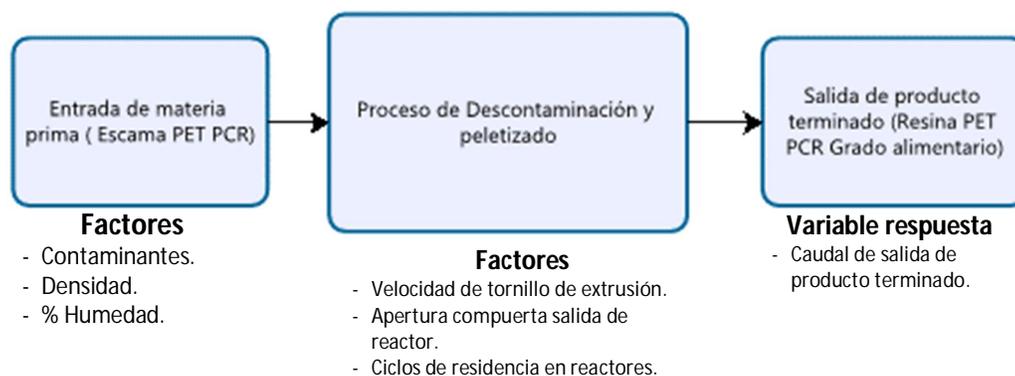


Figura 2.1. Variables de las etapas del proceso de descontaminación y peletizado.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Los factores identificados son clasificados en controlables y no controlables, de acuerdo con la facilidad con que estos se puedan modificar en la materia prima o en el proceso (Tabla 1). Y de los factores clasificados como controlables se establecen los factores o variables de estudio (Tabla 2).

Tabla 1
Identificación de factores controlables y no controlables del proceso.

Etapa	Factor	Clasificación	Justificación
Entrada de materia prima	Cantidad de Contaminantes	Controlable	El área de control de calidad muestrea todos los sacos de materia prima para determinar entre sus controles la cantidad de contaminantes, densidad y % de humedad. De acuerdo con sus resultados se asigna una calidad y posterior se planifica la alimentación de este material al proceso. En caso de que un saco no cumpla con una especificación es separado y reenviado al proceso de molienda y lavado para ser reprocesado, en busca de que el parámetro fuera de especificación sea corregido.
	Densidad	Controlable	
	Porcentaje de Humedad	Controlable	
Proceso de descontaminación y peletizado	Velocidad del tornillo de extrusión	Controlable	La velocidad del tornillo de extrusión se puede controlar o establecer al momento de arrancar el proceso y esta permanece constante hasta que se realice una modificación.
	Apertura de la compuerta de salida del reactor	No controlable	La apertura o cierre de las compuertas que regulan el ingreso de la materia prima, desde los reactores previos al tornillo de extrusión hasta el mismo, es automático y el sistema corrige la apertura o cierre de estas de acuerdo con cantidad de materia prima que se encuentra en el tornillo de extrusión.
	Ciclos de residencia en los reactores	No controlable	Tanto los reactores de descontaminación como el reactor de recuperación de IV calculan automáticamente los ciclos de residencia, temperatura, vacío, velocidad de agitación del material, basados en el nivel que alcanza el material dentro del reactor, como del peso total del reactor con el material y la demanda del material que requiere el tornillo de extrusión.
Salida de producto terminado	Caudal de salida de producto terminado	Variable de respuesta	El caudal actual no cumple con la especificación nominal declarada por el fabricante de la maquinaria.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Tabla 2
Determinación y justificación de factores de estudio.

Etapa	Factor	Clasificación	Justificación
Entrada de materia prima	Cantidad de Contaminantes	Factor de estudio	Teniendo en cuenta la disponibilidad del material tanto en los almacenes como el que va surtiendo el proceso previo de Molienda y Lavado, se puede seleccionar, clasificar y organizar de manera más sencilla la materia prima para llevar a cabo los experimentos necesarios dentro del diseño planteado. Pudiendo monitorear de mejor manera los cambios y resultados que se van obteniendo.
	Densidad	Factor de estudio	
	Porcentaje de Humedad	Factor de estudio	
Proceso de descontaminación y peletizado	Velocidad del tornillo de extrusión	No se va a estudiar.	Al ser un factor del cual dependen un número considerable de variables no controlables del resto de subprocesos. Puede generar una mayor dificultad al identificar las interacciones entre todas las variables. Haciendo que el estudio de esta variable no sea factible en una primera instancia.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Mediante la aplicación de lluvia de ideas con el personal encargado del proceso, se establecen causales por los que los factores de estudio pueden ayudar a incrementar o disminuir el caudal del proceso.



Figura 2.2 Diagrama Causa Efecto.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Validación de factores controlables.

En la **tabla 2** se detalla de forma resumida, el análisis y justificación de cada una de las causas potenciales para que no se alcance el caudal nominal declarado por el fabricante de la maquinaria.

Tabla 3
Validación de factores controlables

Causa Potencial	Posible Efecto	¿Cómo se verifica?	Estado	Resultado / Justificación
Cantidad de materia prima inferior a la requerida en la alimentación.	El personal no alimenta la cantidad necesaria de materia prima para mantener un caudal estable en la maquinaria y alcanzar el caudal nominal declarado por el fabricante.	Se revisan los registros de alimentación de materia prima, además se valida que la balanza del silo de homogenización este calibrada y funcione correctamente	Finalizado	No se considera causa. Los registros de alimentación evidencian que la carga de materia prima es la correcta, además la balanza del silo de homogenización está conectada al sistema de control, en caso de no cumplir con la cantidad de materia prima necesaria suspende la alimentación a los siguientes subprocesos y detiene por completo el proceso general.
Alta variación en valores de densidad.	La alta variabilidad en el tamaño de la escama que conforma la materia prima puede ocasionar que está presente variaciones en su densidad y esto a su vez afectar al flujo ordenado de las escamas dentro de la maquinaria por lo que ocasionaría que, a mayor tamaño de escama, menor densidad, menor cantidad de materia prima dentro de la maquinaria y mayor inestabilidad.	Prueba de hipótesis de la densidad mínima que debe tener la materia prima para ser procesada en la maquinaria. Donde: Ho = El promedio de la densidad de la materia prima, es igual al valor mínimo establecido por el fabricante de la maquinaria. Ha= El promedio de la densidad de la materia prima, es menor al valor mínimo establecido por el fabricante de la maquinaria.	Finalizado	Se considera causa valida. De acuerdo con el resultado de $P=0,000$ de la prueba de hipótesis realizada, se concluye que la densidad de la materia prima es menor a los 340 Kg/m^3 que establece el fabricante. Por lo que se puede considerar como una de las causas para no cumplir con el caudal de producción nominal declarado.

<p>Alta presencia de contaminantes.</p>	<p>La presencia de contaminantes como PVC, METAL, OTROS POLIMEROS, GOMAS y más materiales ajenos al PET. Puede ocasionar que dentro de los subprocesos sucedan efectos adversos como taponamientos, incrustaciones, sobre presiones, sobre calentamientos, entre otros. Que impidan el libre flujo de la materia prima y no permitan llegar al máximo caudal deseado.</p>	<p>Prueba de hipótesis de la cantidad promedio de contaminantes presentes en la materia prima y la cantidad máxima declarada por el fabricante de la maquinaria que se puede alimentar al proceso.</p> <p>Donde:</p> <p>Ho= El promedio de la cantidad de contaminantes presentes en la materia prima es igual al valor máximo de contaminantes que puede tener la materia prima según lo declarado por el fabricante.</p> <p>Ha= El promedio de la cantidad de contaminantes presentes en la materia prima es Mayor al valor máximo de contaminantes que puede tener la materia prima según lo declarado por el fabricante.</p>	<p>Finalizado</p>	<p>Se considera causa valida.</p> <p>De acuerdo con el resultado de $P=0,006$ de la prueba de hipótesis realizada, se concluye que la cantidad de contaminantes presente en la materia prima es mayor a los 40 ppm que establece el fabricante, como límite máximo para el parámetro de contaminantes que puede procesar la maquinaria.</p>
<p>Alto Contenido de humedad del material.</p>	<p>La cantidad de agua contenida en la materia prima puede incrementar su peso y densidad. Al ser calentada la materia prima por sobre los 100 °C en el primer subproceso se libera este exceso de agua, disminuyendo la cantidad de materia prima útil para ser procesada dentro de la maquinaria, reduciendo el caudal de producción</p>	<p>Prueba de hipótesis del porcentaje promedio de humedad presente en la materia prima y el valor promedio de porcentaje de humedad declarada por el fabricante de la maquinaria.</p> <p>Donde:</p> <p>Ho= El porcentaje promedio de la humedad contenida en la materia prima es diferente al valor promedio de porcentaje de humedad que puede tener la materia prima según lo declarado por el fabricante.</p> <p>Ha= El porcentaje promedio de la humedad contenida en la materia prima es mayor al valor promedio de porcentaje de humedad que puede tener la materia prima</p>	<p>Finalizado</p>	<p>Se considera causa valida.</p> <p>De acuerdo con el resultado de $P=0,000$ de la prueba de hipótesis realizada, se concluye que el porcentaje promedio de humedad presente en la materia prima es diferente al 80% que establece el fabricante, como valor recomendado para el parámetro de porcentaje de humedad que puede contener la materia prima.</p>

		según lo declarado por el fabricante.		
Demasiados proveedores externos de materia prima con parámetros de calidad distintos	Pese a procesar su propia materia prima, la empresa compra frecuentemente materia prima de proveedores externos tanto nacionales como extranjeros. Esta alta cantidad de proveedores y materias primas puede afectar a la densidad, cantidad de contaminantes y porcentaje de humedad.	Revisar la cantidad de contaminantes, valores de densidad y porcentaje de humedad con que se recibe la materia prima de proveedores externos.	Finalizado	No se considera causa. Las materias primas externas que se reciben en la empresa no son alimentadas de forma directa, estas son ingresadas a la planta de "Molienda y Lavado" donde se dosifica a cantidades que permitan obtener las características de calidad deseada.
Cantidad de humedad relativa de la zona donde está ubicada la planta.	Al estar ubicada la empresa en un valle donde se puede tener variaciones en la humedad relativa del ambiente, es posible que esta humedad pueda ser transferida a la materia prima al momento de ser alimentada o mientras esta se encuentra en las bodegas de almacenamiento.	Controles de porcentaje de humedad presente en la escama, verificación del estado de almacenamiento y valores de humedad relativa de la zona donde se encuentra ubicada la empresa.	Finalizado	No se considera causa. Si bien la zona donde se encuentra la empresa tiende a tener humedades relativas entre 30% y 96%, las condiciones de almacenamiento garantizan que la materia prima no se encuentre en contacto con la misma por tiempos prolongados, sumado a esto la materia prima se encuentra almacenada en maxi sacos de aproximadamente 1.1 Tn, los mismos que una vez envasados son serrados y no permiten el contacto de la materia prima con el medio ambiente.

Contaminación cruzada con elementos de bodega.	Puede existir la adición de contaminantes adicionales a los detectados por los muestreos de controles de calidad. En el momento en que se encuentra adicionando la materia prima a las tolvas de alimentación o durante su transporte por las cañerías aerodinámicas.	Revisión en la planta de la metodología de alimentación de materia prima, los controles de limpieza y mantenimiento de las tolvas de alimentación y zonas aledañas.	Finalizado	<p>No se considera causa.</p> <p>La empresa al estar certificado con sello de calidad ISO 9001:2015 y en proceso de certificación de FSSC 22000. Tiene detallados y divulgados con sus operarios los procedimientos para el transporte, almacenamiento y alimentación de los sacos de materia prima.</p> <p>Dentro del sistema de transporte aerodinámico, se encuentra incluido dentro de los procedimientos de mantenimiento y control para arranque de producción. Para finalizar la planta se encuentra aislada del resto de la empresa por lo que no se puede ver afectada por contaminantes de trabajos realizados en otras áreas de la planta.</p>
---	---	---	-------------------	--

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Prueba de hipótesis para validación de densidad como factor de incidencia en el proceso.

Para dar como válido o no el supuesto de que la densidad, la cantidad de contaminantes y porcentaje de humedad de la materia prima es un factor de incidencia en el caudal de producción del proceso de “Descontaminación y Peletizado”, se realiza una prueba de hipótesis mediante la utilización de un paquete estadístico (minitab) con la herramienta “T de una muestra”. Debido a que se desconoce la desviación estándar del proceso, pero se tiene el valor de la media hipotética entregada por el fabricante de la maquinaria.

Prueba T de una muestra.

Se toma la data de análisis de densidad, cantidad de contaminantes y porcentaje de humedad de los controles de materias primas del área de calidad desde el mes de enero 2022 hasta julio 2022. De donde se obtienen los siguientes datos.

Para la densidad:

Número de muestras:

N= 665 datos

Valor promedio de densidad de materia prima entregado por el fabricante de la maquinaria:

$$\rho = 340 \text{ Kg/m}^3$$

Resultados:

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar	Límite superior de media 95% para μ
665	331,749	16,363	0,635	332,794

 *μ : media de Densidad***Figura 2.3 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para densidad de materia prima.**

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

PruebaHipótesis nula $H_0: \mu = 340$ Hipótesis alterna $H_1: \mu < 340$

Valor T	Valor p
-13,00	0,000

Figura 2.4 Resultado de prueba T para una muestra en Minitab para densidad de materia prima.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Dado que la hipótesis planteada es:

$$H_0 = \mu = 340$$

$$H_1 = \mu < 340$$

Donde el μ es el valor promedio de densidad de la materia prima. H_0 supone que el promedio de la densidad de la materia prima es igual al valor promedio establecido por el fabricante de la maquinaria. H_1 supone la alternativa de que el valor promedio de la densidad de la materia prima es menor al valor establecido por el fabricante de la maquinaria.

Con el valor de $P=0.000$, se rechaza H_0 , es decir que el valor promedio de la densidad de la materia prima alimentada no es igual al valor establecido por el fabricante de la maquinaria, por el contrario, al establecer H_1 con μ menor que 340 Kg/m^3 . Se valida que el valor promedio de densidad de la materia prima es menor al recomendado por el fabricante de la maquinaria. Por lo tanto, se considera como un factor de estudio en el proceso de "Descontaminación y Peletizado".

Para la cantidad de contaminantes:

Número de muestras:

$N= 665$ datos

Valor promedio de contaminantes presentes en la materia prima entregado por el fabricante de la maquinaria:

Contaminantes = 40 ppm

Tipos de materiales considerados como contaminantes:

PVC = Policloruro de Vinilo

PP/PE = Polipropileno / Polietileno

Caucho = Materiales vulcanizados de uso variado.

Metal = Metales ferromagnéticos y no ferromagnéticos con puntos de fusión mayores a 200°C (estaño, aluminio, cobre, aleaciones, etc.)

Celulosa y Orgánicos = Restos de madera, papel, cartón, etiquetas y otros compuestos de origen orgánico.

Gomas.

Vidrio.

Otros plásticos = Polímeros de ingeniería o de manufactura especial que presentan propiedades similares a las del PET, pero químicamente incompatibles.

Resultados:

Estadísticas descriptivas

			Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
<u>N</u>	<u>Media</u>	<u>Desv.Est.</u>		
665	45,71	58,24	2,26	41,99

μ : media de Contaminantes

Figura 2.5 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para contaminantes.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 40$

Hipótesis alterna $H_1: \mu > 40$

Valor T	Valor p
2,53	0,006

Figura 2.6 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para contaminantes.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Dado que la hipótesis planteada es:

$$H_0 = \mu = 40$$

$$H_1 = \mu > 40$$

Donde el μ es el valor promedio de la cantidad de contaminantes que tiene la materia prima. H_0 supone que el promedio de la cantidad de contaminantes de la materia prima es igual al valor máximo establecido por el fabricante de la maquinaria. H_1 supone la alternativa de que el valor promedio de la cantidad de contaminantes de la materia prima es mayor al valor establecido por el fabricante de la maquinaria.

Con el valor de $P=0.006$, se rechaza H_0 , es decir que el valor promedio de la cantidad de contaminantes de la materia prima alimentada no es igual al valor establecido por el fabricante de la maquinaria, por el contrario, al establecer H_1 con μ mayor que 40 ppm. Y se valida que el valor promedio de la cantidad de contaminantes de la materia prima es mayor al recomendado por el fabricante

Para porcentaje de Humedad:

Número de muestras:

$$N= 665 \text{ datos}$$

Valor promedio de contaminantes presentes en la materia prima entregado por el fabricante de la maquinaria:

$$\%H = 0.80\%$$

Resultados:

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de	
			la media	IC de 95% para μ
665	0,007920	0,000535	0,000021	(0,007880; 0,007961)

μ : media de Humedad

Figura 2.7 Estadística descriptiva de la prueba T de Minitab para porcentaje de humedad.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0,008$

Hipótesis alterna $H_1: \mu \neq 0,008$

Valor T Valor p

-3,84 0,000

Figura 2.8 Resultado de prueba T para una muestra en Minitab para porcentaje de humedad.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Dado que la hipótesis planteada es:

$$H_0 = \mu = 0.008$$

$$H_1 = \mu \neq 0.008$$

Donde el μ es el porcentaje promedio de humedad de la materia prima. H_0 supone que el porcentaje promedio de humedad de la materia prima es igual al valor promedio establecido por el fabricante de la maquinaria. H_1 supone la alternativa de que el porcentaje promedio de humedad de la materia prima es menor al valor establecido por el fabricante de la maquinaria.

Con el valor de $P=0.000$, se rechaza H_0 , es decir que el porcentaje promedio de humedad de la materia prima alimentada no es igual al valor establecido por el fabricante de la maquinaria, por el contrario, al establecer H_1 con μ distinto a 0.80%. Se valida que el porcentaje promedio de humedad de la materia prima es diferente al recomendado por el fabricante de la maquinaria. Por lo tanto, es considerado como un factor de estudio en el proceso de "Descontaminación y Peletizado".

Elección de niveles para los factores de estudio.

En la tabla 1 donde se detalla el plan de verificación de causas, se establece que, los parámetros densidad, cantidad de contaminantes y porcentaje de humedad son factores considerados para la experimentación.

En referencia al primer factor “Densidad” el tamaño de las escamas de que es la presentación que tiene la materia prima, puede ocasionar que una misma masa de material pueda ocupar diferentes volúmenes, lo cual hace que los niveles de los reactores sean variables provocando inestabilidad en el proceso lo cual se ve reflejado en el caudal de producción.

El segundo factor la “Cantidad de contaminantes”, la presencia de materiales que sufren transformaciones como calcinación, reducción de tenacidad, emplastamiento y otros que no sufren cambios al ser expuestos a las temperaturas a las que se funde el PET. Generan taponamientos principalmente en las unidades de filtrado y otras, donde se ve interrumpido el libre paso de materia prima lo que provoca contra corrientes de caudal, incrementos en la temperatura y diferenciales de presión, que la maquinaria al intentar estabilizar reduce el caudal de producción para normalizar el proceso.

Por último, tenemos la cantidad de agua o “Porcentaje de humedad” contenido en la materia prima. El cual ocasiona que se afecte directamente el peso del material, provocando variaciones en las cargas de los reactores mismos que se basan en el peso y nivel de llenado para generar el movimiento sus sistemas de homogenización internos, así como el tiempo de residencia dentro de los mismos.

Tabla 4
Niveles para los factores de estudio

Factor de estudio	Niveles		
	1	2	3
Densidad (Kg/m ³)	270 - 315	316 - 340	341 - 400
Cantidad de contaminantes (ppm)	0 - 20	21 - 50	51 - 500
% Humedad	0.40% - 0.74%	0.75% - 0.80%	0.81% - 1.0%

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

2.3. Elección de la variable de respuesta.

La validación del impacto que tiene sobre el proceso cada uno de los factores seleccionados, se hará a través del seguimiento al caudal de salida del producto terminado y de su desviación estándar. Para así verificar si durante la experimentación se logra incrementar el caudal de salida de producto terminado y disminuir su desviación estándar, lo que indicaría que el proceso es más estable y cumple con el caudal nominal declarado por el fabricante de este.

2.4. Elección del diseño experimental.

Para el desarrollo del experimento se planteó; un diseño factorial completo general, que permite el análisis de factores con más de 2 niveles y de todas las combinaciones de acuerdo con los niveles y factores establecidos. Para el problema planteado se estable un diseño con 3 factores de estudio que son: cantidad de contaminantes, densidad y porcentaje de humedad (figura 2.9).

Crear diseño factorial

Tipo de diseño

- Factorial de 2 niveles (generadores predeterminados) (de 2 a 15 factores)
- Factorial de 2 niveles (especificar generadores) (de 2 a 15 factores)
- Diseño de parcelas divididas de 2 niveles (factores difíciles de cambiar) (de 2 a 7 factores)
- Diseño de Plackett-Burman (de 2 a 47 factores)
- Diseño factorial completo general (de 2 a 15 factores)

Número de factores:

Mostrar diseños disponibles...

Diseños... Factores...

Opciones... Resultados...

Ayuda Aceptar Cancelar

Figura 2.9 Elección de diseño experimental.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Se establecen además 3 niveles y 3 repeticiones (Figura 2.10) para cada uno de los factores de estudio establecidos, los rangos que comprenden cada nivel se plantean de acuerdo con las especificaciones que entrega el fabricante del equipo para su operación y las características de la materia prima que se surten desde el proceso de molienda y lavado (Figura 2.11).

Crear diseño factorial: Diseños

Factor	Nombre	Número de niveles
A	CONTAMINANTES	3
B	DENSIDAD	3
C	HUMEDAD	3

Número de réplicas:

Bloque en réplicas

Ayuda Aceptar Cancelar

Figura 2.10 Definición de numero de niveles y repeticiones

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Crear diseño factorial

Crear diseño factorial: Factores

Factor	Nombre	Tipo	Niveles	Valores de nivel		
A	CONTAMINA	Texto	3	1	2	3
B	DENSIDAD	Texto	3	1	2	3
C	HUMEDAD	Texto	3	1	2	3

Ayuda Aceptar Cancelar

Figura 2.11 Definición de niveles para factores de estudio.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

El paquete estadístico plantea 81 combinaciones para a cantidad de niveles y factores seleccionados, estos ayudaran a establecer si los factores a estudiar y sus respectivos niveles se encuentran ligados directamente a la variable de respuesta definida.

Tabla 5
Diseño factorial completo (3 Factores – 3 niveles).

Orden Est.	Orden Corrida	Tipo Pt	Bloques	CONTAMINANTES	DENSIDAD	HUMEDAD
60	1	1	1	1	2	3
63	2	1	1	1	3	3
6	3	1	1	1	2	3
46	4	1	1	3	1	1
36	5	1	1	1	3	3
75	6	1	1	3	1	3
12	7	1	1	2	1	3
66	8	1	1	2	1	3
21	9	1	1	3	1	3
45	10	1	1	2	3	3
16	11	1	1	2	3	1
77	12	1	1	3	2	2
44	13	1	1	2	3	2
57	14	1	1	1	1	3
19	15	1	1	3	1	1
35	16	1	1	1	3	2
56	17	1	1	1	1	2
69	18	1	1	2	2	3
33	19	1	1	1	2	3
9	20	1	1	1	3	3
20	21	1	1	3	1	2
3	22	1	1	1	1	3
7	23	1	1	1	3	1

4	24	1	1	1	2	1
73	25	1	1	3	1	1
68	26	1	1	2	2	2
1	27	1	1	1	1	1
22	28	1	1	3	2	1
14	29	1	1	2	2	2
17	30	1	1	2	3	2
53	31	1	1	3	3	2
58	32	1	1	1	2	1
47	33	1	1	3	1	2
51	34	1	1	3	2	3
72	35	1	1	2	3	3
23	36	1	1	3	2	2
81	37	1	1	3	3	3
15	38	1	1	2	2	3
64	39	1	1	2	1	1
55	40	1	1	1	1	1
80	41	1	1	3	3	2
50	42	1	1	3	2	2
31	43	1	1	1	2	1
54	44	1	1	3	3	3
40	45	1	1	2	2	1
25	46	1	1	3	3	1
32	47	1	1	1	2	2
41	48	1	1	2	2	2
11	49	1	1	2	1	2
30	50	1	1	1	1	3
34	51	1	1	1	3	1
39	52	1	1	2	1	3
27	53	1	1	3	3	3
79	54	1	1	3	3	1
61	55	1	1	1	3	1
5	56	1	1	1	2	2
48	57	1	1	3	1	3
29	58	1	1	1	1	2
28	59	1	1	1	1	1
76	60	1	1	3	2	1
26	61	1	1	3	3	2
38	62	1	1	2	1	2
10	63	1	1	2	1	1
2	64	1	1	1	1	2
42	65	1	1	2	2	3
67	66	1	1	2	2	1

24	67	1	1	3	2	3
65	68	1	1	2	1	2
13	69	1	1	2	2	1
8	70	1	1	1	3	2
78	71	1	1	3	2	3
43	72	1	1	2	3	1
37	73	1	1	2	1	1
59	74	1	1	1	2	2
18	75	1	1	2	3	3
49	76	1	1	3	2	1
52	77	1	1	3	3	1
70	78	1	1	2	3	1
71	79	1	1	2	3	2
74	80	1	1	3	1	2
62	81	1	1	1	3	2

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

2.5. Desarrollo del experimento.

A partir del 3 de septiembre de 2022 da inicio la etapa experimental, para lo cual se inicia seleccionando la materia prima y organizándola de acuerdo con las combinaciones establecidas por el paquete estadístico seleccionado (81 combinaciones). Debido a que el proceso es continuo y la disponibilidad de materia para cumplir con las combinaciones establecidas por el programa, los experimentos se desarrollan en un periodo de tiempo de 70 días. El desarrollo de los experimentos se realiza teniendo en cuenta que una vez alimentada la materia prima al proceso se requiere tiempos prolongados de residencia en los diferentes subprocesos hasta que esta sale transformada en gránulos de RESINA PET PCR.

La toma de datos se realiza mediante el software propio de la maquinaria, el cual toma datos en tiempo real de variables definidas por el fabricante dentro de las cuales se encuentra la variable de respuesta establecida para este proyecto, todos los datos registrados son almacenados en la memoria del programa y se pueden extraer los valores al paquete estadístico seleccionado para su respectivo análisis.

La duración de cada uno de los experimentos fue de aproximadamente 4 horas, la materia prima se alimenta al proceso con 5 horas de anticipación debido al tiempo que demora el proceso en transformar las ESCAMAS DE PET PCR en GRANULOS DE RESINA PET PCR DE GRADO ALIMENTARIO. Una vez concluida la experimentación se descarga la data del software de control para proceder a su análisis (Figura 2.12).

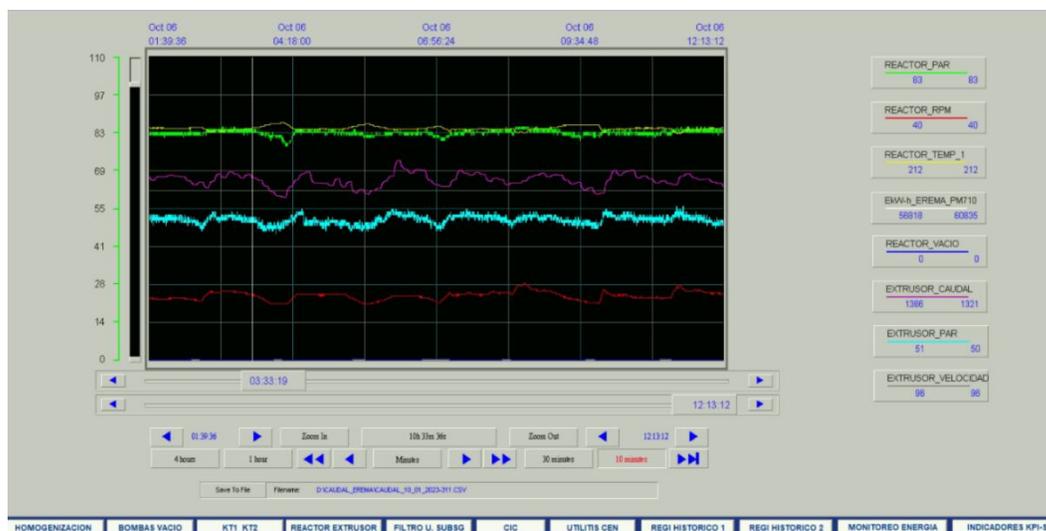


Figura 2.12 Software de monitoreo de variables del proceso.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

2.6. Análisis de datos.

Una vez concluida la etapa de experimentación se elabora la data con la cual se llevará a cabo el análisis de los datos obtenidos (Tabla 6). Haciendo uso del paquete estadístico seleccionado se procede a realizar el análisis del diseño escogido.

Tabla 6
Datos recolectados para análisis.

Orden Est.	Orden Corrida	CONTAMINANTES (ppm)	DENSIDAD (Kg/m ³)	HUMEDAD (%)	CAUDAL (Kg/h)
60	1	1	1	1	2
63	2	1	1	1	3
6	3	1	1	1	2
46	4	1	1	3	1
36	5	1	1	1	3
75	6	1	1	3	1
12	7	1	1	2	1
66	8	1	1	2	1
21	9	1	1	3	1
45	10	1	1	2	3
16	11	1	1	2	3

77	12	1	1	3	2
44	13	1	1	2	3
57	14	1	1	1	1
19	15	1	1	3	1
35	16	1	1	1	3
56	17	1	1	1	1
69	18	1	1	2	2
33	19	1	1	1	2
9	20	1	1	1	3
20	21	1	1	3	1
3	22	1	1	1	1
7	23	1	1	1	3
4	24	1	1	1	2
73	25	1	1	3	1
68	26	1	1	2	2
1	27	1	1	1	1
22	28	1	1	3	2
14	29	1	1	2	2
17	30	1	1	2	3
53	31	1	1	3	3
58	32	1	1	1	2
47	33	1	1	3	1
51	34	1	1	3	2
72	35	1	1	2	3
23	36	1	1	3	2
81	37	1	1	3	3
15	38	1	1	2	2
64	39	1	1	2	1
55	40	1	1	1	1
80	41	1	1	3	3
50	42	1	1	3	2
31	43	1	1	1	2
54	44	1	1	3	3
40	45	1	1	2	2
25	46	1	1	3	3
32	47	1	1	1	2
41	48	1	1	2	2
11	49	1	1	2	1
30	50	1	1	1	1
34	51	1	1	1	3
39	52	1	1	2	1
27	53	1	1	3	3
79	54	1	1	3	3

61	55	1	1	1	3
5	56	1	1	1	2
48	57	1	1	3	1
29	58	1	1	1	1
28	59	1	1	1	1
76	60	1	1	3	2
26	61	1	1	3	3
38	62	1	1	2	1
10	63	1	1	2	1
2	64	1	1	1	1
42	65	1	1	2	2
67	66	1	1	2	2
24	67	1	1	3	2
65	68	1	1	2	1
13	69	1	1	2	2
8	70	1	1	1	3
78	71	1	1	3	2
43	72	1	1	2	3
37	73	1	1	2	1
59	74	1	1	1	2
18	75	1	1	2	3
49	76	1	1	3	2
52	77	1	1	3	3
70	78	1	1	2	3
71	79	1	1	2	3
74	80	1	1	3	1
62	81	1	1	1	3

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

El análisis del diseño experimental seleccionado nos da dentro de sus resultados el análisis de varianzas de los factores de estudio así como de las interacciones entre sí. De este análisis se valida con el valor p tanto de los factores como de sus interacciones, influencia de estos en el proceso para el objetivo planteado de alcanzar el caudal nominal declarado por el fabricante de la maquinaria (Figura 2.13).

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	26	113238	4355,3	5,77	0,000
Lineal	6	83264	13877,4	18,40	0,000
CONTAMINANTES	2	31507	15753,5	20,89	0,000
DENSIDAD	2	42570	21284,9	28,22	0,000
HUMEDAD	2	9187	4593,7	6,09	0,004
Interacciones de 2 términos	12	11915	992,9	1,32	0,237
CONTAMINANTES*DENSIDAD	4	6298	1574,4	2,09	0,095
CONTAMINANTES*HUMEDAD	4	5068	1266,9	1,68	0,168
DENSIDAD*HUMEDAD	4	549	137,3	0,18	0,947
Interacciones de 3 términos	8	18059	2257,4	2,99	0,008
CONTAMINANTES*DENSIDAD*HUMEDAD	8	18059	2257,4	2,99	0,008
Error	54	40728	754,2		
Total	80	153966			

Figura 2.13 Análisis de varianza de los factores estudiados.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se puede validar en la (Figura 2.13) de acuerdo con los valores p de los factores estudiados y con la hipótesis de:

H_0 = El factor no tiene influencia sobre el caudal de producción

Vs

H_1 = El factor tiene influencia sobre el caudal de producción

Se puede afirmar que con un valor p de 0,000, los factores de estudio: Cantidad de contaminantes, densidad, porcentaje de humedad y la interacción de las 3 variables tienen una influencia directa sobre la variable de respuesta ya que el valor p es inferior a 0,05. Mientras las interacciones de los factores: cantidad de contaminantes y densidad, cantidad de contaminantes y porcentaje de humedad, densidad y porcentaje de humedad al tener valores p de 0,095; 0,168 y 0,947 respectivamente no muestran tener una influencia sobre la variable de respuesta, ya que estos son superiores a 0,05.

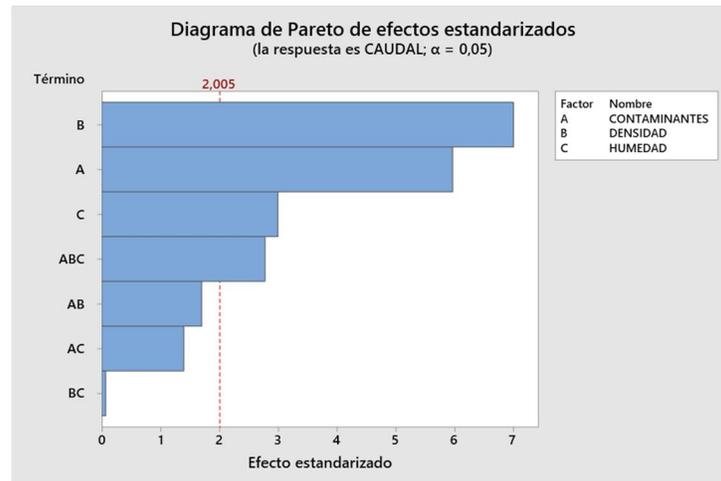


Figura 2.14 Diagrama de Pareto para los factores de estudio.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se aprecia en el diagrama de Pareto de la figura 2.14 es evidente la influencia que tiene cada uno de los factores estudiados en la variable de respuesta. Afirmando que tanto la densidad de la materia prima como la cantidad de contaminantes que esta tiene pueden influir en el caudal de salida de producto terminado.

Ajuste de modelo de datos

Tabla 7
Ajuste del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad.(pred)
27,4630	73,55%	60,81%	40,48%

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

El valor de R^2 ajustado de la tabla 7, indica que el modelo propuesto explica el 60.81% de la variabilidad en la variable de respuesta, siendo este un porcentaje aceptable.

Los residuos del caudal (tabla 8) son analizados para determinar su normalidad y aleatoriedad, lo cual ayudara a validar los datos obtenidos con el diseño experimental.

Tabla 8
Residuos para caudal de producción.

Orden Est.	Orden Corrida	CONTAMINANTES (ppm)	DENSIDA D (Kg/m ³)	HUMEDA D (%)	CAUDA L (Kg/h)	Residuo s
60	1	1	2	3	1329,67	24,2625
63	2	1	3	3	1371,42	-5,1000
6	3	1	2	3	1304,91	-0,5000
46	4	3	1	1	1355,46	35,5333

36	5	1	3	3	1364,42	-12,1000
75	6	3	1	3	1222,14	4,0583
12	7	2	1	3	1330,61	33,6750
66	8	2	1	3	1275,49	-21,4500
21	9	3	1	3	1229,59	11,5083
45	10	2	3	3	1312,63	-14,8583
16	11	2	3	1	1356,39	0,3958
77	12	3	2	2	1284,70	-18,3708
44	13	2	3	2	1363,31	10,6875
57	14	1	1	3	1268,86	-22,3125
19	15	3	1	1	1315,56	-4,3667
35	16	1	3	2	1396,63	9,8375
56	17	1	1	2	1323,31	8,7333
69	18	2	2	3	1281,96	-12,5375
33	19	1	2	3	1281,65	-23,7625
9	20	1	3	3	1393,72	17,2000
20	21	3	1	2	1266,47	-11,2875
3	22	1	1	3	1310,04	18,8625
7	23	1	3	1	1322,72	-35,3458
4	24	1	2	1	1332,80	-5,7542
73	25	3	1	1	1288,76	-31,1667
68	26	2	2	2	1327,20	8,8833
1	27	1	1	1	1250,42	-21,6458
22	28	3	2	1	1284,58	37,6292
14	29	2	2	2	1297,22	-21,0917
17	30	2	3	2	1392,88	40,2500
53	31	3	3	2	1331,74	10,1458
58	32	1	2	1	1324,51	-14,0417
47	33	3	1	2	1256,53	-21,2375
51	34	3	2	3	1292,28	24,9958
72	35	2	3	3	1335,28	7,7917
23	36	3	2	2	1316,69	13,6167
81	37	3	3	3	1257,34	-14,8083
15	38	2	2	3	1261,08	-33,4250
64	39	2	1	1	1317,89	30,8292
55	40	1	1	1	1280,75	8,6792
80	41	3	3	2	1272,16	-49,4292
50	42	3	2	2	1307,83	4,7542
31	43	1	2	1	1358,35	19,7958
54	44	3	3	3	1270,88	-1,2708
40	45	2	2	1	1275,14	-38,3208
25	46	3	3	1	1319,80	11,9500
32	47	1	2	2	1292,86	-19,1792

41	48	2	2	2	1330,53	12,2083
11	49	2	1	2	1302,75	8,6500
30	50	1	1	3	1294,63	3,4500
34	51	1	3	1	1371,42	13,3542
39	52	2	1	3	1284,71	-12,2250
27	53	3	3	3	1288,22	16,0792
79	54	3	3	1	1286,05	-21,8000
61	55	1	3	1	1380,06	21,9917
5	56	1	2	2	1310,84	-1,2042
48	57	3	1	3	1202,51	-15,5667
29	58	1	1	2	1322,29	7,7083
28	59	1	1	1	1285,04	12,9667
76	60	3	2	1	1246,34	-0,6083
26	61	3	3	2	1360,88	39,2833
38	62	2	1	2	1301,19	7,0875
10	63	2	1	1	1249,53	-37,5333
2	64	1	1	2	1298,14	-16,4417
42	65	2	2	3	1340,46	45,9625
67	66	2	2	1	1343,90	30,4417
24	67	3	2	3	1218,54	-48,7417
65	68	2	1	2	1278,36	-15,7375
13	69	2	2	1	1321,34	7,8792
8	70	1	3	2	1384,74	-2,0500
78	71	3	2	3	1291,03	23,7458
43	72	2	3	1	1328,56	-27,4292
37	73	2	1	1	1293,76	6,7042
59	74	1	2	2	1332,42	20,3833
18	75	2	3	3	1334,55	7,0667
49	76	3	2	1	1209,92	-37,0208
52	77	3	3	1	1317,70	9,8500
70	78	2	3	1	1383,03	27,0333
71	79	2	3	2	1301,69	-50,9375
74	80	3	1	2	1310,29	32,5250
62	81	1	3	2	1379,00	-7,7875

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

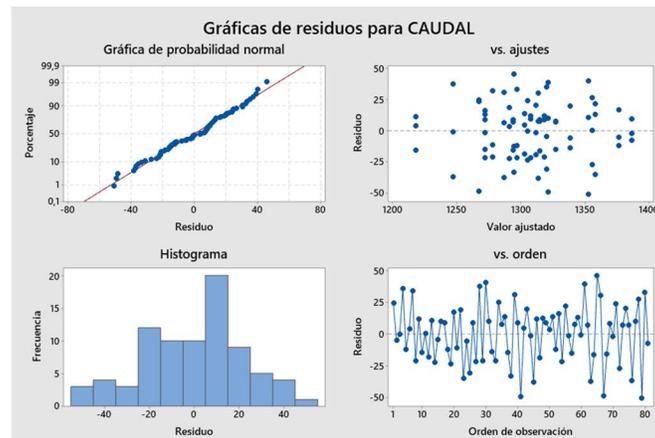


Figura 2.15 Gráfica de residuos del error para la variable de respuesta “caudal de salida de producto terminado”.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se aprecia en la gráfica superior izquierda de la figura 2.15 el residuo de las observaciones se ajusta a la línea recta. Con lo que se puede verificar que el residuo cumple con la normalidad, se puede afirmar esto con la figura 2.16 donde podemos verificar que el valor p es mayor a 0,05 siendo este de 0,286 por lo que no se rechaza la hipótesis nula definida de la siguiente manera.

H_0 = Los residuos tienen una distribución normal.

Vs

H_1 = Se rechaza la hipótesis de comportamiento normal de los residuos.

En la gráfica residuos vs ajuste de la figura 2.15 se muestra que la misma no muestra patrones marcados y que estos presentan una aleatoriedad en su distribución.

En a grafica residuos vs orden de la figura 2.15 se muestra que los valores son independenciam entre si ya que se encuentran ubicados de forma aleatoria, existen valores puntuales los cuales demuestran cierta tendencia, estos deben ser analizados por separado para validar las causas que pueden ocasionar la dependencia de estos.

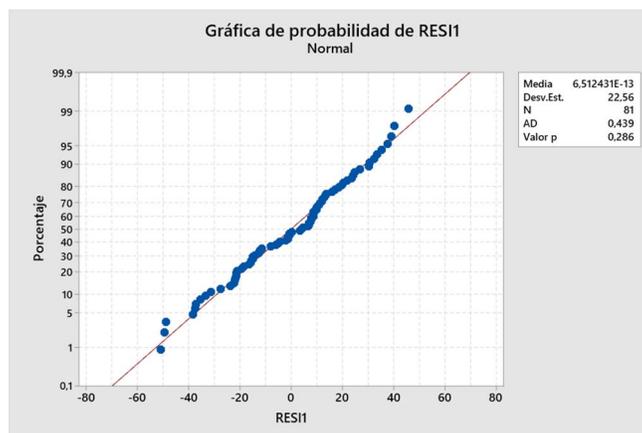


Figura 2.16 Grafica de probabilidad normal de residuos.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Tabla 9
Validación de hipótesis de grafica de corridas para residuo.

Planteamiento de la hipótesis	Valor P	Criterio
H_0 = Los datos tienen comportamiento aleatorio	0,997	No se rechaza H_0 . El residuo presenta comportamiento de aleatorio.
V_s		
H_1 = Los datos muestran existencia de grupos		
H_0 = Los datos tienen comportamiento aleatorio	0,992	
V_s		
H_1 = Los datos muestran existencia de tendencias		
H_0 = Los datos tienen comportamiento aleatorio	0,078	
V_s		
H_1 = Los datos muestran existencia oscilatoria		
H_0 = Los datos tienen comportamiento aleatorio	0,003	Existe una asociación estadísticamente significativa entre la variable de respuesta.
V_s		
H_1 = Los datos muestran existencia de mezclas		

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

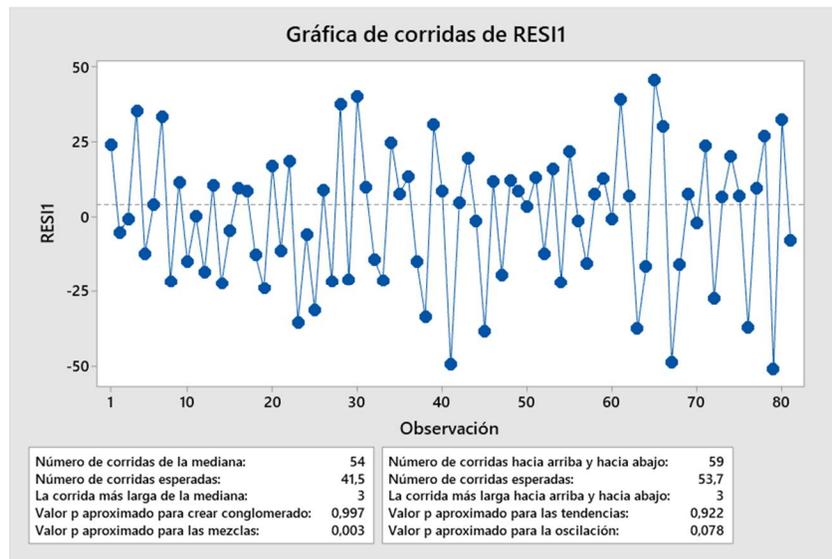


Figura 2.17 Grafica de corridas para el residuo.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Una vez concluido el análisis de los resultados obtenidos en la etapa de experimentación y para concluir con el objetivo general de incrementar el caudal promedio de producción de RESINA PET PCR se realizó una optimización al diseño experimental en el mismo paquete estadístico para poder establecer las características que deben tener cada uno de los factores de estudio para que la variable de respuesta pueda alcanzar o superar el valor nominal de caudal declarado por el fabricante.

Para validar que la realización del DOE y los resultados obtenidos son correctos y confiables, una vez establecidos los valores óptimos para cada factor de estudio se realizan corridas de prueba, donde se pueda aplicar las condiciones óptimas y se pueda verificar que la variable de respuesta alcanza valores cercanos o superiores a los valores nominales declarados por el fabricante.

3.1. Determinación de las condiciones óptimas de los factores de estudio.

Utilizando la herramienta de optimizador de respuesta del paquete estadístico con el cual se realiza en análisis de datos, se establece los valores óptimos de los factores de estudio para alcanzar el valor máximo de la variable de respuesta según los datos obtenidos el diseño experimental seleccionado (figura 3.1).

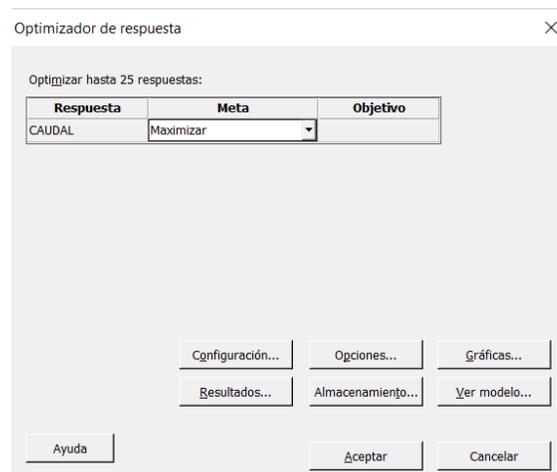


Figura 3.1 Función optimizador de respuesta para Caudal de producción.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se aprecia en la figura 3.2 el paquete estadístico calcula que la combinación de Cantidad de contaminantes de nivel 1 (rangos de cantidad de contaminantes entre 0 ppm y 20 ppm), Densidad nivel 3 (rango de densidad superior a 340 Kg/m³) y Porcentaje de humedad nivel 2 (rango de porcentaje entre 0.75% y 0.80%) permitiría al proceso a obtener el mayor valor de caudal de producción con un esperado de 1386.7875 Kg/h.

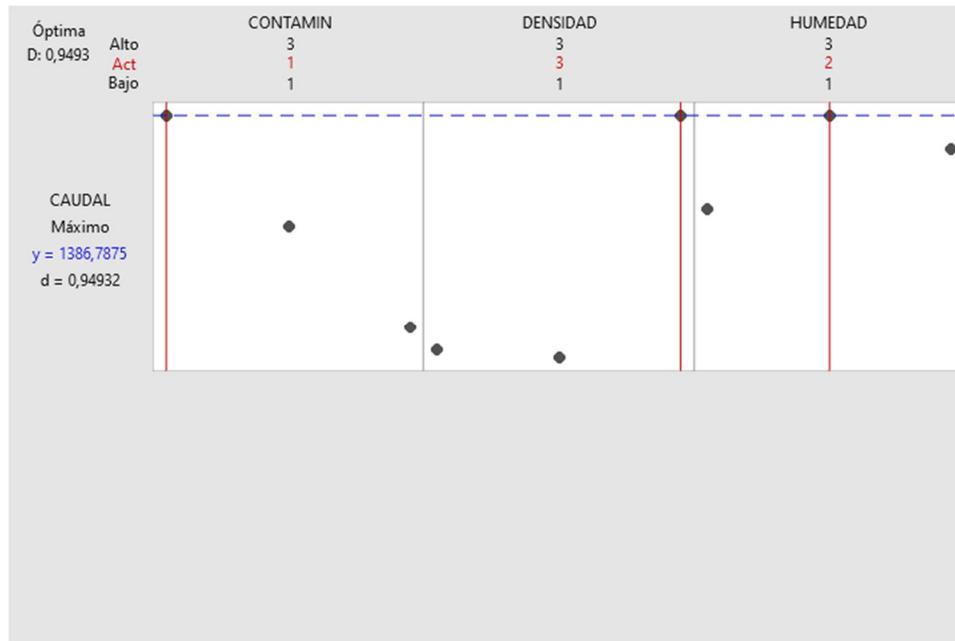


Figura 3.2 Niveles óptimos para factores de estudio para obtener el valor máximo de la variable de respuesta.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

3.2. Corridas de verificación.

Determinados los niveles óptimos para los factores de estudio se procede a preparar materia prima que cumpla con estos requisitos para realizar 3 corridas de verificación, las cuales se llevaran a cabo de forma alterna con la producción normal de la planta para que se pueda apreciar de mejor manera el impacto que tiene sobre el proceso y principalmente sobre el caudal de producción.

Como se aprecia en la Tabla 9 las corridas de verificación se realizan a distintas fechas y horas. Según la disponibilidad de materia prima y con aleatoriedad de personal operativo.

Tabla 10
Cronograma de corridas de verificación.

# Prueba	Fecha	Hora inicio	Hora fin
1	14/12/2022	2:00:00	6:00:00
2	3/1/2023	14:30:00	18:30:00
3	21/1/2023	2:00:00	6:00:00

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

La data de las corridas se descarga del software de control propio de la maquinaria donde se establece la variable caudal y se define la fecha, hora de inicio y final para obtener la data de cada corrida (Figura 3.3; 3.4 y 3.5).

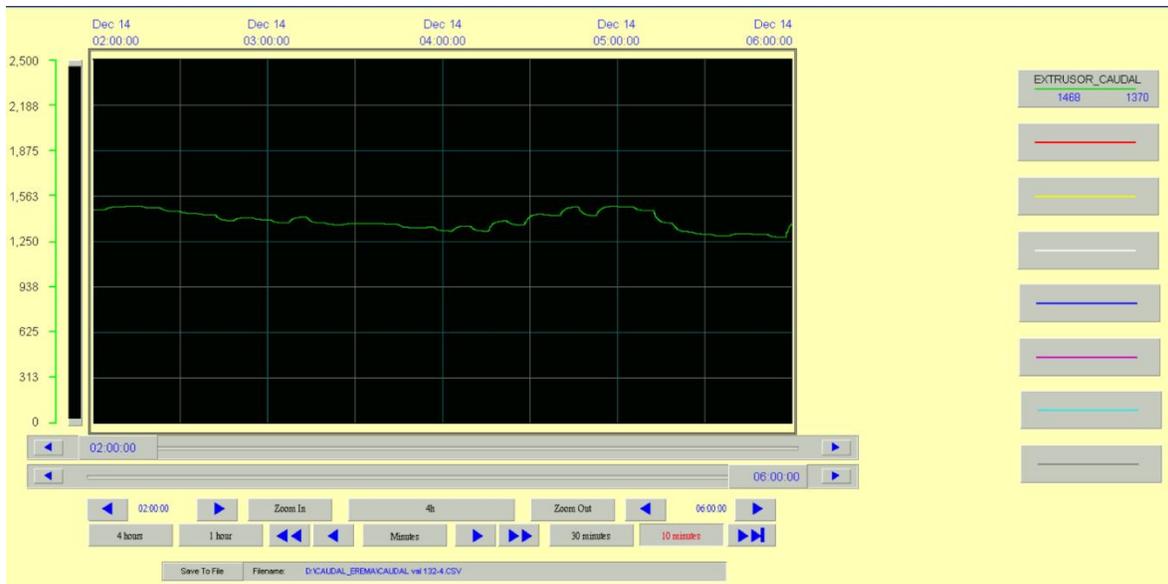


Figura 3.3 Grafica de caudal de primera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

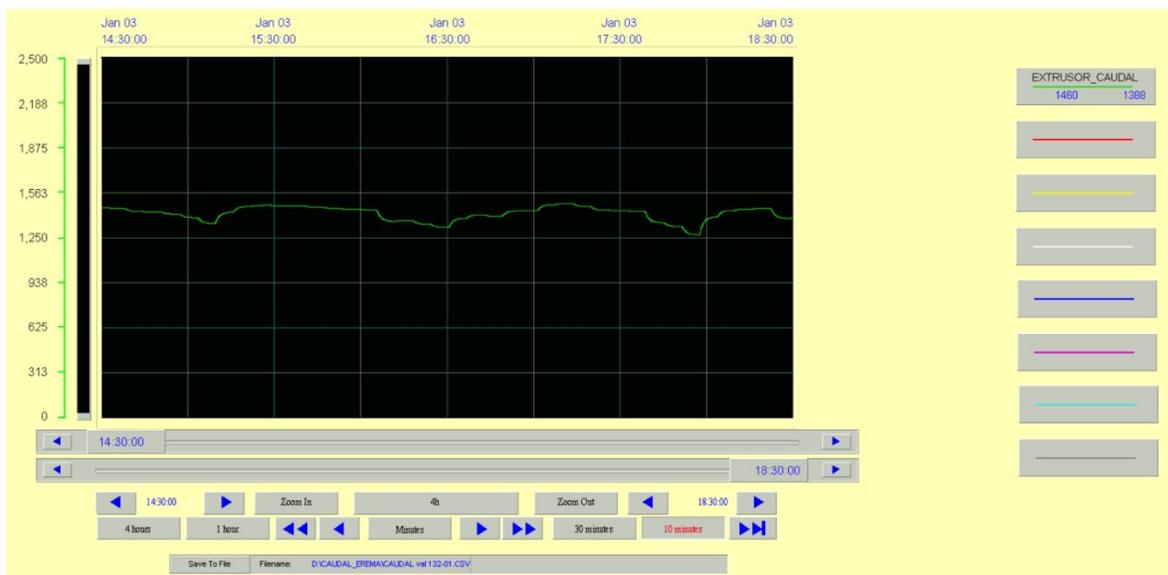


Figura 3.4 Grafica de caudal de segunda corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

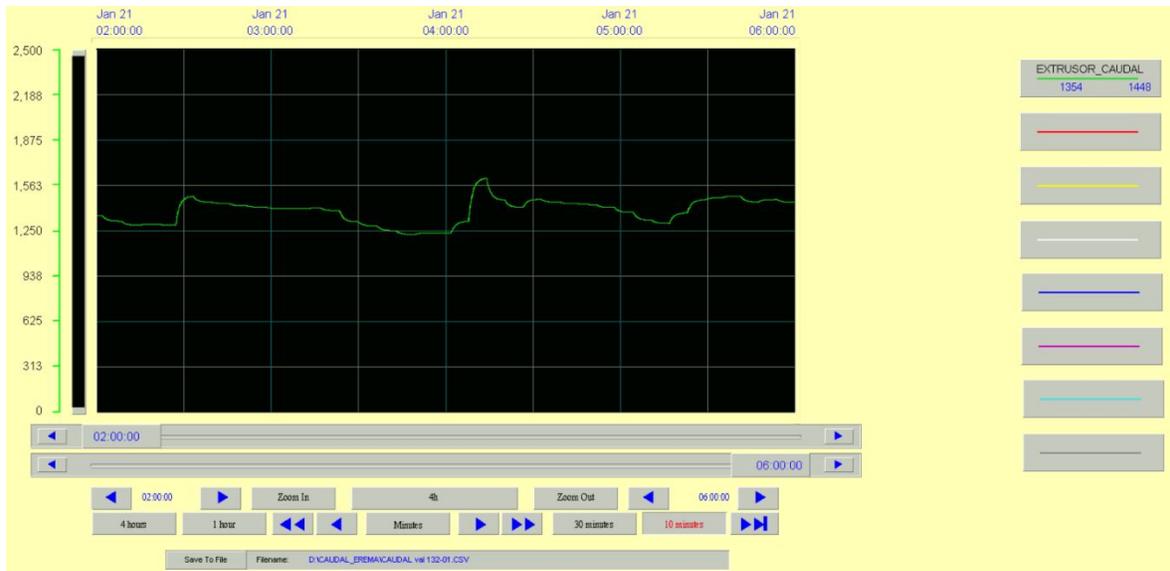


Figura 3.5 Grafica de caudal de tercera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Se analiza la data de las corridas de verificación para validar que es posible alcanzar los valores de caudal pronosticados por el paquete estadístico con los niveles óptimos de cada factor estudiado.

Adicional se realiza una comparación de los datos obtenidos en las corridas de verificación con datos obtenidos de periodos de tiempo previos a las corridas de verificación (figura 3.6; 3.7 y 3.8).

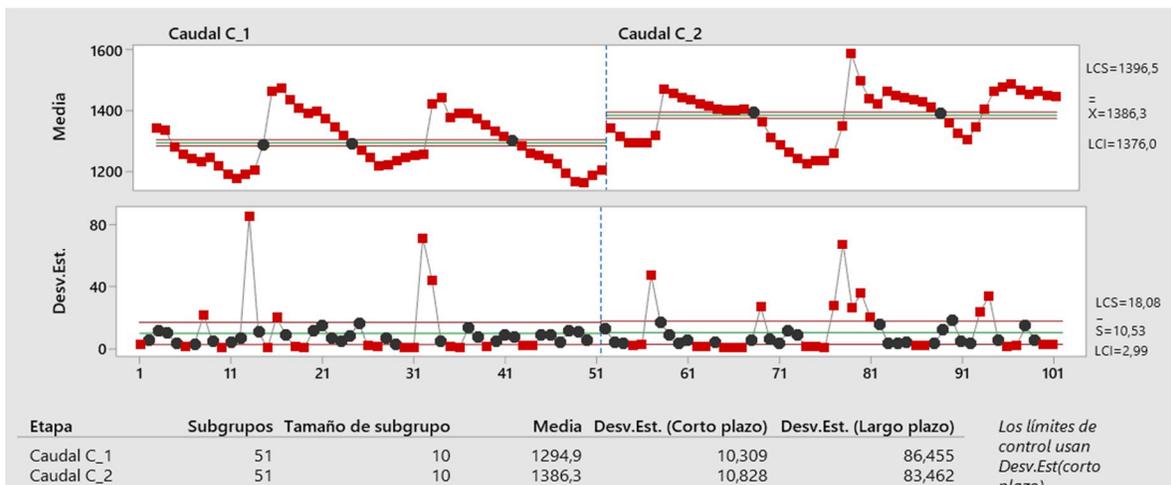


Figura 3.6 Grafica antes – después primera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

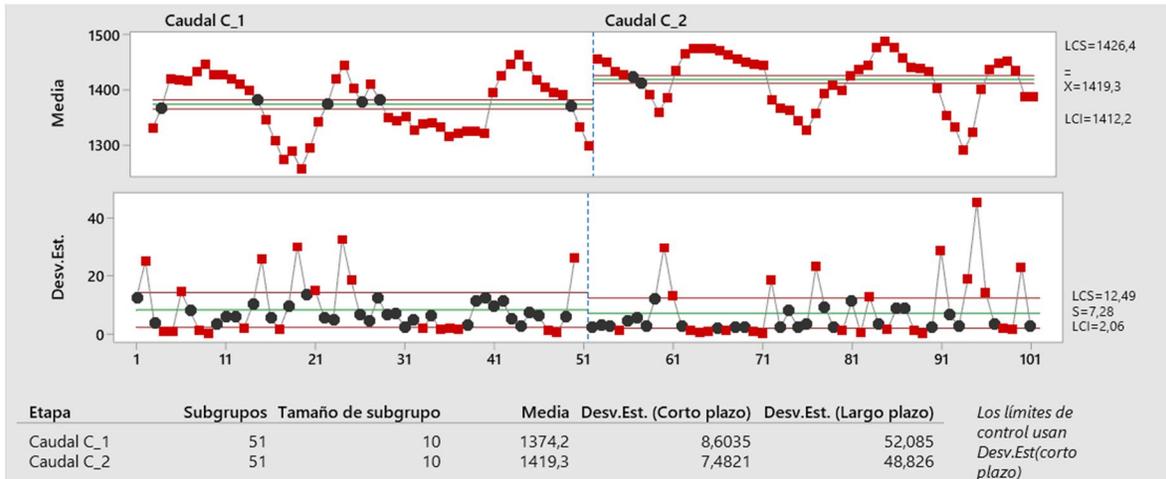


Figura 3.7 Grafica antes – después segunda corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

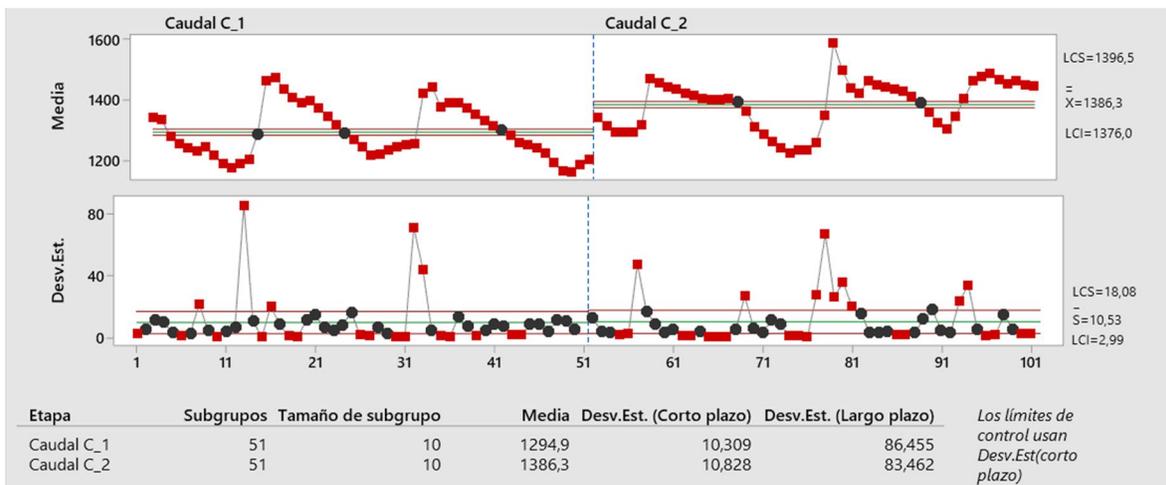


Figura 3.8 Grafica antes – después tercera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Tabla 11
Resumen comparación entre corridas de verificación y estado planta previo.

# Corrida	Fecha	Rango de tiempo	Tipo	Caudal (Kg/h)	Desviación estándar
1	13/12/2022	De 20:00:00 A 24:00:00	Producción Normal	1344,6	76,808
	14/12/2022	De 2:00:00 A 6:00:00	Corrida de verificación	1394,1	62,711

2	3/1/2023	De 8:00:00 A 12:00:00	Producción Normal	1374,2	52,085
	3/1/2023	De 14:30:00 A 18:30:00	Corrida de verificación	1419,3	48,826
3	20/1/2023	De 20:00:00 A 24:00:00	Producción Normal	1294,9	86,455
	21/1/2023	De 2:00:00 A 06:00:00	Corrida de verificación	1386,3	83,462

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Validación de parámetros de control de calidad del producto terminado.

Para validar que la optimización en los factores de estudio en la materia prima y el incremento en el caudal de producción, no afecten a las características de calidad del producto terminado, se realiza una comparación entre los valores obtenidos en producto terminado.

Tabla 12
Características de producto terminado antes y después de la mejora.

Parámetro de control	Norma	Unidad	Antes	Después
			(03/01/2023)	(03/01/2023)
Viscosidad Intrínseca (IV)	0,78 – 0,86	dL/g	0,812	0,832
Color L	68 – 72	-	70,32	70,20
Color a*	-4,5 – 0	-	-3,47	-3,65
Color b*	-3,5 - 2	-	0,38	0,37
Acetaldehído	≤ 3,5	ppm	1,94	2,21
Temperatura de fusión	244 - 248	°C	245,0	244,9
Porcentaje de Cristalinidad	≥ 22	%	26,77	28,36
Peso Granulo (Promedio 100 gránulos)	2,2 – 2,8	g	2,33	2,45

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

Como se aprecia en la tabla 11 no se encuentran variaciones considerables en las características del producto terminado. Por lo que se puede afirmar que la mejora en los factores de estudio ayuda a incrementar el caudal de producción y mantiene las características de calidad del producto terminado.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones.

- Se pudo incrementar el caudal de producción de la planta de descontaminación y peletizado de RESINA PET PCR hasta valores superiores al caudal nominal declarado por el fabricante de la maquinaria de 1350 Kg/h. Se obtuvo un promedio de las corridas de verificación de 1399,9 Kg/h. con la variación de los niveles de cantidad de contaminantes, densidad y porcentaje de humedad que contiene la materia prima
- Mediante la realización de del diseño de experimentos se pudo establecer los niveles óptimos para los factores de estudio en la materia prima, definiendo que la cantidad de contaminantes optima debe estar entre 0 ppm y 20 ppm, la densidad debe ser igual o superior a 340 Kg/m³ y el porcentaje de humedad debe tener entre 0,75% y 0,80%, obteniendo con estos los valores de caudal de producción más altos
- Los valores de operación de la maquinaria declarado por el fabricante para a los factores de estudio, presentan rangos más amplios de tolerancia con respecto a los encontrados en la realización del presente proyecto. Siendo así que, la cantidad de contaminantes en la materia prima sugerida por el fabricante va de 0 ppm a 50 ppm, la densidad debe ser mayor a 300 Kg/m³ y el porcentaje de humedad recomendado es de entre 0,80% a 1,0%. Esperado alcanzar con estos valores un caudal máximo de 1350 Kg/h por lo que al ser más específico con los valores de los factores de estudio se pudo alcanzar caudales por sobre el nominal declarado por el fabricante

4.2. Recomendaciones.

- Se recomienda la implementación de un sistema de homogenización previo a la etapa de alimentación, para que se pueda realizar una mezcla entre sacos que cumplan con los niveles definidos en este documento para los factores de estudio y sacos que contengan cantidades por fuera de estos niveles. Para poder aprovechar la máxima cantidad de materia prima disponible y no realizar devoluciones de material fuera de especificación al proceso de molienda y lavado. Ya que este reproceso incurre en gastos adicionales al proceso.
- Realizar mejoras en el proceso de Molienda y Lavado con el fin de que se puedan alcanzar los niveles de los factores estudiados en la materia prima para el proceso de Descontaminación y Peletizado.

BIBLIOGRAFÍA.

J. Marco a, c. (2022). *Diseño de experimentos aplicados a baterías de iones de litio: una revisión de la literatura.*

Melo O., López L. y Melo S. (2020). *Diseño de experimentos métodos y aplicaciones.*

Montgomery, D. (2004). *Control Estadístico de la calidad. Limusa Wiley.*

Óscar Delbeke, H. L. S. H. L. V. a, c, J. M. (2022). *Una caracterización completa y eficiente en el tiempo de las baterías de flujo redox a través del diseño de experimentos.*

ANEXOS

ANEXO A

ANTES – DESPUÉS PRIMERA CORRIDA DE VERIFICACIÓN.

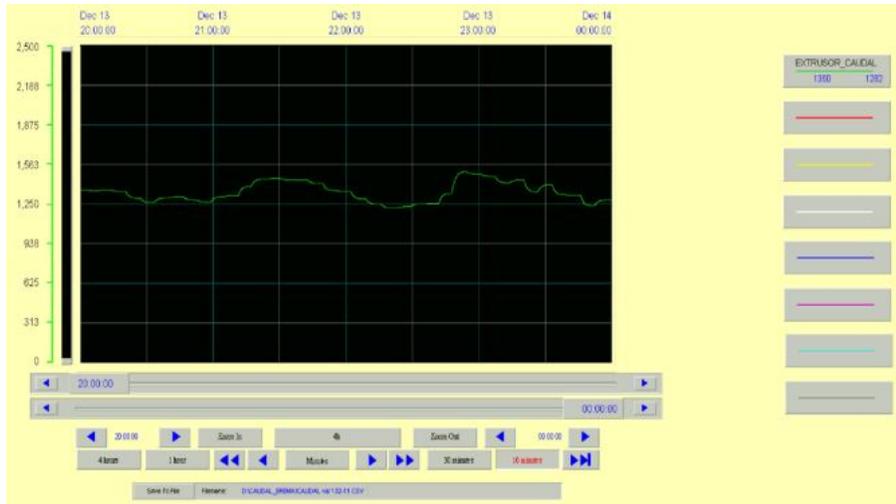


Figura 6.1 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo a la realización de la primera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

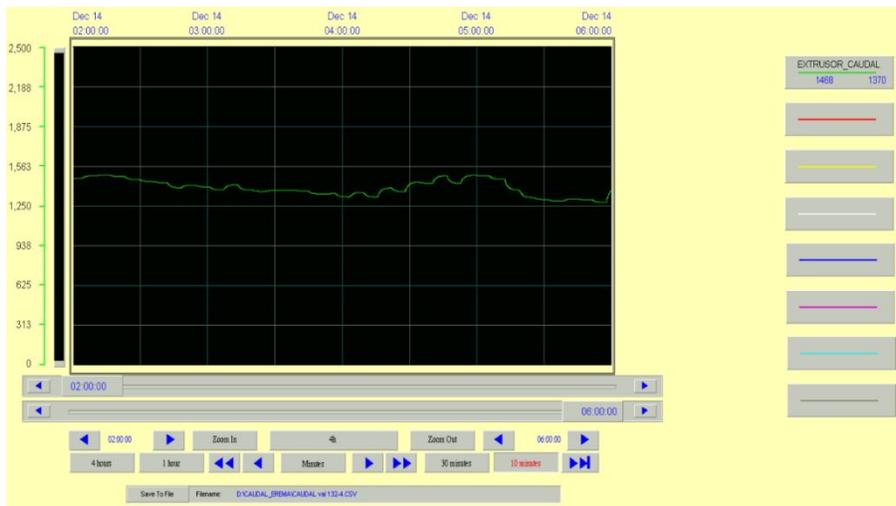


Figura 6.2 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la primera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

ANEXO B

ANTES – DESPUÉS SEGUNDA CORRIDA DE VERIFICACIÓN.

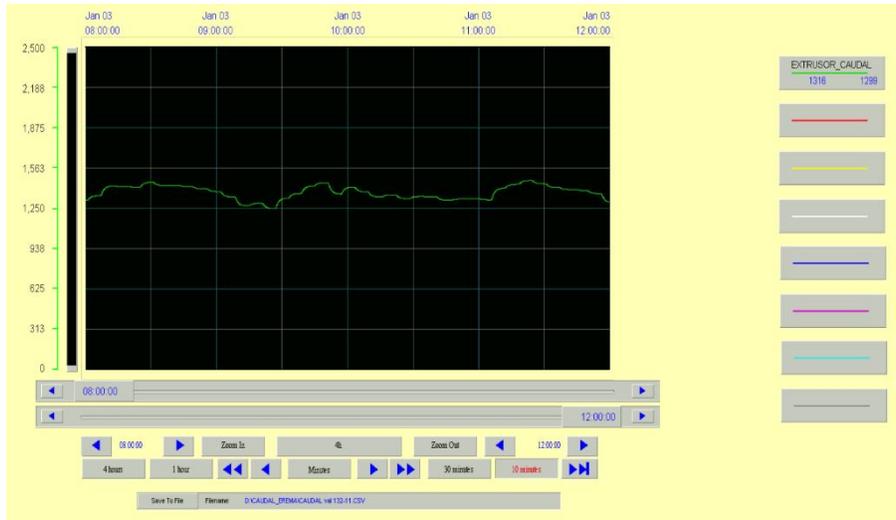


Figura 6.3 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo a la realización de la segunda corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

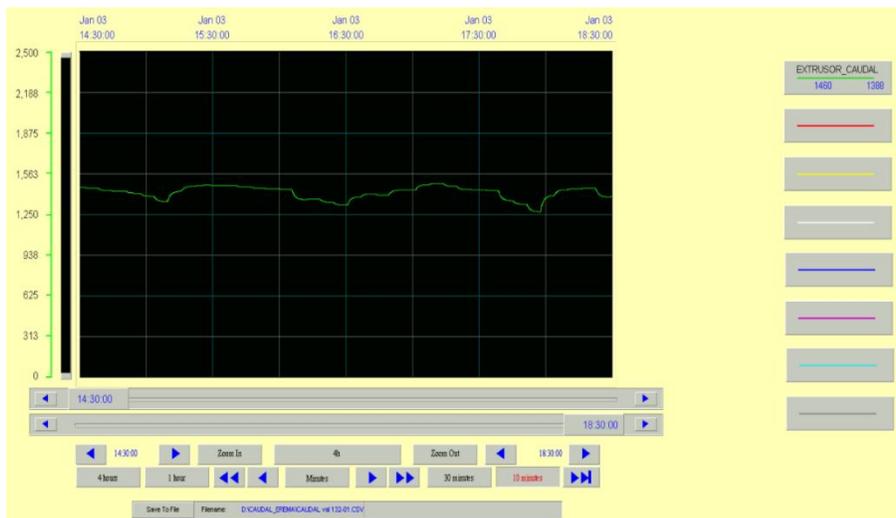


Figura 6.4 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la segunda corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

ANEXO C

ANTES – DESPUÉS SEGUNDA CORRIDA DE VERIFICACIÓN.

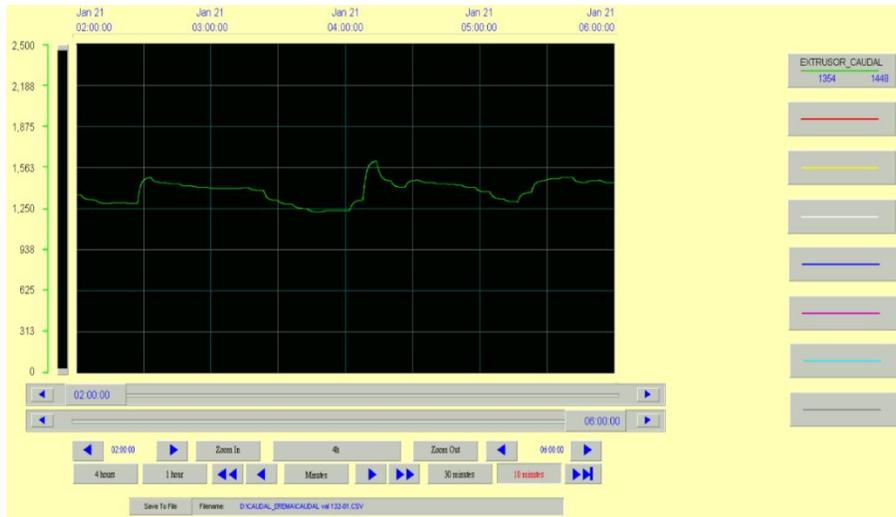


Figura 6.5 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso previo la realización de la tercera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

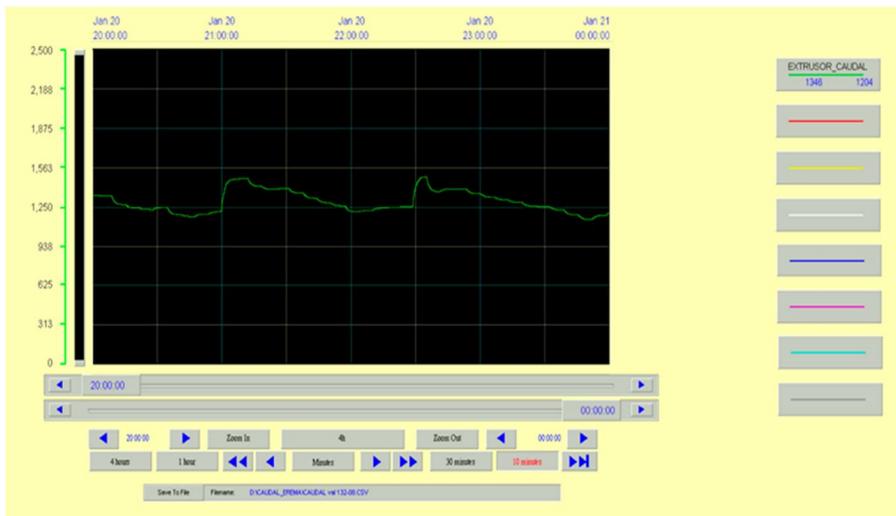


Figura 6.6 Grafica de caudal de producción del software de control del proceso durante la realización de la tercera corrida de verificación.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)

ANEXO D

EJEMPLO DE SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN Y ALIMENTACIÓN RECOMENDADO.

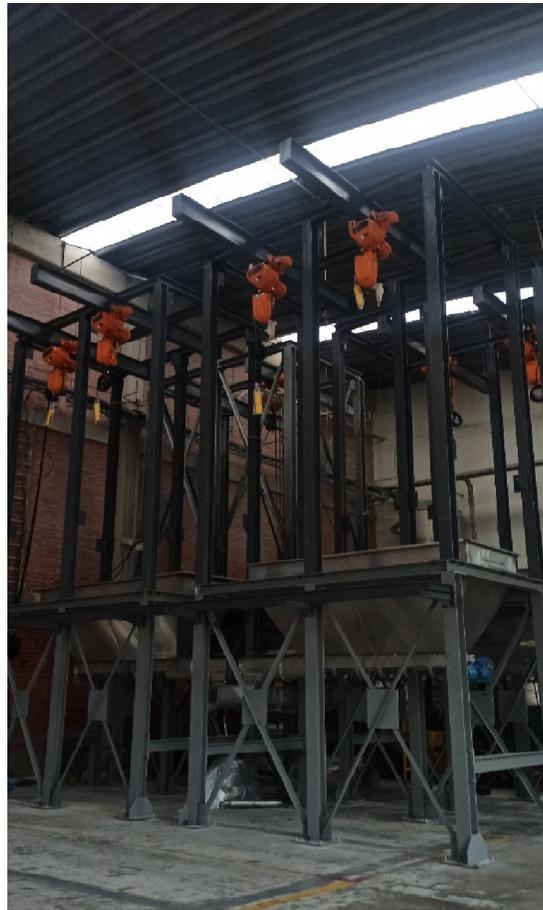


Figura 6.7 Sistema de homogenización y alimentación de materia prima con espacio para izado de 8 sacos.

Fuente: Criollo Geovanny (2023)