

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

PROPUESTA DE MEJORA DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE LA CAPA SPECIAL CON EL FIN DE
REDUCIR LOS DESPERDICIOS INCURRIDOS

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de
Estudios de Posgrado en Ingeniería Industrial para optar al grado y título de Maestría Profesional
en
Ingeniería Industrial con énfasis en Manufactura y Calidad

JESÚS ALBERTO MORA ARRIETA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2024

Dedicatoria

A Rosario Arrieta A., Rafael Mora M., María José Mora A, William Jiménez M., Vera Artavia F.,
Andrés Arrieta M., A Princesa, a Maggie y a toda mi familia, ¡Son mi todo!

Y en especial a mi amiga, que ya no está conmigo, pero siempre me acompañó en mis estudios y
estuvo cuando la necesite. Un abrazo al cielo Chelsea.

Agradecimientos

A mi madre, Rosario Arrieta Artavia y mi padre, Rafael Ángel Mora Méndez, que siempre han sido mi apoyo en todas las metas que me propongo, me impulsan y me hacen crecer.

A María José Mora A, mi hermana, que siempre ha sido mi inspiración y una de las personas que me motiva a ser mejor.

A mi hermano, William Jiménez Marín, que con sus locuras me tranquiliza, me quita el estrés y me permite seguir adelante.

A Mis dos abuelos, Vera Violeta Artavia Fernández y Andrés Arrieta Mondragón, que todo el tiempo se preocupan por mí y me han apoyado hasta el cansancio.

A mis dos mejores amigos, Rodolfo Araya Blanco y Dayana Villalobos Moreira, que siempre han estado conmigo y me han apoyado, motivándome y haciéndome una mejor persona.

A mis amigos y compañeros, Luis Arias Monge y María Ester Chacón Cruz quienes me acompañaron durante todas las asignaturas, y me impulsaron a continuar y completar la maestría.

Al ingeniero Marco Antonio Monge Vílchez; quien aceptó ser mi profesor tutor sin dudar, y me ha guiado por el proceso con paciencia y dedicación.

A la profesora Patricia Ramírez Barrantes, quien muy amablemente guió mis pasos durante la aplicación del diseño de experimentos y se mostró disponible desde primera instancia.

A la empresa PROQUINAL, CR, por permitirme realizar este trabajo final de graduación.

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Industrial de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Ingeniería Industrial con énfasis en Manufactura y Calidad.”

Dr. Roberto Quirós Vargas
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado

M.Sc. Marco Antonio Monge Vilchez
Profesor Guía

M.Sc. Fernán Cañas Coto
Lector

M.Sc. Carlos Luis Jiménez Villagra
Lector

Ing. Eldon G. Caldwell Marín, Ph.D., Sc.D., Ed.D.
Director del Programa de Posgrado en Ingeniería Industrial

Jesús Mora Arrieta
Sustentante

Tabla de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	vii
Abstract	viii
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	x
Capítulo I: EL Problema y su importancia	1
1.1. Problema	1
1.2 Antecedentes o Introducción del tema	1
1.3 Justificación de la problemática	5
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
Capítulo II Marco teórico	6
2.1 Marco Conceptual.....	6
2.1.1 Definición y caracterización de un Vinil	6
2.1.2 Plastisol	6
2.1.3 Calidad.....	9
2.1.4.1 Six Sigma.....	12
2.1.4.2 DMADV	12
A. Definir.....	13
B. Medición:	13
C. Análisis:	13
D. Diseño	13
E. Verificación	13
2.1.4.3 Diseño de experimentos	13
A. Reconocimiento y formulación del problema	14
B. Selección de los factores y niveles.....	14
C. Selección de las variables de respuesta	14
D. Selección del diseño experimental	14
E. Realización del experimento:.....	14
F. Análisis de los datos.....	14

G. Conclusiones y recomendaciones	14
2.1.4.4 Diseño de experimentos factoriales	14
2.2 Marco contextual	15
Capítulo III Marco Metodológico	17
3.1.1 Tipo de investigación.....	17
3.1.2 Definición de los elementos de estudio.....	17
3.1.3 Diseño Metodológico	18
Capítulo IV Desarrollo y Resultados	19
4.1 Definir.....	19
4.1.1Project Charter	19
4.1.2 Definición de variables para el diseño de experimentos	21
4.2 Medir.....	23
4.2.1 Histórico de Viscosidad	23
4.2.1 Análisis estadístico del historial de viscosidad del plastisol CAPA SPECIAL en transparente.....	24
4.3 Analizar.....	26
4.4 Diseñar	28
4.4 Validar	35
Capítulo V Discusión de resultados	38
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones	41
Bibliografía	43
Apéndices y anexos necesarios.....	46
Anexo 1. Hoja de recolección de datos de la etapa uno, departamento de preparación de plastisoles y compuestos.	46
Anexo 2. Casa de la calidad del proceso productivo de la capa Special en Proquinal Costa Rica	47

Resumen

Proquinal CR, es una empresa dedicada a la fabricación de telas vinílicas especializadas; para mercados como automotriz, línea marina, zapatería y marroquinería, vestuario y protección, institucionales y residenciales; desde 1958. En Costa Rica la compañía se establece en el año 2000, instalando una línea de producción de tres etapas. La etapa principal llamada generadora, es un proceso continuo que se abastece de insumos provenientes de diferentes departamentos, entre ellos el departamento de plastisoles y compuestos, encargado de realizar mezclas de resina (PVC), de plastificante y otros aditivos, que se encuentra en estado sólido o líquido, y se les denomina plastisoles.

El departamento de plastisoles y compuestos dispone de un flujo de proceso con tres puntos de control de calidad, en los cuales se evalúa las propiedades de viscosidad, densidad y otros. Estas propiedades definen el tratamiento posterior a la etapa de evaluación, si cumplen con los rangos de calidad continúan el proceso, de lo contrario se realiza un reproceso con el fin de cumplir la especificación deseada. En el año 2021 la producción presentó un reproceso cerca del 85% de los plastisoles, generando un sobrecosto de \$184 540 anuales.

Por consiguiente, el proyecto de graduación presenta la implementación de un control de proceso, específicamente para la Capa Special que representa el 10,82% de la producción 2022, basado en tres etapas importantes.

En la primera etapa se realiza un análisis del proceso productivo a nivel de datos históricos y se determina el comportamiento estadístico de la producción como normal y su capacidad para generar productos dentro de especificación. Además, se identifican las variables físicas más influyentes sobre la viscosidad basados en experiencia industrial y en teoría de la química del polímero.

En una segunda etapa se genera un diseño de experimentos de tipo factorial 5^n , con un enfoque sobre las variables de manufactura determinadas como influyentes, lo que permitió visualizar de forma estadística y física la incidencia sobre la viscosidad del plastisol y como se relacionan entre sí. Además, definir que las variables cantidad de masa, altura del aspa y su interacción, son las de mayor repercusión sobre la variabilidad de la viscosidad.

La validación del control de proceso consistió en intervenir las variables concluyentes del diseño de experimentos, en una producción industrial de la capa Special, esperando obtener una reducción del error entre la viscosidad real y la teórica y consecuentemente en los desperdicios asociados al reproceso. Los resultados establecieron una reducción del 38,31% de los desperdicios incurridos, equivalente a 70 697,27 USD anuales.

En relación a lo antes expuesto, se establece una curva de optimización del modelo creando una herramienta que permite una mejora del proceso de manufactura de la capa Special, reduciendo los desperdicios incurridos y la posibilidad de extrapolación a los distintos plastisoles producidos por Proquinal Costa Rica.

Abstract

Proquinal CR, is a company dedicated to the manufacture of specialized vinyl fabrics; for markets such as automotive, marine line, shoe and leather goods, clothing and protection, institutional and residential; since 1958. In Costa Rica, the company was established in 2000, installing a three-stage production line. The main stage called generating, is a continuous process that is supplied with inputs from different departments, including the department of plastisol's and compounds, responsible for making mixtures of resin (PVC), of plasticizer and other additives, which is found in solid or liquid state, and is called plastisoles.

The plastisol's and compounds department has a process flow with three quality control points, in which viscosity, density and other properties are evaluated. These properties define the treatment after the evaluation stage, if they meet the quality ranges continue the process, otherwise a reprocessing is carried out to meet the desired specification. In the year 2021 production presented a reprocessing of about 85% of the plastisoles, generating an over cost of \$184,540 annually.

Therefore, the graduation project presents the implementation of a process control, specifically for the Special Layer, which represents 10.82% of 2022, based on three major stages.

In the first stage an analysis of the production process is carried out at the level of historical data and the statistical behavior of production as normal and its ability to generate products within specification is determined. In addition, the most influential physical variables on viscosity are identified based on industrial experience and the theory of polymer chemistry.

In a second stage, a 5n factor experiment design is generated, with a focus on the manufacturing variables determined as influential, which enabled statistical and physical visualization of the impact on the viscosity of plastisol and how they relate to each other. In addition, define that the variables quantity of mass, height of the spindle and its interaction, are the ones that have the greatest impact on the variability of the viscosity.

Process control validation consisted of intervening the concluding variables of the experimental design, in an industrial production of the Special layer, hoping to obtain a reduction in the error between the actual and the theoretical viscosity and consequently in the waste associated with the reprocessing. The results showed a 38.31% reduction in incurred waste, equivalent to \$70,697.27 per annum.

In relation to the above, a model optimization curve is established by creating a tool that allows an improvement in the manufacturing process of the Special layer, reducing the waste incurred and the possibility of extrapolation to the different plastisoles produced by Proquinal Costa Rica.

Lista de tablas

Tabla 1. Tamaño de partícula promedio y fracciones de masa de partículas bajo 1,2 micras	7
Tabla 2. Tabla de resumen de fases del dmadv.....	18
Tabla 3. Acta de definición de proyectos.....	19
Tabla 4. Definición de variables y condiciones para la aplicación del diseño de experimentos sobre el diluidor	21
Tabla 5. Definición de variables y condiciones para la aplicación del diseño de experimentos sobre el diluidor	22
Tabla 6. Niveles establecidos de los factores del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio.....	23
Tabla 7. Estadística descriptiva del historial de viscosidad del plastisol capa special en transparente	24
Tabla 8. Resultados obtenidos del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio.....	29
Tabla 9. Resultados de las distancias de cook en los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio	31
Tabla 10. Condiciones y resultados de la validación para el control de proceso de la capa special	37

Lista de figuras

Ilustración 1. Flujo de proceso de un plastisol en el departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de proquinal cr. norma iso 9001:2015	3
Ilustración 2. Diagrama de causa y efecto sobre la propiedad viscosidad de un plastisol.....	9
Ilustración 3. Histograma de viscosidad de la capa especial en transparente con curva de normalidad	24
Ilustración 4. Diagrama de cajas de viscosidad de capa especial en transparente	25
Ilustración 5. Gráfico de valor individual de la viscosidad de la capa especial en transparente	25
Ilustración 6. Prueba anderson-darling para la viscosidad de capa especial en transparente.....	26
Ilustración 7. Gráfica de control de viscosidad de la formula vigente de trabajo de la capa especial en los años 2022-2023.....	26
Ilustración 9. Diagrama de pareto de efectos estadísticos estandarizados para los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones de laboratorio	31
Ilustración 10. Diagrama de pareto de efectos estadísticos estandarizados para los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones de laboratorio ajustados sin corridas fallidas	32
Ilustración 11. Análisis de homocedasticidad para la viscosidad y temperatura.....	32
Ilustración 12. Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 200 g.....	34
Ilustración 13. Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 500 g.....	34
Ilustración 14. Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 350 g.....	35
Ilustración 15. Impacto económico del proyecto.	36
Ilustración 16. Qfd del proceso productivo del plastisol capa especial en proquinal cr.....	47

Capítulo I: EL Problema y su importancia

1.1. Problema

Durante la inspección de control de calidad, en el proceso de producción del departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PROQUINAL CR, el 84,5% de las preparaciones de la CAPA SPECIAL son enviadas a reproceso dado que no cumplen las especificaciones de viscosidad, esto representa un consumo extra de materia prima no contemplado en el precio del producto final.

1.2 Antecedentes o Introducción del tema

La compañía PROQUINAL (acrónimo de Productos Químicos Nacionales), nace en 1958 en Colombia como productora de telas vinílicas, en 1986 comienza una alianza estratégica con el grupo Spradling International inc. Y con esto, para el año 2000 expande sus fronteras y comienza a establecerse en Costa Rica hasta la actualidad.

La compañía genera telas vinílicas especializadas para el mercado automotriz, línea marina, zapatería y marroquinería, vestuario y protección, institucionales y residenciales. Para poder brindar un producto adecuado a las diferentes áreas se debe cumplir con estándares y normas internacionales de producción.

Dichos requisitos se han incluido en los cinco pilares estratégicos de la compañía:

- orientación al mercado y crecimiento
- sostenibilidad
- Innovación y diversificación
- Transformación digital
- Talento de clase mundial

PROQUINAL CR, presenta una línea productiva dividida en tres secciones, la generación principal de vinil, acabados y recubrimientos y finalmente la etapa de revisión de calidad.

La sección de generación es abastecida por una serie de departamentos de servicio, uno de estos departamentos recibe el nombre de preparación de compuestos y plastisoles, y es el encargado de preparar plastisoles.

El plastisol es la mezcla de una resina (PVC), de un plastificante y otros aditivos que se encuentra en estado sólido o líquido a temperatura ambiente con propiedades viscoelásticas, dependiendo de la resina se puede tener un comportamiento ligeramente dilatante o pseudoplástico.

En PROQUINAL se preparan tres tipos de plastisoles, capas, espumas y laminaciones, los tres tipos de plastisoles se les evalúa la propiedad de viscosidad y en el caso de las espumas, la densidad es otra variable importante.

El departamento técnico es el encargado de asegurar que dichas variables presenten los valores adecuados para asegurar la continuidad del proceso.

El flujograma de proceso, basado en la norma ISO 9001:2015, para producir un plastisol antes de llegar al equipo principal de producción de vinil, llamado generadora, se puede observar en la figura I.

El proceso inicia cuando el colaborador encargado realiza la preparación de los plastisoles asignados por planeación, estos basados en las fórmulas correspondientes, las cuales están creadas a partir de los requerimientos del producto final, cada fórmula recibe un nombre específico y se le denomina referencia.

El colaborador, encargado de realizar la preparación del plastisol, pesa cada materia prima de manera proporcional hasta completar la mezcla total requerida, ya sea una preparación manual que va de los 0 Kg a los 1100 Kg o bien una preparación en diluidor que va desde los 1100 kg hasta los 5000 Kg. Estas preparaciones generan un plastisol al cual se le conoce como plastisol transparente.

Una vez preparado el plastisol en transparente, el departamento técnico, toma una muestra para evaluar las variables de densidad y viscosidad, en el caso de las espumas, y únicamente la viscosidad en el caso de las capas.

El departamento técnico realiza la medición de la viscosidad en unidades de centiPoise (cP), en un viscosímetro rotacional, y posee un rango de aceptación por cada referencia de plastisol.

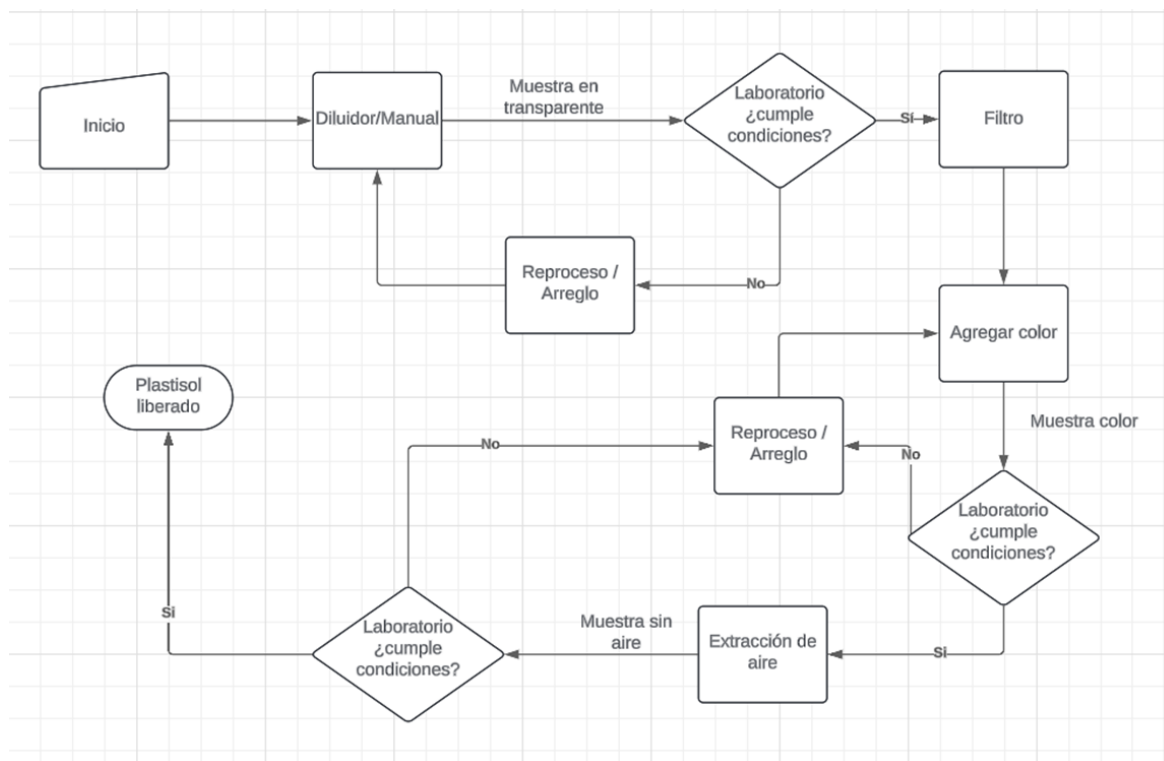


Ilustración 1 Flujo de proceso de un plastisol en el departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PROQUINAL CR. Norma ISO 9001:2015

Fuente: Datos internos del departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PQNCR, creado en el año 2023

En el caso de la densidad (g/cm³), la muestra se somete a un proceso a escala, donde se obtiene la espuma del producto en forma de rectángulo, a esta espuma resultante se le denomina placa.

Una vez obtenida la placa, se cortan dos muestras en forma circular con área definida y se les mide el peso a las muestras circulares, además, con un medidor de grosor digital se les mide el calibre (mm) que se generó en el proceso, el cual es considerado el volumen en la fórmula de densidad; la densidad, al igual que la viscosidad, posee un rango de aceptación en el cual debe trabajar la referencia.

Si ambas propiedades se encuentran dentro de rango de aceptación, el plastisol continúa el proceso hacia el filtro, donde son retiradas las impurezas, si por el contrario no supera alguna de las dos variables es enviado a reproceso.

El reproceso consiste en adicionar, por mandato del auxiliar de laboratorio, una materia prima al plástisol. En el caso de requerir bajar la viscosidad se adiciona: Hexilenglicol, Varsol o plastificante; para subir la viscosidad: sílice.

Por otra parte, si se desea aumentar la densidad se utilizan los agentes hinchantes: *batch* Azodicarbonamida y octoato de zinc; en el caso de querer disminuir la densidad: se utiliza un *batch* llamado neutro, el cual es una mezcla de todas las materias primas del plastisol menos los agentes hinchantes.

La cantidad de materia prima utilizada para el reproceso es determinada por el auxiliar, basado en experiencia. sin embargo, se le asigna un tope porcentual que puede ser adicionado a cada mezcla, para el Hexilenglicol el 3%, sílice 0,8%, Varsol 3%, *batch* Azodicarbonamida 0,5%, octoato de zinc 0,5% y *batch* Neutro 20%, estos topes son asignados por tema de costos. El reproceso de un plastisol para cualquiera de las dos variables es conocido como arreglo.

Una vez que el plastisol supera la etapa del filtro, se agrega color hasta llegar al tono adecuado, el departamento de color es responsable de este proceso y de igual forma es evaluado y sometido a ajustes con *batch* color hasta cumplir sus estándares de calidad, la adición de *batch* color puede implicar un aumento o disminución de la viscosidad del plastisol, por lo que debe controlarse esta variable.

Una vez aprobado el tono, el plastisol pasa a un proceso de extracción de aire en un hidrobat el cual es una combinación de extractor de aire y un batidor. Este proceso es necesario porque la presencia de aire en el plastisol produce defectos en el material como porosidad, separación de color, entre otros.

Por otra parte, el hidrobat reduce la viscosidad del plastisol y cambia el tono, al llegar a la extracción de aire el cambio de tono y de viscosidad ya fueron contemplados en los procesos anteriores por lo que usualmente queda dentro del rango de viscosidad aceptado y con el tono correcto, sin embargo, si alguna de las dos variables mencionadas no es aceptada, el plastisol se reprocesa hasta que se pueda enviar a la generadora, este proceso de aceptación final se le conoce como liberación.

1.3 Justificación de la problemática

Durante el proceso de producción, cerca del 85% de los plastisoles en transparente, que llegan al departamento técnico, no cumplen con las especificaciones de viscosidad, esto implica que deben ser arreglados, y a su vez, que se debe consumir materia prima no contemplada dentro del presupuesto del producto final

Por ejemplo, la sílice, en el año 2021 consumió 9987,7 Kg en arreglos, lo que representó \$153 810 en costo de materia prima; y en costo de mano de obra \$30 730, sin contemplar los costos de transporte de la materia prima, se obtuvo un costo total de \$184 540 anuales.

Estos son los costos de consumo extra de materia prima, únicamente con la sílice, también se debe considerar los otros agentes reológicos como Hexilenglicol y Varsol.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejora del proceso de manufactura de la capa especial con el fin de reducir los desperdicios.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar el proceso de manufactura de la CAPA ESPECIAL para identificar las variables que más impactan la variabilidad en la viscosidad mediante el uso de herramientas estadísticas.
- Diseñar un control de proceso basado en las variables más influyentes sobre la viscosidad de la CAPA ESPECIAL para mejorar para mejorar el nivel de desperdicio en el proceso de manufactura de los plastisoles.
- Evaluar el control propuesto en la etapa de diseño, mediante un plan piloto que permitan cuantificar la reducción de la variabilidad de viscosidad de la CAPA ESPECIAL para evidenciar la mejora el nivel de desperdicio del proceso de manufactura de los plastisoles.

Capítulo II Marco teórico

2.1 Marco Conceptual

En esta sección se colocan los principales conceptos dentro de la teoría, que deben ser manejados para la aplicación y entendimiento de la presente investigación.

2.1.1 Definición y caracterización de un Vinil

El vinil es un textil sintético compuesto por diferentes capas de plastisol, los cuales son típicamente polímeros que cambian de un estado líquido a uno sólido o de alta viscosidad, a una temperatura específica. (Maia, 2017)

Los plastisoles que componen el textil se conocen como capa superficial de PVC, seguida de una capa intermedia llamada espuma de PVC, y finalmente la laminación adhesiva de PVC y una tela de algodón tejida. (Mayka Bautista, 2020)

2.1.2 Plastisol

Los plastisoles son mezclas compuestas principalmente por policloruro de vinilo y plastificante, lo cual genera un material gomoso y es utilizado comercialmente para recubrimientos, laminados, espumas, películas de plastisol, entre otros. Estos, pueden incluir aditivos que modifican características como la viscosidad, cargas para añadir propiedades como la resistencia al fuego y pigmentos para su coloración. (Nakajima, 2001)

Existen dos rutas diferenciadas para la preparación de vinil, la primera ruta implica la preparación de premezclas en estado sólido, ya sea mezclando termomecánicamente PVC con plastificante y estas premezclas son procesadas por técnicas habituales de fabricación como extrusión, moldeo por inyección, entre otros. (Nakajima, 2001)

La segunda ruta utiliza la premezcla en forma líquida, donde las partículas de PVC se dispersan en un plastificante y se agregan aditivos, cargas y pigmentos, formando el plastisol. (Nakajima, 2001) posteriormente, el plastisol es extendido sobre papel tipo reléase, el cual se encuentra en una banda transportadora continua, para formar una película. Esta capa, es laminada sobre la tela de respaldo y horneada entre 180 y 200 °C en un horno de transferencia de temperatura por convección continua. (Mayka Bautista, 2020)

Los fluidos newtonianos son aquellas mezclas donde la viscosidad es constante e independiente de la rapidez de deformación, por otra parte, existen los fluidos no newtonianos, los cuales presentan una dependencia a la rapidez de deformación (A. F. Méndez-Sánchez, 2010) y se clasifican en: seudoplásticos, fluido donde la viscosidad disminuye al incrementar la fuerza de cizalla y el caso contrario son los fluidos dilatantes, donde la viscosidad se incrementa al aumentar fuerza de cizalla. (PINTO, 2016) Los plastisoles son un ejemplo de fluidos no newtonianos y pueden poseer características dilatantes o seudoplásticos.

La viscosidad es el comportamiento de los fluidos bajo la acción de fuerzas aplicadas y es un tema de estudio del campo de la reología (Pérez-Trejo, 2010), para un plastisol la viscosidad está determinado por diversos factores, normalmente las partículas de resina son resultantes de un proceso de aglomeración durante el secado de la emulsión o microsuspensión acuosa original, generando resinas de diferentes tamaños, característica que determina la fuerza de resistencia ante el alto cizallamiento presente en las condiciones de mezcla de un plastisol. (Rasteiro, 2009) la viscosidad del plastisol decrece cuando el tamaño de partícula crece. (Marcilla, 1997)

El efecto de plastificante solvatante es la primera etapa de la formación de un plastisol, debido a la penetración del plastificante sobre las partículas, las hincha y aumentar su tamaño, una las partículas continuas mediante un proceso de percolación, disminuye la cantidad relativa de plastificante libre, hasta el punto de formar una mezcla homogénea. Este proceso genera una viscosidad resultante entre el tipo de estructura de la resina y la concentración que presenta con respecto al plastificante. (Boudhani H. L.-L., 2009)

La resistencia al cizallamiento junto al efecto plastificante solvatante establecen un aumento de la viscosidad con el tiempo, al que se le conoce como “viscosidad de envejecimiento” (Rasteiro, 2009)

Según Marcilla (1997), otro de los factores incidentes sobre la viscosidad de los plastisoles es la tasa de cizallamiento y la correlación entre las partículas primarias obtenidas, las cuales definen la viscosidad resultante.

Tabla 1 Tamaño de partícula promedio y fracciones de masa de partículas bajo 1,2 micras

Fuente: (Marcilla, 1997)

Resina	Tamaño promedio de la partícula de distribución (μm)	Tamaño promedio de la partícula menor a 2,2 μm (μm)	Fracción de masa de la partícula menor a 1,2 micrón (%)
ETINOX 420	3,6	1,3	8,6
ETINOX 430	2,7	1,2	13,4
ETINOX 440	2,6	1,4	8,4
ETINOX 450	3,4	1,4	3,1
HISPAVIC 367	2,9	1,2	11,2
HISPAVIC 373	3,8	1,1	7,7
HISPAVIC 376	4,1	1,6	2,2
MIRVYL 1172	3,2	1,7	2,2
MIRVYL 1302	2,8	1,7	3,3
MIRVYL 1702	3,0	1,6	2,1

La tabla I muestra diferentes resinas y su tamaño de partícula promedio, basado en esta característica es de esperar que después del cizallamiento, el ETINOX 420 presente viscosidad más baja que el ETINOX 440 y ETINOX 450, sin embargo los estudios realizados mostraron a ETINOX 420 con una viscosidad superior a estas dos resinas, Marcilla (1997) lo justifica mediante la obtención

de una mejor correlación, considerando la distribución granulométrica de las partículas primarias, mencionando que su tamaño de partícula primaria promedio puede ser de 0,1 a 1,5 μm , mientras que para ETINOX 440 y ETINOX 450 se han obtenido partículas de mayor tamaño por aglomeración de las partículas primarias. Lo que indica una buena correlación para partículas inferiores a 2,2 μm , disminuyendo la viscosidad al aumentar su tamaño medio de partícula primaria.

La influencia sobre la viscosidad que presenta la adición de una carga como el carbonato de calcio es dinámica, para ejemplificar, Abdesselam (2017) realiza un estudio sustituyendo el 47,6% de resina por un carbonato de calcio de tamaño de partícula de 9 μm , con la misma fracción de volumen sólido global que una preparación de 100% resina, y se observó un agudo aumento de la viscosidad a bajas velocidades de cizallamiento; en otro caso donde se sustituyó por partículas más gruesas de carbonato (20 y 30 μm) se observó una disminución de la viscosidad en todo el intervalo de velocidad de cizallamiento.

Abdesselam (2017) también menciona que la presencia de las partículas de relleno, provocan una desaparición del pico de dilatancia en las curvas de viscosidad en diferentes preparaciones de plastisol, además asegura que a altas velocidades de cizallamiento reducen la viscosidad de los plastisoles que poseen relleno en comparación a la formulación de PVC puro.

Por su parte, Boudhani (2007) asegura que otro factor importante a considerar es la temperatura, ya que esta determina el comportamiento de la transición sol-gel del plastisol, y se ve en aumento durante la exposición a la cizalla, esta transición se da en un área limitada de temperaturas y frecuencias y presenta una energía de activación de 195 kJ/mol aproximadamente, esto quiere decir, que el proceso sol-gel se da a una temperatura cercana a los 102°C.

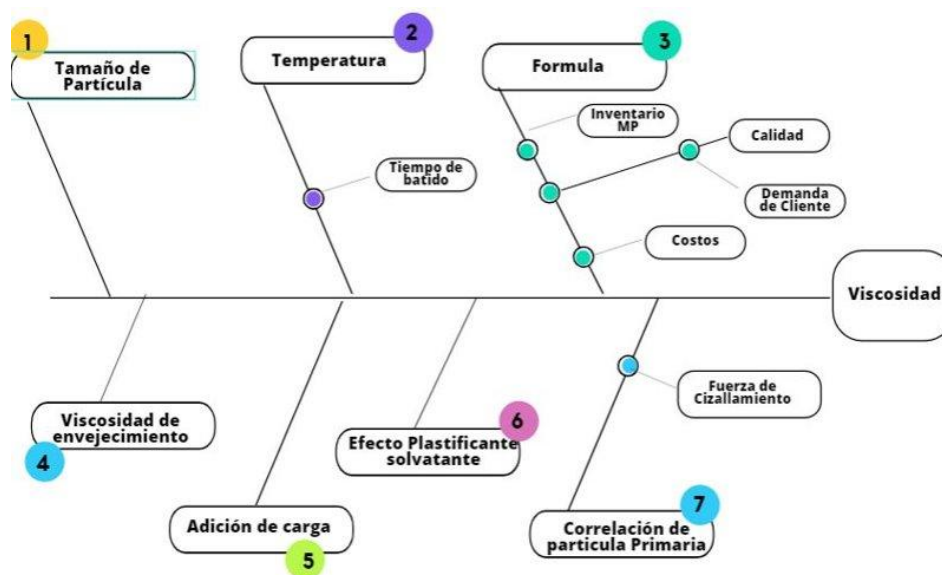


DIAGRAMA DE CAUSA Y EFECTO

Ilustración 2 Diagrama de causa y efecto sobre la propiedad viscosidad de un plastisol.

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Calidad

El sistema de gestión de calidad, en el mercado de textiles recubiertos, se enfoca en las necesidades que presentan el nicho de mercado que atiende. Para satisfacer las necesidades de los clientes, se debe utilizar materias primas que impactan características del plastisol, como la viscosidad.

Una de las características que requiere el mercado automotriz es la resistencia al fuego en el producto final, el uso de materias primas como Carbonato de Calcio o plastificantes como parafina clorada ayudan a cumplir la norma IATF 16949, norma que certifica la característica deseada (NQA, NQA Organismo de certificación Global, 2023), estas materias primas impactan la viscosidad del plastisol como partículas de relleno y tipos de plastificante a utilizar.

Un material antimicrobiano, es uno de los requisitos necesarios para la línea de textiles recubiertos destinados a equipos de marina, dado que son expuestos a condiciones que favorecen la proliferación de hongos y bacterias. Ser resistentes a microorganismos es evaluado mediante las pruebas IMO y son certificados por la norma MED (Hartwig, 2016), para cumplir este requisito se

utilizan biocidas en la mezcla del plastisol, este componente se encuentra disuelto en un plastificante, por lo tanto, la cantidad utilizada impacta directamente la viscosidad de la mezcla.

Una de las características requeridas más comunes entre los diferentes clientes, es la resistencia a la luz ultravioleta, debido a que el material será expuesto a la luz solar de manera directa o indirecta. El Vinil durante la exposición prolongada a la luz, sufre pérdida de propiedades como suavidad y durabilidad, convirtiéndose en un requisito de suma importancia para los clientes.

La resistencia a la luz ultravioleta es conseguida mediante la adición de un batch con un compuesto activo llamado Benzotriazol, este batch contiene además PVC y plastificante, modificando la viscosidad del plastisol dependiendo de la cantidad utilizada.

Esta propiedad es evaluada mediante la prueba QUV la cual, en pocos días o semanas, puede reproducir el daño que se genera durante meses o años al aire libre. EL equipo acelerado QUV expone los materiales a ciclos alternos de luz UV, condensación controladas y elevadas temperaturas para simular la intemperie en exteriores. (Q-Lab, 2023)

La proporción que se adiciona de plastificante con base en el peso total de la formula del plastisol, requiere de especial cuidado, ya que puede afectar tanto al cliente final como al cliente interno.

El cliente interno del departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PROQUINAL CR, es el departamento de producción.

La cantidad de plastificante agregado a la mezcla puede generarle al departamento de producción inconvenientes en la continuidad del proceso, ya que la adición escasa de plastificante puede generar viscosidades altas, aumentando la tensión superficial y por lo tanto al someterse a presiones en las cuchillas de generación se producen gotas, estas son aplicadas al producto y detectadas como defectos.

Por el contrario, si se adiciona un exceso de plastificantes, la viscosidad puede verse disminuida y al colocarse sobre el equipo de producción, la velocidad de generación producirá un exceso de aplicación sobre el material, consumiendo mayor cantidad de plastisol del requerido. Además, si la

viscosidad resultante es baja, existe la posibilidad de que no se pueda colocar sobre el equipo de generación, ya que puede ocasionar un derrame.

Por otra parte, los clientes externos pueden verse afectados por una adición incorrecta de plastificante, tanto la escasez como exceso de plastificante pueden afectar la tonalidad del color que se desea en el vinil, esta característica es controlada por el departamento de colores y es verificado en la tendencia requerida por el cliente mediante un colorímetro.

Otra característica determinante para el cliente externo, la cual puede ser afectada por la dosificación de plastificante en el plastisol, es una propiedad cualitativa la cual es evaluada comparando el vinil resultante del proceso de generación con una muestra aprobada por el cliente, sin embargo, se puede evaluar de forma cuantitativa mediante una prueba llamada stiffness, esta característica se le conoce como “mano” y es la dureza que presenta el material cuando se le aplica fuerza con la mano. (TESTEX, 2023)

El calibre es una propiedad que se controla mediante el uso de agentes hinchantes en el plastisol (espumas), entre mayor uso de estas materias primas, el producto adquiere mayor calibre y mayor suavidad, es una propiedad importante para el cliente tanto interno como externo, y se controla con la densidad resultante de la espuma. En el caso de cliente interno se tiene al departamento de producción, como al departamento de acabados.

En ambos clientes interno, si se posee menor calibre de lo esperado, no se alcanza la especificación deseada del cliente externo y por lo tanto el material no será aceptado. Si por el contrario el calibre es mayor de lo esperado, el material puede presentar defectos como: Mano suave (fuera del estándar), exceso de hinchamiento; lo que puede provocar burbujas en el departamento de acabados; reprocesos como la micro perforación, con el fin de evitar sobrespumación.

El cliente externo es exigente en las propiedades de calibre y mano, ambas están directamente relacionadas con el hinchamiento de la espuma, por eso el uso de agentes hinchantes debe ser cuidadoso.

2.1.4 Herramientas de Análisis

Para mantener un sistema de gestión de calidad se requiere el manejo de herramientas de análisis basadas en normas y modelos de gestión como la manufactura esbelta, la norma ISO 9001, el uso de diseño de experimentos y el adecuado análisis de datos mediante ANOVA.

2.1.4.1 Six Sigma

Six Sigma es una construcción de mejora continua que fue creada originalmente por Motorola en la década de 1970 como una respuesta al problema de la calidad deficiente de sus productos. Más tarde ganó popularidad tanto en manufactura como en servicios. (Sreedharan V., 2018).

Su principio está enfocado en minimizar los defectos presentes en un proceso, determinando y reduciendo sistemáticamente las causas raíz. Está impulsado de manera única por una comprensión cercana de necesidades del cliente, uso disciplinado de hechos, datos y análisis estadístico, y una diligente atención a la gestión. (Selvi, 2014)

Estadísticamente hablando, se enfoca en reducir la variación del proceso idealmente a un nivel equivalente a 3.4 defectos por millón de oportunidades (Augusto Cauchick Miguel, 2014)

Desde el punto de vista de la gestión de proyectos, Six Sigma es un conjunto de herramientas para eliminar defectos utilizando "Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar" o "Definir-Medir-Analizar-Diseñar-Validar" por un enfoque disciplinado basado en datos. (Sunder M, 2016).

2.1.4.2 DMADV

La Metodología DMADV, corresponde a las etapas de Definir-Medir-Analizar-Diseñar-Validar, y debe utilizarse cuando el cliente requiere la creación de un producto o servicio completamente nuevo, o bien una mejora de producto, un ajuste para cumplir especificaciones del proceso. (Selvi, 2014)

Selvi (2014) define las fases de la metodología de la siguiente manera:

- A. Definir: Los líderes del proyecto identifican los deseos y necesidades que se consideran más importantes para los clientes, basados en la información histórica, comentarios de los clientes y otras fuentes de información.
- B. Medición: La segunda parte del proceso es usar las métricas definidas para recopilar datos y registrar especificaciones de una manera que pueda utilizarse para ayudar a impulsar el resto del proceso.
- C. Análisis: El producto o servicio terminado es probado por equipos internos para crear una línea de base para la mejora. Los líderes usan datos para identificar áreas de ajuste dentro de los procesos que brindarán mejoras en la calidad o el proceso de fabricación de un producto o servicio terminado. Los equipos establecen los procesos finales y hacen los ajustes necesarios.
- D. Diseño: Los resultados de las pruebas internas se comparan con los deseos y necesidades del cliente. Se realizan los ajustes adicionales necesarios. El proceso de fabricación mejorado se prueba y los grupos de prueba de clientes brindan comentarios antes de que el producto o servicio final se lance ampliamente.
- E. Verificación: La última etapa de la metodología consiste en realizar un seguimiento de los comentarios continuos de los clientes sobre el producto o servicio mejorado. Los nuevos datos pueden conducir a otros cambios que deben abordarse, por lo que el proceso inicial puede conducir a nuevas aplicaciones de DMADV en áreas posteriores.

2.1.4.3 Diseño de experimentos

El proceso que consiste en plantear los pasos necesarios que se deben seguir, así como el orden de estos, para una recolección y posterior análisis de la información que requiere estudiar un problema de investigación, se conoce como diseño de experimentos. Su objetivo es el de obtener el máximo de información requerida por el experimento con el mínimo coste y la máxima eficiencia (Díaz, 2009)

Bao Fernández (2020), describe las etapas del diseño de experimentos

- A. Reconocimiento y formulación del problema: Se desarrollan todas las ideas sobre el objetivo del experimento y se solicita información a todas las áreas involucradas, ingeniería, calidad, manufactura, administración, entre otros.
- B. Selección de los factores y niveles: Se seleccionan las variables independientes que se puedan controlar y estén relacionadas al sistema en análisis. Existen los factores potenciales de proceso, los cuales el analista desea variar y los factores perturbadores del proceso, los cuales son variables que pueden tener un efecto sobre la respuesta y no existe ningún interés sobre ellos.
- C. Selección de las variables de respuesta: Esta debe ser aquella que proporcione la información útil, con la solución al problema definido.
- D. Selección del diseño experimental: se deben resolver dos interrogantes, ¿el tamaño adecuado de la muestra? Y ¿Qué tipo de diseño conduce al resultado optimo?
- E. Realización del experimento: En esta etapa se realiza el experimento y se recogen los datos, teniendo el cuidado del uso adecuado de los instrumentos al reconocimiento de las unidades experimentales, y fundamentalmente al mantenimiento en la forma más uniforme posible de las condiciones ambientales del experimento.
- F. Análisis de los datos: Deben utilizarse métodos estadísticos para analizar los datos recogidos, el método que se escoja debe ir acorde con el diseño utilizado.
- G. Conclusiones y recomendaciones: Después de analizar los datos se establecen las inferencias estadísticas, las cuales deben traducirse al lenguaje del experimento para darle la correspondiente interpretación física y evaluar su significación práctica.

2.1.4.4 Diseño de experimentos factoriales

El termino experimento factorial o arreglo factorial hace referencia a la constitución de los tratamientos o combinaciones de tratamientos que se desean comparar. Este término no afecta lo que se conoce como diseño de tratamientos, pues este se refiere a la selección de factores que se desean estudiar los niveles de los factores a ensayar y combinaciones de estos. (Melo Martínez, 2007)

Los experimentos 2^n son familias de ensayos con n factores y dos niveles dentro de cada uno de ellos que generalmente representan intervalos de variabilidad muy amplios en estudios exploratorios, cuando no existe o cuando hay poca información publicada y consecuentemente, es deseable rediseñar su investigación con un subconjunto más importante. (Pérez López, 2021)

2.2 Marco contextual

La historia del PVC comienza en 1835, cuando V. Regnault sintetizó el monómero por primera vez, 20 años más tarde el químico alemán F. Latte registró una patente y en 1912 comenzó a implementarse a escala industrial. (WYPYCH, 1985)

Para la segunda Guerra Mundial se desarrolla la tecnología vinílica, se utilizaba como material aislante, presentaba buen comportamiento ante el envejecimiento, buena resistencia química y resistencia al calor, además, era un material ligero. Alemania aprovecha estas características y lo utilizó para fabricar lienzos, para cubrir camiones militares y vías férreas, fabricar gabardinas repelentes del agua y aceites, guantes, suelas de zapatos, entre otros. (Beltrán, 1995)

Para 1960 el MERCOMUN o mercado común centroamericano da inicio al desarrollo de la maquila de textiles en centro América con la adopción por parte de los países del istmo del Modelo de Sustitución de Importaciones. Las inversiones de industrias maquiladoras en la región provienen, principalmente, de Estados Unidos y países asiáticos, las empresas norteamericanas vienen atraídas por las diferencias en los costos de mano de obra, mientras que las asiáticas aparte de esta primera, vienen en busca de las cuotas de importación al mercado estadounidense. Los países como Guatemala y Nicaragua domina el capital asiático, sobre todo coreano. Por otra parte, Costa Rica sobresale en el capital estadounidense y en El Salvador el capital nacional. (Obando, 2002)

Entrado en vigor el Tratado de Libre Comercio entre la Republica de Colombia y la Republica de Costa Rica, se abren las puertas a las empresas colombianas de participar de uno de los mercados más importantes en Centro América. (Gómez Castro, 2022) lo que le permite a PROQUINAL, llegar a Costa Rica y continuar desarrollándose.

Nuvant es una de las compañías importantes en la manufactura de textiles recubiertos de alta resistencia, se crea en 1966 con el nombre de Plástiquímica, atiende mercados como automotriz, tapicería para interiores y línea marina. Es una compañía ubicada en Sabaneta, Colombia y su principal línea de manufactura se basa en plastisoles. (Nuvant, 2023)

El grupo Kopelle, compañía colombiana, es un fuerte competidor en el mercado de manufactura de telas vinílicas, atiende diferentes líneas de negocios como marroquinería, calzado, tapicería y artículos deportivos. (KOPELLE Coating and Service, 2023) realizan la producción basados en el sistema de plastisoles. (PINTO, 2016)

Proquinal, Nuvant y grupo Kopelle, son compañías que se mantienen a la vanguardia en el mercado de textiles recubiertos, para ello deben cumplir con normas internacionales que les permiten llegar a los diferentes nichos de mercado, normas como IATF, normas MED y un sistema de gestión de calidad que cumpla con lo establecido en la ISO 9001.

Para que estas compañías logren cumplir con los estándares internacionales de las diferentes normas, requieren aplicar el uso de la metodología Six sigma en sus procesos, los cuales son una preparación de mezclas homogéneas que requieren dos equipos básicos:

- Un mezclador el cual cuenta con dos partes, el motor y el tablero eléctrico. Las aspas de este equipo son de acero inoxidable y en forma de disco dentado.
- El segundo equipo, llamado Hidrobat, está compuesto por una mezcladora y una bomba de vacío para la succión de aire. (PINTO, 2016)

Capítulo III Marco Metodológico

En esta sección se realiza un planteamiento estructurado de actividades y estrategias que permiten asegurar el cumplimiento de los objetivos planteados. El desarrollo metodológico asegura la adquisición de conocimiento incremental y el desarrollo organizado de las metodologías propuestas.

3.1.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo del sistema de control de procesos en el departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PROQUINAL CR, se debe plantear una investigación de tipo cuantitativa, porque se propone utilizar herramientas como: gráficos de control, Pareto, histogramas, entre otros. Y su impacto será sobre la eficiencia y eficacia del proceso. Este proyecto contempla establecer un diagnóstico del proceso actual y realizar una comparación con las mejoras propuestas basado en un diseño de experimentos de dos niveles y tres variables, las cuales serán elegidas dependiendo de la capacidad de incidencia y manipulación que se tenga sobre la misma.

3.1.2 Definición de los elementos de estudio

Los elementos de estudio de este proyecto de graduación se presentan a continuación:

- El impacto que genera las Taza de cizallamiento, tiempo de reposo y tiempo de batido sobre la variabilidad de la viscosidad la CAPA SPECIAL
- Uso de instrumentos de selección, seguimiento y control, y su impacto sobre la eficiencia y eficacia del proceso
- Impacto del control de proceso propuesto sobre la productividad la CAPA SPECIAL

3.1.3 Diseño Metodológico

La siguiente tabla resume las principales actividades por fase, posibles herramientas y resultados esperados para asegurar el cumplimiento de los objetivos.

Tabla 2 Tabla de resumen de fases del DMADV.

Fuente: Autoría propia

Objetivo	Fase	Actividades	Herramientas	Resultados esperados
Diagnóstico	Definir	<ul style="list-style-type: none"> Definición de variables para el diseño de experimentos Definición del alcance del proyecto Definición de roles y responsables Definición de indicadores del proyecto Definición de Stakeholders Definición de variables 	<ul style="list-style-type: none"> Project charter Diagrama de flujo Definición de variables para el diseño de experimentos 	Diagnostico integral del estado actual del proceso
	Medir	<ul style="list-style-type: none"> Detecciones de errores Procedimientos técnicos para la elaboración de plastisoles Base de datos históricos de comportamientos de viscosidad y densidad Plan de recolección de Datos 	<ul style="list-style-type: none"> Hojas de recolección de datos Histórico de viscosidad Histogramas Análisis estadístico Validación estadística (p-value) 	Base de datos relacionados al proceso productivo y variables de impacto
	Analizar	<ul style="list-style-type: none"> Análisis estadístico descriptivo Impacto de eficiencia del proceso Impacto de eficacia del proceso Análisis de etapa del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> Gráficos de control Casa de la calidad 	Determinar las oportunidades de mejora del proceso productivo
Diseño	Diseñar	<ul style="list-style-type: none"> Puntos de control Métodos de inspección Diseño de nuevo modelo Establecimiento de indicadores 	<ul style="list-style-type: none"> Resultados del diseño de experimentos Minitab Estadística descriptiva 	Nuevo sistema de control de procesos
Validación	Validar	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de viabilidad del nuevo sistema de control Validación del impacto del nuevo sistema sobre los indicadores de eficiencia y eficacia Proyección de la mejora si el sistema de control es implementado 	<ul style="list-style-type: none"> Resultados obtenidos Estadística básica 	sistema de control de proceso para la CAPA SPECIAL.

Capítulo IV Desarrollo y Resultados

4.1 Definir

4.1.1 Project Charter

Se establece el alcance del proyecto y los aspectos críticos del cliente para la calidad, con el fin de delimitar el inicio y el final del proyecto mediante la herramienta del Project charter, a continuación, descrita

Tabla 3 Acta de definición de proyectos

Autor: Elaboración Propia

Fecha:	Nombre del Proyecto:	Versión:
Mayo, 2023	Desarrollo de un sistema de control de proceso la CAPA SPECIAL con el fin de reducir los desperdicios incurridos durante su manufactura.	1
Director del Proyecto:	Equipo del proyecto:	Otros Interesados:
Jesús Mora Arrieta	Bach. Jesús Mora Arrieta	Jefe del departamento técnico
Patrocinador:		Jefe del departamento de plastisoles y compuestos
PROQUINAL CR		Departamento de Mejora Continua
Stakeholders:		
Departamento de plastisoles y compuestos		
Departamento Técnico		
Director Técnico Regional		
Descripción del proyecto		
Antecedentes:		
Durante el proceso de producción, cerca del 85% de los plastisoles en transparente, que llegan al departamento técnico, no cumplen con las especificaciones de viscosidad o densidad, esto implica que deben ser arreglados, y a su vez, que se debe consumir materia prima no contemplada dentro del presupuesto del producto final.		
Descripción:		
<ul style="list-style-type: none"> Batidores industriales y batidores de laboratorio Balanzas industriales, balanzas granatarias y balanzas analíticas Procesos de Calidad, inspección de viscosidad y densidad Proceso de adición de color y ajuste de tono Proceso de ajuste de viscosidad o densidad 		
Objetivo General:		
Desarrollar un sistema de control de proceso para la CAPA SPECIAL con el fin de reducir los desperdicios incurridos durante su manufactura.		
Objetivos específicos:		
<ul style="list-style-type: none"> Analizar el proceso de manufactura de la CAPA SPECIAL para identificar las variables que más impactan la variabilidad en la viscosidad y densidad mediante el uso de herramientas estadísticas. Diseñar un sistema de control de proceso basado en las variables más influyentes sobre la viscosidad de la CAPA SPECIAL para mejorar la eficiencia y eficacia del proceso de manufactura 		

<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el sistema de control propuesto en la etapa de diseño, mediante un plan piloto que permitan cuantificar la reducción de la variabilidad de la viscosidad de la CAPA SPECIAL para evidenciar la mejora en la eficiencia y eficacia del proceso de manufactura de los plastisoles. 		
Requisitos	Solicitado por	Importancia (A, M, B)
Evaluación del proceso productivo de la CAPA SPECIAL	Jesús Mora Arrieta	Media
Evaluación del comportamiento histórico de las variables densidad y viscosidad de la CAPA SPECIAL	Director técnico Regional	Media
Planteamiento de un control de proceso para reducir un 30 % de reprocesos para los plastisoles CAPA SPECIAL	Jefe del Departamento técnico y del departamento de preparación de compuestos y plastisoles	Alta
Reuniones para definir prioridades en las mejoras y cómo estas se podrán llevar a cabo.	Departamento de Mejora Continua	Media
Ensayos de Producción para validar las propuestas de mejor en el proceso productivo en el departamento de plastisoles y compuestos	Jesús Mora Arrieta	Alta
Evaluación de las variables viscosidad y densidad a nivel de laboratorio una vez aplicado el control de proceso propuesto.	Jesús Mora Arrieta y jefe del departamento técnico	Alta
Plazo de entrega del producto final:		
<ul style="list-style-type: none"> • 16 semanas para su definición, análisis y determinación de pautas de implementación • 12 semanas para el plan de ejecución y comunicación. • 4 semanas como mínimo para seguimiento y control. 		
Beneficios:		
<ul style="list-style-type: none"> • Costos: Reducción de Materia Prima invertida en ajuste • Eficiencia: Disminución de costos operativos al disminuir el tiempo de reprocesos • Calidad: mejoramiento de la calidad del producto que se fabrica 		
Criterios de aceptación: (condiciones a cumplirse para que el cliente acepte el entregable)		
<ul style="list-style-type: none"> • Debe cumplir con las especificaciones del producto. • Disminución de al menos un 20% de la de la variabilidad en la viscosidad del plastisol • Mejoramiento de la eficiencia del proceso productivo, reduciendo la cantidad de reproceso en al menos un 20% 		
Exclusiones: (qué no se incluye en el proyecto)		
<ul style="list-style-type: none"> • Honorarios adicionales • Capacitaciones 		
Restricciones: (personal y maquinarias disponibles, fecha límite de entrega, flujo de fondos mensual, cultura organizacional, etc.)		
<ul style="list-style-type: none"> • No exceder la cantidad de tiempo brindado por el personal de apoyo para las mejoras. • Fecha límite de entrega del planteamiento del proyecto 		
Prioridades (colocar 1º, 2º, 3º): <u> 1 </u> Costo / <u> 2 </u> Tiempo / <u> 3 </u> Alcance		
Supuestos:		
<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al cambio por parte de los otros departamentos • Necesidad de capacitaciones para el personal 		
Director del Proyecto:	Firma:	
Jesús Mora Arrieta	Jesús Mora Arrieta	

4.1.2 Definición de variables para el diseño de experimentos

Para definir las variables del proceso que serán parte del diseño de experimentos, se debe aclarar lo siguiente:

- Calidad de la materia prima: la compañía presenta una política de calidad sobre la materia prima donde establece la periodicidad de análisis dependiendo de la constancia del cumplimiento de especificación. Las materias primas se analizan anual, mensual o durante cada ingreso a la compañía y se verifican diferentes especificaciones como índice de refracción, color y tonalidad y análisis de residuos con malla 325.
- Formulación: La compañía ha construido mediante la experiencia, pruebas de planta y características necesarias del cliente, las diferentes fórmulas utilizadas en producción y garantiza el comportamiento óptimo mediante las pruebas de evaluación de viscosidad realizadas en el laboratorio.

Una vez garantizado los puntos de calidad de materia prima y formulación del plastisol, se puede definir las variables del proceso de transformación que será analizado mediante el diseño de experimentos.

El flujo de proceso mostrado en la Ilustración 1 será delimitado en la etapa de producción del plastisol en transparente, en esta etapa se poseen dos vías de producción, preparaciones manuales o preparaciones en diluidor.

Dado que la CAPA ESPECIAL es uno de los productos más utilizados en la compañía, sus preparaciones rondan entre los 2000 y 5000 Kg, se desarrollará el diseño de experimentos sobre el diluidor, con el fin de generar un mayor impacto sobre el proceso.

Tabla 4 Definición de variables y condiciones para la aplicación del diseño de experimentos sobre el diluidor

Factores	Diluidor	Niveles	
		-	+
A	Revoluciones por Minuto (fuerza de cizallamiento)	900 rpm	1000 rpm
B	Tiempo de batido	25 min	45 min
C	Masa	2000 kg	5000 kg
D	Altura del aspa	12	15
E	Tiempo de espera para la medición	15 min	60 min

Con base en la cantidad de variables establecidas y con el fin de reducir el error sobre el experimento, se establece un diseño de experimentos factorial 2^5 y; amparado en el principio de escasez y jerarquía, el cual establece que del total de efectos estudiados en un experimento solamente entre el 20% y el 30%, se encuentran activos. (George E. P. Box, 1986), se realizará una sola replica. Dado el evento que los resultados sean insuficientes se puede acudir a un diseño experimental bloqueado por replica, llevándose a cabo una segunda replica. Los Resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 8 y se realizaron con base en los datos de la tabla 5, los cuales conservan las proporciones a escala de las variables de la tabla 4, se realiza a escala para establecer la optimización del experimento y validar sobre el proceso productivo.

Tabla 5 Definición de variables y condiciones para la aplicación del diseño de experimentos sobre el diluidor

Factores	Variables de Laboratorio	Niveles	
		-	+
A	Revoluciones por Minuto (fuerza de cizallamiento)	900 rpm	1000 rpm
B	Tiempo de batido	10 min	18 min
C	Masa	200 g	500 g
D	Altura del aspa	0,5 cm	1 cm
E	Tiempo de espera para la medición	2 min	8 min

Tabla 6 Niveles establecidos de los Factores del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio

Número de Corrida	A	B	C	D	E	Etiqueta de Corrida
1	900	10	200	0,5	2	1
2	1000	10	200	0,5	2	A
3	900	18	200	0,5	2	B
4	1000	18	200	0,5	2	AB
5	900	10	500	0,5	2	C
6	1000	10	500	0,5	2	AC
7	900	18	500	0,5	2	BC
8	1000	18	500	0,5	2	ABC
9	900	10	200	1	2	D
10	1000	10	200	1	2	AD
11	900	18	200	1	2	BD
12	1000	18	200	1	2	ABD
13	900	10	500	1	2	CD
14	1000	10	500	1	2	ACD
15	900	18	500	1	2	BCD
16	1000	18	500	1	2	ABCD
17	900	10	200	0,5	8	E
18	1000	10	200	0,5	8	AE
19	900	18	200	0,5	8	BE
20	1000	18	200	0,5	8	ABE
21	900	10	500	0,5	8	CE
22	1000	10	500	0,5	8	ACE
23	900	18	500	0,5	8	BCE
24	1000	18	500	0,5	8	ABCE
25	900	10	200	1	8	DE
26	1000	10	200	1	8	ADE
27	900	18	200	1	8	BDE
28	1000	18	200	1	8	ABDE
29	900	10	500	1	8	CDE
30	1000	10	500	1	8	ACDE
31	900	18	500	1	8	BCDE
32	1000	18	500	1	8	ABCDE

En la tabla 6 se encuentra el encabezado “etiqueta de corrida”, el cual indica en letra mayúscula el factor que se estableció en el mayor nivel durante la corrida y por ende la interacción entre los mismos.

4.2 Medir

4.2.1 Histórico de Viscosidad

Se extrae una base de datos con las viscosidades la CAPA ESPECIAL de los años 2022-2023 y se analiza únicamente las fórmulas vigentes de trabajo

4.2.1 Análisis estadístico del historial de viscosidad del plastisol CAPA ESPECIAL en transparente

Tabla 7 Estadística descriptiva del historial de viscosidad del plastisol CAPA ESPECIAL en transparente

Variable	Formula	Conteo total	N	N*	N acumulado	Porcentaje
Visc. Transparente	548	62	62	0	62	100
Porcentaje acumulado	Media	Error estándar Media	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de Variación	Suma
100	9299	542	4270	18231188	45,92	576550
Suma de cuadrados	mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango
6473552500	3500	5875	8425	12425	20000	16500
Rango intercuartílico	Moda	N de Moda	asimetría	Curtosis	Media de las diferencias sucesivas al cuadrado	
6550	16000	3	0.70	-0,27	16187828	

Para el análisis estadístico de la CAPA ESPECIAL en transparente, se utilizó un total de 62 muestras, las cuales presentaron media de 9 299 cP, una moda de 16 000 cP y una mediana de 8 425 cP, dando como resultado una asimetría positiva la cual es apreciable en la ilustración 3 y en la ilustración 6.

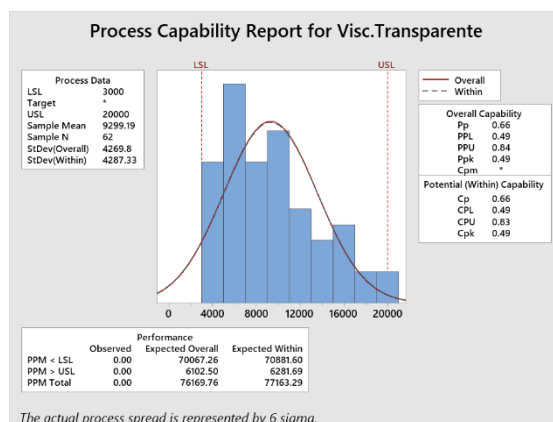


Ilustración 3 Histograma de viscosidad de la CAPA ESPECIAL en transparente con curva de normalidad

Por otra parte, la Curtosis = - 0,27 muestra una forma platicúrtica, lo cual demuestra una concentración en torno a la media baja, es decir, presenta una distribución más achatada que la distribución normal.

Los valores de $C_p = 0,66$ y $C_{pk}=0,49$ reflejan un proceso capaz para generar productos dentro de especificación, pero al ser el C_p mayor que el C_{pk} se determina que la media está más cerca de uno de los límites de especificación.

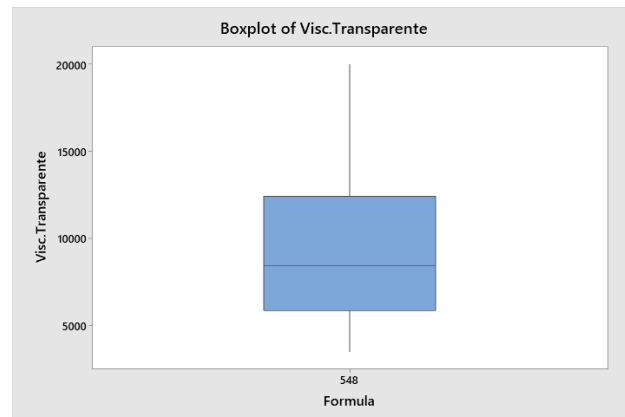


Ilustración 4 Diagrama de cajas de viscosidad de CAPA SPECIAL en transparente

El coeficiente de variación de la CAPA SPECIAL es de 45,92, el cual refleja una no homogeneidad en los datos y se puede observar en la ilustración 10.

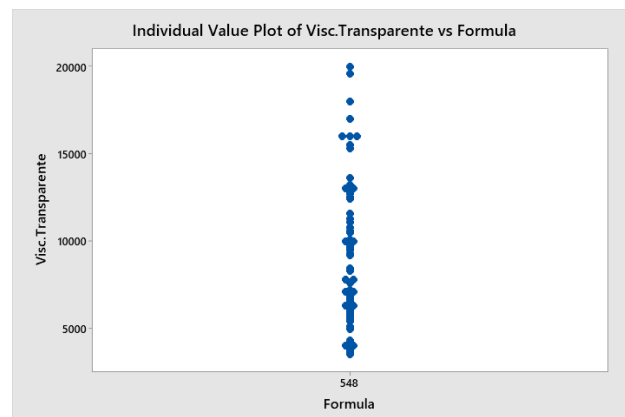


Ilustración 5 Gráfico de valor individual de la viscosidad de la CAPA SPECIAL en transparente

Para realizar una prueba de normalidad Anderson-Darling, se realizan los siguientes supuestos con un nivel de significancia del $\alpha=0,05$, $H_0=$ No posee una relación Normal y $H_1=$ Posee una relación

En la Ilustración 6 se puede observar la aplicación de la prueba Anderson Darling, dando como resultado un $p\text{-Value}= 0,008$ al ser menor a la significancia indica que hay evidencia suficiente para rechazar H_0 indicando que el proceso es normal

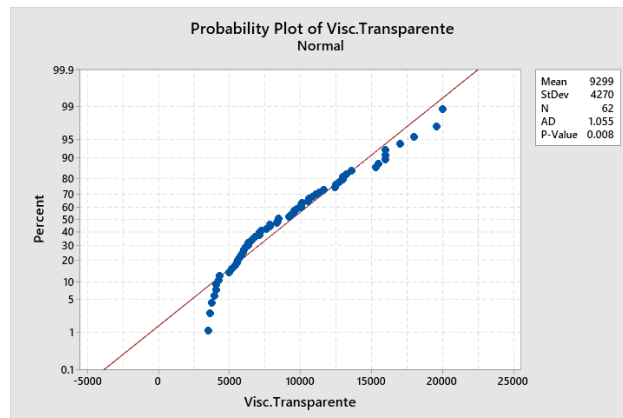


Ilustración 6 Prueba Anderson-Darling para la viscosidad de CAPA ESPECIAL en transparente

Se realiza una gráfica de la base de datos de viscosidad para determinar el comportamiento de la capa Special a lo largo del tiempo, dando como resultado la Ilustración 7.



Ilustración 7 Gráfica de control de viscosidad de la formula vigente de trabajo de la capa Special en los años 2022-2023

4.3 Analizar

Se decide analizar la totalidad de los datos recolectados a lo largo del 2022 y 2023 con respecto a la formula vigente de trabajo, esto quiere decir que es la fórmula que la compañía establece como adecuada para producción basado en el desempeño de materia prima, calidad y satisfacción del cliente final. La base de datos consta de un total de 62 preparaciones, lo que permite estimar de forma más precisas los parámetros de proceso.

El análisis de estadística descriptiva indica una media de 9 299 cP, el cual es sensible a los valores de mayor magnitud, sin embargo, al ser cercano a la mediana 8 425 cP, indica que las mediciones en la base de datos no son valores extremos.

A pesar de que no son valores extremos, la forma platicúrtica indica una distribución a lo largo del rango establecido de viscosidad, con tendencia a tener valores por encima de la media, esto se puede observar en la asimetría positiva presente en la curva, no obstante, es importante considerar que existe una probabilidad del 50% de obtener tanto valores mayores o menores a 8 425 cP La ilustración 4, muestra un boxplot donde se puede visualizar el comportamiento descrito.

El proceso es capaz de generar productos dentro de especificación, como bien lo señala el Cpk y Cp, sin embargo, al tener un coeficiente de variación superior al 30%, se indica una variabilidad del proceso alta, esta se puede visualizar en la ilustración 5 y la ilustración 7, y con oportunidad de mejora al controlar las variables de manera precisa.

La prueba de normalidad Anderson-Darling indica un p-Value menor a la significancia, señalando un comportamiento Normal, dado que existe evidencia suficiente para rechazar H_0 .

Una vez establecido el comportamiento de la viscosidad en el proceso productivo, se puede observar en la QFD presente en la ilustración 14, en el anexo, el impacto sobre el producto final y la satisfacción del cliente interno y cliente final.

Para el cliente final se presentan los requerimientos de resistencia a los microorganismos y la protección ultravioleta, ambas exigencias son satisfechas por medio de la utilización de materias primas específicas, las cuales son contempladas en la formulación de la capa Special y su uso posee una relación directa con la viscosidad, dado que aportan una cantidad de plastificante. Por la misma razón, se debe pesar la cantidad precisa, pues el exceso de estas materias primas disminuye la viscosidad y, por el contrario, el uso reducido aumenta la viscosidad del plastisol.

La calidad de las materias primas utilizadas debe ser adecuadas, si la calidad es baja se requiere el aumento en la cantidad de la materia prima para satisfacer la necesidad del cliente y con ello, una modificación de la formula alterando la variabilidad de la viscosidad hasta encontrar la estabilidad productiva de la misma.

En el caso del cliente interno, los requerimientos principales son: la correcta dispersión de las materias primas en el plastisol, con el fin de evitar defectos como grumos y altas viscosidades por un batido inadecuado; viscosidad adecuada, dado que una viscosidad muy baja o inadecuada podría realizar un derrame en el equipo de producción, una alta viscosidad puede provocar inconvenientes productivos y defectos en el producto final como la producción de gotas por la alta atracción molecular presente; y finalmente temperaturas menores a 40°C, dado que si no se cumple esta condición se alcanzará la temperatura de gelificación y el plastisol se solidificará antes de lo requerido.

Para poder satisfacer las necesidades del cliente interno, se requiere controlar variables de proceso como revoluciones por minuto, tiempo de batido, masa a producir, altura del aspa del batidor y el tiempo de espera al realizar la medición. Estas variables están relacionadas teóricamente de manera directa con la viscosidad y se eligieron para controlar el impacto sobre la viscosidad tanto individualmente como las diferentes interacciones que puedan presentar.

Las evaluaciones de importancia, llevadas a cabo en el QFD del proceso productivo del plastisol Capa Special en Proquinal CR adjuntas en el anexo, establecen que las variables más importantes a considerar son revoluciones por minuto, tiempo de batido, masa a producir. Contemplando la relación que presentan con las necesidades del cliente y clasificándose en una escala donde 1 es una interacción débil, 5 una interacción mediana y 9 una interacción fuerte.

La gráfica de evaluación de competencias presente en el QFD, señala que únicamente “nosotros” es sobresaliente en el control de la temperatura de los plastisoles e indica los requerimientos de los clientes que deben analizarse con miras a atender las oportunidades de mejora presentes para sobresalir a la competencia, para este análisis se consideró como competencia en el caso del cliente interno la preparación de otros plastisoles semejantes a la capa Special, con el fin de generar un competidor directo y en igualdad de condiciones.

4.4 Diseñar

El diseño de experimentos establecido en este proyecto posee como objetivo analizar el proceso de producción de la CAPA SPECIAL para desarrollar un sistema de control de proceso con el fin de reducir los desperdicios incurridos durante su manufactura.

La determinación de las variables respuesta se observan en la tabla 8, la variable viscosidad presentó un rango de respuesta entre los 2 500 a los 26 150 cP, semejante al rango presentado a nivel industrial, entre 3 000 y 20 000 cP

Tabla 8 Resultados obtenidos del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio

Numero de Corrida	Viscosidad	Temperatura	Tipo de Corrida
1	9950	28,5	Exitosa
2	5850	29,6	Exitosa
3	4100	29,4	Exitosa
4	4250	29,2	Exitosa
5	16800	26,8	Exitosa
6	7650	26,7	Exitosa
7	3800	28,2	Exitosa
8	3400	29	Exitosa
9	20150	26,4	Fallida
10	25950	25,5	Fallida
11	22400	26,3	Fallida
12	14750	26,5	Fallida
13	4600	27,8	Exitosa
14	6250	28,3	Exitosa
15	3200	28,9	Exitosa
16	3400	29,5	Exitosa
17	7350	28,6	Exitosa
18	7100	27,6	Exitosa
19	5000	27,7	Exitosa
20	3400	30	Exitosa
21	5150	28,5	Exitosa
22	5000	29,2	Exitosa
23	2500	30,7	Exitosa
24	3050	30,8	Exitosa
25	26150	25,7	Fallida
26	21600	26,3	Fallida
27	17800	26,2	Fallida
28	17350	26,2	Fallida
29	6500	28,3	Exitosa
30	8200	28,8	Exitosa
31	4100	29,3	Exitosa
32	4200	28,7	Exitosa

Es importante considerar que existen corridas determinadas como fallidas, debido a la relación que hay entre la variable masa, la cual se encuentra en su menor nivel, y la variable altura del aspa, la cual presenta el mayor nivel, generando un fallo físico que incumple uno de los principios básicos del diseño de experimentos que corresponde a la igualdad de condiciones en todas sus corridas, dado que el aspa no alcanza a batir la masa con homogeneidad y basado en criterio experto, se considera un batido incompleto y por lo tanto una corrida fallida.

Durante el análisis estadístico, se realizó una regresión factorial y se determina los valores residuales, los cuales establecen la diferencia entre los valores observados de la base de datos y los valores estimados calculados con la ecuación de regresión.

Los valores de residuos establecen las gráficas de la ilustración 8, donde se observa un histograma con valor atípico en 6 000, complementándose con la distribución en la gráfica de probabilidad normal que menciona valores atípicos. Por otra parte, la gráfica de vs ajuste, no presenta un patrón visible dando una distribución aleatoria y con varianza constante, además se puede observar que los residuos son independientes entre sí, según la gráfica vs orden.

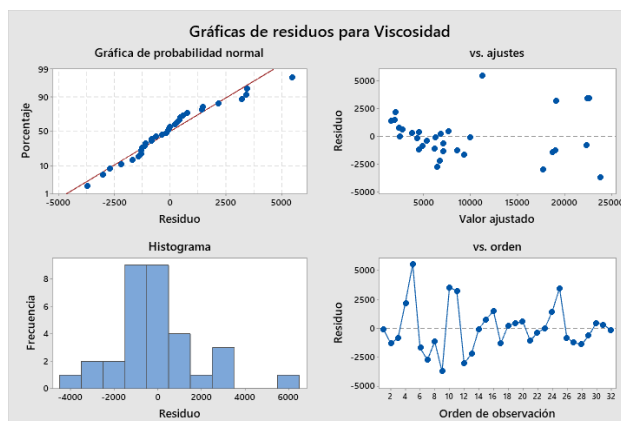


Ilustración 8 Gráficas de residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio para la variable viscosidad

El análisis del diagrama de Pareto de efectos estadísticos estandarizados establece que, en el diseño de experimentos, las variables más relevantes e influyentes sobre la viscosidad son B, D, C y la interacción de CD.

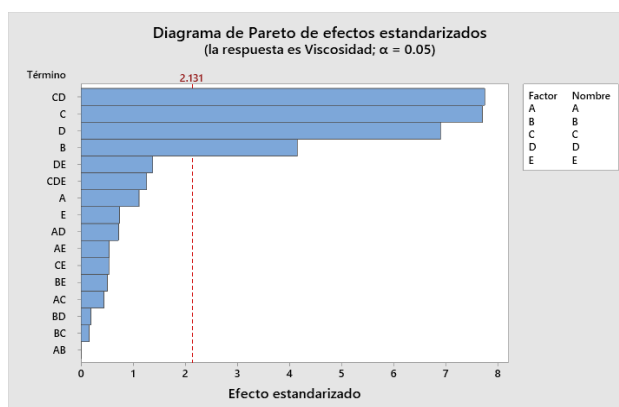


Ilustración 9 Diagrama de Pareto de efectos estadísticos estandarizados para los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones de laboratorio

La distancia de Cook, es utilizada en análisis de regresión para encontrar valores atípicos, los cuales influyen de manera negativa el modelo de regresión. En la tabla 9, se observan los resultados de dichas distancias con relación a cada corrida, los valores superiores a la mediana de la distribución (Minitab, 2023) , para este caso 0,5, son considerados influyentes.

Tabla 9 Resultados de las distancias de Cook en los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio

Orden Corrida	COOK	Orden Corrida	COOK
1	0,01259	17	0,01372
2	0,09250	18	0,09552
3	0,04232	19	0,04437
4	0,15812	20	0,16206
5	0,24902	21	0,24414
6	0,09431	22	0,09131
7	0,16444	23	0,16048
8	0,04562	24	0,04354
9	0,25894	25	0,26398
10	0,49112	26	0,49804
11	0,36285	27	0,36880
12	0,63092	28	0,63876
13	0,01048	29	0,00950
14	0,00802	30	0,00893
15	0,00008	31	0,00002
16	0,03352	32	0,03534

La prueba de Cook, determinó que las corridas 9, 10, 11, 12, 25, 26, 27 y 28, son valores influyentes en la regresión de forma negativa, coincidiendo con las corridas consideradas como fallidas en la tabla 8. Estableciendo una justificación estadística y física, para la exclusión de dichas corridas.

Una vez ajustada la base de datos, se realiza un análisis de los residuos de regresión factorial, dando como resultado la eliminación de la variable tiempo de batido como relevante y dejando únicamente Masa, Altura del aspa y su interacción, como se muestra en la ilustración 10.

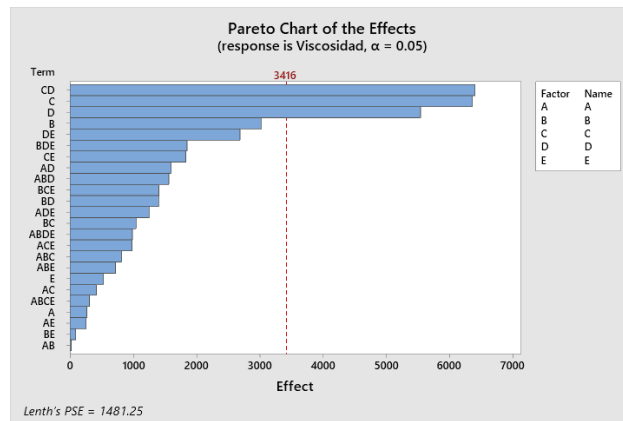


Ilustración 10 Diagrama de Pareto de efectos estadísticos estandarizados para los residuos de los resultados del diseño de experimentos con condiciones de laboratorio ajustados sin corridas fallidas

Conociendo que el proceso es normal, se lleva a cabo el análisis de varianza mediante la prueba F, para determinar el grado de homocedasticidad.

Se establece $H_0 =$ Todas las varianzas son iguales y $H_1 =$ por lo menos una varianza es diferente.

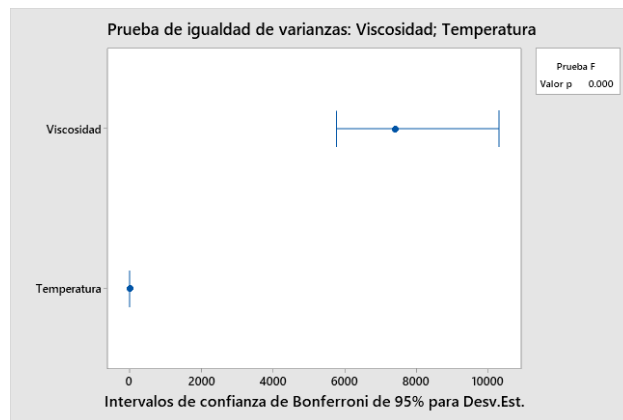


Ilustración 11 Análisis de homocedasticidad para la viscosidad y temperatura

En la ilustración 11, se puede observar los resultados obtenidos en la prueba de igualdad de varianzas, dando un valor de significancia de 0,05 y un p-Value = 0,000, al ser el p-Value menor que la significancia en la prueba F se rechaza la hipótesis nula, estableciendo que al menos una varianza del error del modelo es distinta, esto prueba la existencia de Heterocedasticidad del error determinando un modelo menos eficiente.

Una posible causa es el tamaño de los recorridos de viscosidad con respecto a su media, dado que son amplios recorridos.

La carencia de factores en el modelo se descarta al tener un Coeficiente de determinación del 100% para el modelo final.

Una vez modelado de forma lineal y debido a la utilización de un ANOVA (teorema de Gauss-Markov), la varianza estimada puede ser mucho mayor de la observada.

Una vez determinado el modelo, el ajuste de la base de datos permite desarrollar un sistema de control de proceso basado en una optimización de los resultados, obteniendo una curva dinámica donde se establece tres condiciones con base en la cantidad de masa a preparar, minimizando la temperatura y buscando la viscosidad cercana a los 8 000 cP, por solicitud del cliente interno, producción.

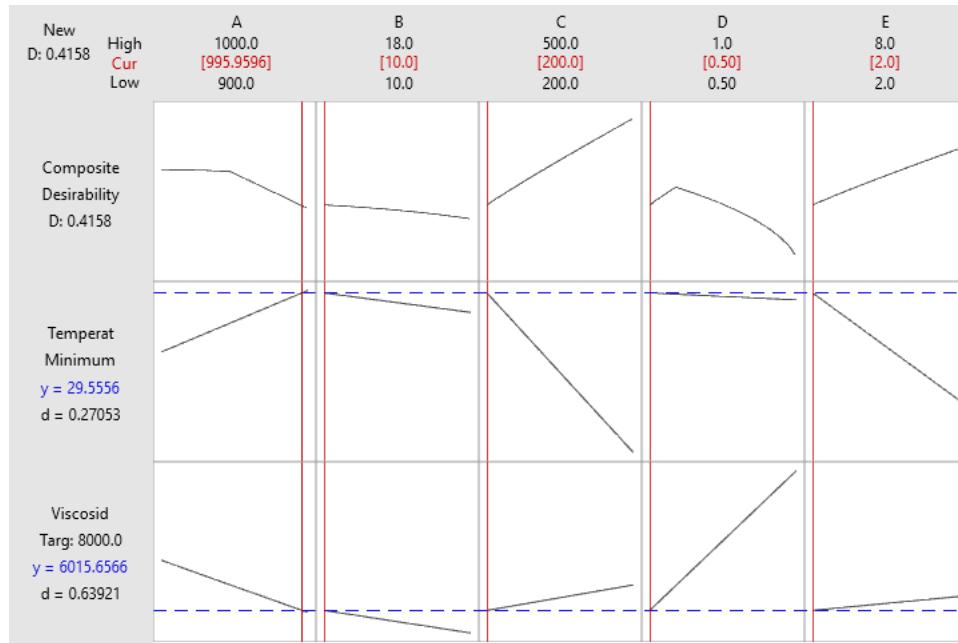


Ilustración 12 Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 200 g

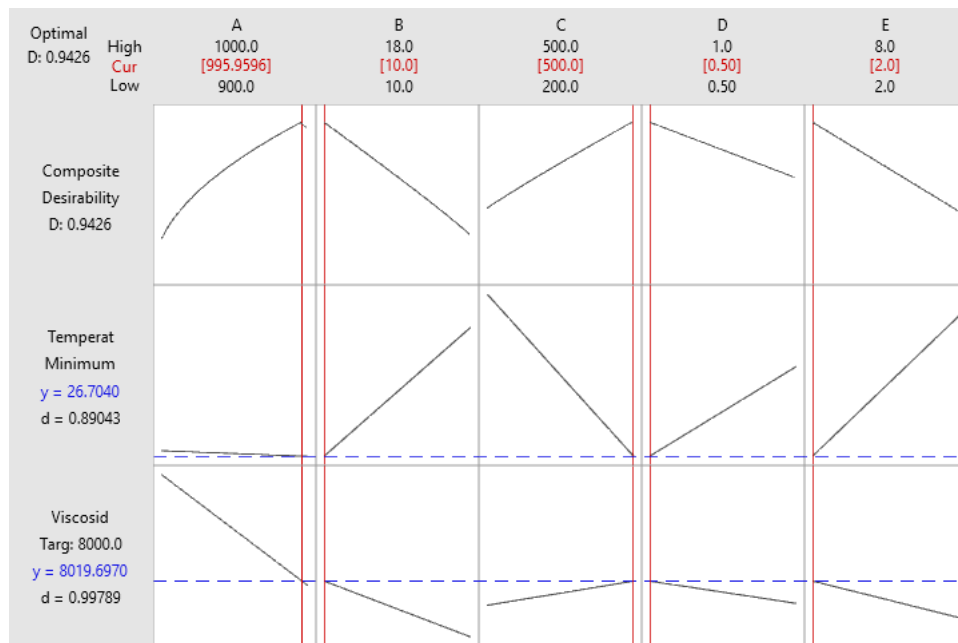


Ilustración 13 Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 500 g

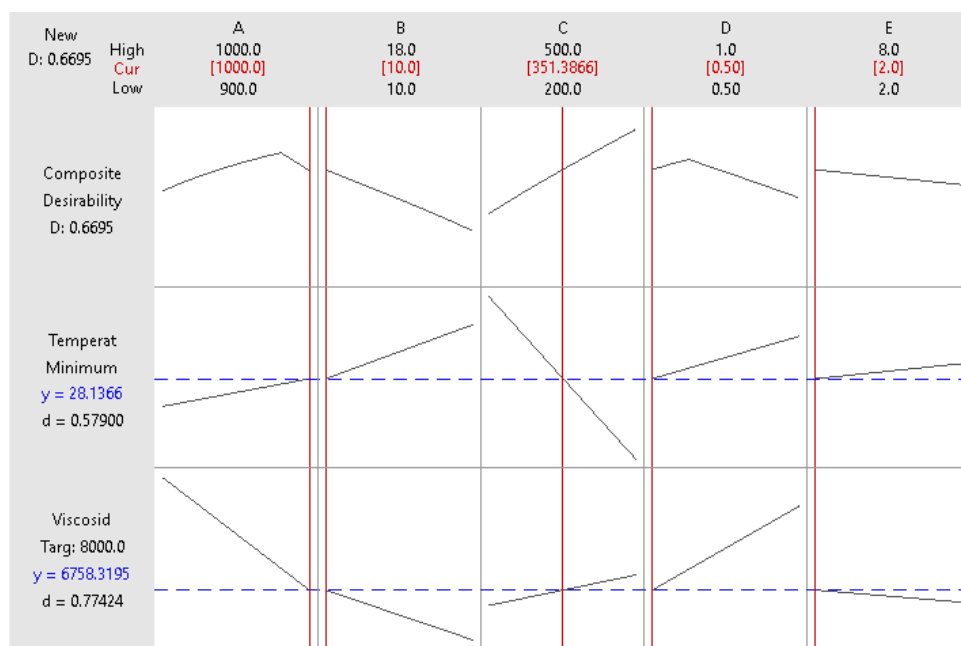


Ilustración 14 Optimización de base de datos ajustada del diseño de experimentos con condiciones para laboratorio con base en la variable cantidad de masa para 350 g

4.4 Validar

El impacto económico del proyecto se basa en el costo de la mano de obra empleada para los arreglos, dado que se utilizan producciones planificadas y con demanda por cliente, esto quiere decir que no hay impacto de costo en la producción.

- Jefe de proceso de preparación de plastisoles y compuestos: Máximo 2 horas a la semana (\$48,15)
- Horas ingeniero de planta: máximo 15 horas a la semana (\$28,55)
- Horas Auxiliar de laboratorio: máximo 5 horas a la semana (\$4,35)
- Operario de Pesaje Manual (tipo B): 7,5 horas a la semana (\$ 3,04)
- Operario de batido (Tipo A): 2,5 horas a la semana (\$ 3,37)
- Coordinador del departamento de preparación de compuestos y plastisoles: 2,5 horas a la semana (\$4,63)

El plazo que se contempló en llevar a cabo el proyecto es de 16 semanas, dando como resultado una inversión de 9 427,63 USD.

El Sílice como materia prima implica 184 540 USD como gasto extra al consumo por arreglos anuales, la meta establecida en este proyecto es la reducción del 20% lo que representa 36 908 USD, obteniendo una ganancia neta de 27 481 USD.

Cargo	Costo por semana	Costo total del proyecto
Coordinador del departamento	\$ 11,57	\$ 185,19
Operario de Batido	\$ 8,44	\$ 135,11
Operario de pesaje manual	\$ 22,82	\$ 365,11
Auxiliar de Laboratorio	\$ 21,76	\$ 348,15
Ingeniero de planta	\$ 428,33	\$ 6 853,33
Jefe de proceso	\$ 96,30	\$ 1 540,74
total	\$ 589,23	\$ 9 427,63
Meta reducción de 20%		
Costo actual de sílice	\$ 184 540,00	
Reducción del 20%	\$ 36 908,00	
Costo del Proyecto	\$ 9 427,63	
Ganancia de la optimización del proceso	\$ 36 908,00	

Ilustración 15 Impacto económico del proyecto.

Fuente: Autoría propia

Durante la justificación de la problemática se mencionó un total de 9 987,7 Kg anuales de Sílice, utilizados en arreglos, lo que establece un costo por Kg de 18,48 USD y un promedio de consumo de 832,3 Kg por mes. Al establecer una meta de 20% de ahorro, se fija como objetivo la reducción de 166,46 Kg de sílice por mes, lo que representa un total de 3 075,67 USD.

Lo anterior con un plazo de 12 meses, establece una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 31,39% y un VAN de 11 529,01 USD. Además, con un costo de oportunidad del capital para el proyecto o tasa de retorno mínimo aceptable (TREMA) de 0,84.

Los valores de rentabilidad financiera del proyecto establecen que, al ser la TIR mayor que la TREMA, el proyecto rinde más de lo que se le exige y por tanto es financieramente aceptable. Dicha conclusión es confirmada por el valor del VAN, al ser mayor a 0, indica que el proyecto es rentable y su nivel de rentabilidad está por encima de la TREMA.

Para realizar la validación en el proceso de producción se establecen tres puntos basados en la cantidad de masa a preparar y en los resultados obtenidos de la optimización de la base de datos, ilustraciones 11, 12 y 13.

Estas condiciones son escaladas a las variables en producción basados en la tabla 4 y tabla 5, obteniendo los resultados de la tabla 10.

Tabla 10 Condiciones y resultados de la validación para el control de proceso de la CAPA SPECIAL

Número de corrida	1	2	3
Masa Lab (g)	200	350	500
Masa Planta (Kg)	2000	3500	5000
Altura del Aspa Lab (cm)	0,5	0,5	0,5
Altura del Aspa Planta	12	12	12
Temperatura esperada (°C)	29,55	28,13	26,7
Viscosidad esperada (cP)	6015	6758	8019
Viscosidad obtenida (cP)	7650	8300	9450
Viscosidad deseada en producción (cP)	8000	8000	8000
Temperatura obtenida (°C)	28,7	27,1	26,9

Si se calcula el porcentaje de error entre la base de datos analizada y una viscosidad deseada se obtiene que en promedio existe 44,14%, con los resultados obtenidos en esta validación el porcentaje de error es en promedio del 5,83%. Lo que indica que se redujo un 38,31% equivalente a 70 697,27 USD anuales y confirmando la comparación entre los indicadores de rentabilidad TIR y TREMA.

Capítulo V Discusión de resultados

- **Discusión**

Los resultados obtenidos de la investigación histórica de la viscosidad de la CAPA SPECIAL de la formula vigente de trabajo, establecieron que el sistema es capaz de obtener resultados más estables y normales; sin embargo, se encuentra con datos no homogéneos y con alta variabilidad. Esto quiere decir que el proceso requiere intervención técnica, puntal y controlada que permite la reducción de la variabilidad y optimización del proceso.

Para lograr esto, es necesario un control de proceso en la manufactura de la CAPA SPECIAL por lo que se realizó un diseño de experimento para conocer las variables de mayor incidencia sobre el proceso, sin embargo, la labor de coordinar la planificación de la producción en la compañía, la coordinación entre departamentos para llevar a cabo las preparaciones y disponer del tiempo necesario en cada experimento, estableció un panorama imposible para realizar los 32 ensayos necesarios.

Por lo tanto, se establecieron las condiciones a escala para llevar el análisis a nivel laboratorio, mediante la estadística, se determinó cuales se deben realizar a escala industrial. El factor de relación para el tiempo es de 2,5; el factor de relación para la masa es de 10, la altura del aspa no posee relación entre las variable laboratorio- Industrial, dado que el equipo presenta una configuración adimensional por lo que se tomó la decisión de realizar el batido a una distancia mínima de 0,5 cm del fondo del contenedor y una distancia máxima de 1 cm, colocando la propela en posiciones, a consideración de diversos expertos, que proporcionan un batido adecuado y similar a las propelas del diluidor; el tiempo de espera se le asignó una proporción de 7,5 y por ultimo las revoluciones por minuto se decidió conservar dado que el equipo de laboratorio si podía reproducir dicha variable. Estas proporciones se consideraron adrede con el fin de establecer dimensiones manejables a nivel laboratorio.

Los resultados finales del diseño de experimentos permitieron clasificar algunas corridas como fallidas, dado que a nivel laboratorio la propela no se sumergía completamente, provocando que la masa no se homogenizara de manera correcta y la viscosidad se mantuviera en niveles altos, dicho problema a escala industrial no se aprecia, dado que las propelas quedan semisumergidas , sin embargo, la posición de la propela en el diluidor no favorece el batido y el plastisol queda no homogéneo, obligando al operario bajo criterio experto, a iniciar otro ciclo de batido y ajuste de

viscosidad; este hecho se justifica por la turbulencia generada por una propela según la posición donde se ubique en un contenedor, además el efecto que genere las revoluciones por minuto sobre la viscosidad de la sustancia a batir, entre otros factores.

La situación descrita permite establecer un análisis sobre el proceso, definiendo las dos variables relevantes y de control, altura del aspa y masa del plastisol, permitiendo plantear un control de proceso mediante una optimización y llevando a escala industrial tres puntos de medición claves para generar una curva de proceso, los puntos se establecen por masa dado que el proceso productivo se basa en dicha unidad para llevar a cabo los batch necesarios. Los puntos son 2000, 3500 y 5000 Kg, donde 2000 Kg es la cantidad mínima que se pueden generar en el diluidor y por recomendación de proveedor 5000 Kg es el máximo para realizar.

La validación consiste en llevar a cabo los experimentos a nivel industrial, colocando las condiciones observadas en la ilustración 11, 12 y 13, obteniendo como variables respuesta viscosidad y temperatura, donde la última se mantuvo estable y dentro de los valores típicos de una producción, resaltando la viscosidad como variable más importante y reduciendo el error en 38,31%, representando el cumplimiento del objetivo establecido en la Ilustración 14, de una reducción del 20% que equivale a 36 908 USD, por consiguiente con los resultados obtenidos se puede alcanzar hasta 70 697 USD de ahorro, es importante aclarar que el porcentaje de error representa la variabilidad del proceso con respecto a un valor establecido de 8 000cP.

Los valores de ahorro pueden ascender aún más dado que, en la estimación, solamente se contempla el valor de la sílice como materia prima, pero se puede contemplar otras sustancias químicas como el Hexilenglicol o Varsol utilizados en el proceso.

Al asumir un control sobre las variables altura del aspa y masa, el anexo 2, ilustración 14, muestra que se puede impactar la viscosidad y la dispersión del producto, respaldado por el diseño de experimentos en la reducción del error, se aumenta la calidad del producto, se aumenta la eficiencia y la eficacia, se reduce el tiempo invertido de los operarios y de los técnicos de control de calidad y una reducción importante del takt time.

- **Lecciones aprendidas**

El proceso de establecer un control para la producción de la capa Special requiere tiempo, cuidado y planificación de las partes interesadas, durante el desarrollo de este proyecto fue necesario la

retroalimentación por parte Patricia Ramírez Barrantes, profesora de la Maestría y especialista en diseño de experimentos, lo que conllevó a el rediseño del planteamiento establecido para la ejecución del diseño de experimentos requerido, adaptándolo a las necesidades de la compañía para cumplir el objetivo establecido.

También fue necesario durante el proceso de validación contar con la participación del personal del departamento de preparación de compuestos y plastisoles, de PQNCR y su gerente a cargo Willy Madrigal, quienes colaboraron con la planificación y preparación de los experimentos necesarios.

Durante el desarrollo de este proyecto se aprendió que robustez de un diseño de experimentos se basa en la delimitación de los objetivos y las variables concretas. Para ello, se requiere de manera significativa una base sólida de teoría, pero la participación de la gerencia en la planificación y la experiencia en la ejecución de los operarios se vuelven factores claves para llevar un proyecto de esta índole al éxito.

A partir de la culminación de este proyecto de graduación, se aprendió que la teoría mezclada con la observación, la contextualización y la experiencia, pueden transformar un proceso productivo o llevar cualquier proyecto planteado a cumplir sus objetivos, siempre y cuando el líder mantenga una actitud abierta a sugerencias de cualquier persona.

- **El gran aporte a la academia**

El presenta trabajo es la aplicación de la teoría a un contexto industrial real, donde se permite conocer una industria no común en CR, como lo es la química-textil, y donde se plantea un diseño de experimentos robusto y satisfactorio, el cual permite servir como referencia tanto a la academia; dado que a pesar de su efectividad, son poco utilizados en la industria por el nivel de complejidad que puede alcanzar, el costo y tiempo invertido; como a PQNCR, ya que se puede implementar la misma metodología para otros plastisoles de interés y reducir los costos.

Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones

- **Conclusiones**

Durante el análisis del proceso de manufactura de la Capa Special, se determina estadísticamente que la altura del aspa y la masa del plastisol son las variables más influyentes sobre la viscosidad, permitiendo diseñar un control de proceso, el cual mejora la eficiencia y eficacia de la manufactura mediante una curva de optimización, cuyo fin es establecer las variables basándose en la masa a preparar del plastisol, permitiendo controlar el proceso de manera sistemática.

El análisis estadístico determinó que el proceso productivo es capaz de generar reproducibilidad entre batch con una variabilidad adecuada para un proceso normal, a condición de mantener variables como; la formula analizada de manera estable y constante, y la calidad de materia prima verificada y constante; de lo contrario puede verse aumentado la variabilidad del proceso.

La implementación del control de proceso establece una reducción de 38,31% de los desperdicios asociados a la producción de la Capa Special, lo cual representa 70 697,27 USD anuales y una reducción del consumo de sílice de 3 826,29 Kg anuales.

El modelo establecido es heterocedástico, lo que indica un modelo menos eficiente en la predicción, sin embargo, los coeficientes siguen siendo lineales e insesgados estableciendo condiciones que permiten la no anulación del modelo y además mantienen el nivel de confianza establecido

Por lo tanto, se desarrolla una mejora del proceso de manufactura de la capa Special que permite reducir los desperdicios incurridos y permite la extrapolación a los distintos plastisoles producidos por Proquinal Costa Rica.

- **Recomendaciones**

Para la implementación del control de proceso sobre producción, se recomienda iniciar con verificaciones periódicas para reducir el error que pueda generar la variable "altura del aspa" dado que el factor adimensional del equipo puede interferir con las conclusiones establecidas por el diseño de experimentos, por lo que es importante realizar verificaciones visuales de la posición de la propela del diluidor, asegurando que se encuentre sumergida y no semisumergida.

Evaluar el modelo transformando las variables dependientes o independientes para mitigar la heterocedasticidad, ya sea en un logaritmo o transformaciones de raíz cuadrada, con el cuidado de garantizar que el modelo transformado conserve su interpretabilidad y validez.

Mantener la calidad de las materias primas y la eficiencia de las fórmulas, es importante para generar modelos robustos y eficientes en la predicción.

Bibliografía

- A. F. Méndez-Sánchez, L. P.-T. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*.
- Abdesselam, Y. A. (2017). Rheology of plastisol formulations for coating applications. *Polymer Engineering & Science*, 982-988.
- Augusto Cauchick Miguel, P. a. (2014). Benchmarking Six Sigma Implementation in Services Companies Operating in an Emerging Economy. *Benchmarking : An International Journal*, 62-76.
- Beltrán, M. (1995). *os procesos de gelificación y descomposición de los plastisoles de PVC por FTIR y TG: análisis de la influencia del tipo de resina, plastificante, composición y otras variables*. Alicante.
- Boudhani, H. L. (2007). Rheology and gelation kinetics of PVC plastisols. *Rheologica acta*, 46, 825-838.
- Boudhani, H. L.-L. (2009). Viscoelasticity and mechanical properties of reactive PVC plastisols. *Polymer Engineering & Science*.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos 2a Ed*. Colombia: Ed. Universidad de Antioquia.
- George E. P. Box, & M. (1986). *An Analysis for Unreplicated Fractional Factorials*. Technometrics.
- Gómez Castro, R. (2022). *Comportamiento del comercio bilateral de textiles y manufacturas en el marco del TLC entre Colombia y costa rica en el período evaluado 2004 a 2020*. Bogotá, D.C. .
- Hartwig, A. (. (2016). According to European Marine Equipment Directive Adhesive Certified. *Bulletin of the Maritime Institute in Gdańsk*.
- KOPELLE Coating and Service. (16 de Abril de 2023). Obtenido de <https://www.grupokopelle.com>
- Lledó, P. (2016). *Director de proyectos: Cómo aprobar el examen PMP® sin morir en el intento*. USA: Pablolledo.

- Maia, I. S. (2017). PVC-based synthetic leather to provide more comfortable and. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Marcilla, A. G. (1997). Study of the flow properties and the ageing process in PVC plastisols from commercial PVC resins. *European polymer journal*, 33(5), 753-759.
- Mayka Bautista, J. L.-B. (2020). INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA EN TELAS DE TAPICERÍA CON ALTOS NIVELES DE DESEMPEÑO RECUBIERTAS CON POLÍMEROS POR TRANSFERENCIA. *Edición Especial, Memorias Congreso Internacional de Materiales*.
- Melo Martínez, O. O. (2007). *Diseño de experimentos: métodos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia.
- MENDOZA, J. H. (2018). *LABORATORIO DE QUÍMICA GENERAL*. Colombia, Norte de Santander.
- Minitab. (27 de 10 de 2023). *Minitab Support 21*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/response-surface/analyze-binary-response/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/fits-and-diagnostics/>
- Nakajima, N. a. (2001). Rheology of PVC Plastisol: Particle Size Distribution and Viscoelastic Properties. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- NQA. (08 de 03 de 2023). *NQA Organismo de certificación Global*. Obtenido de <https://www.nqa.com/es-pe/certification/standards/iatf-16949>
- NQA. (08 de Marzo de 2023). *NQA ORGANISMO DE CERTIFICACIÓN GLOBAL*. Obtenido de <https://www.nqa.com/es-pe/certification/standards/iatf-16949>
- Nuvant. (16 de Abril de 2023). Obtenido de <https://nuvantglobal.com/about>
- Obando, L. &. (2002). La industria textil en Centroamérica. *INCAE, Costa Rica*.
- Pérez López, D. D. (2021). Diseño de experimentos factoriales 2^n para su análisis con Infostat e Infogen. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1087-1099.

- Pérez-Trejo, L. S. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). . *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 36.
- PINTO, M. A. (2016). *ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PLASTISOL PARA GRUPO KOPELLE LIMITADA*. Bogotá D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.
- Q-Lab. (08 de Abril de 2023). Obtenido de <https://www.q-lab.com/es-es/products/quv-weathering-tester/quv>
- Rasteiro, M. G. (2009). PVC Paste Rheology: Study of Process Dependencies. *Journal of applied polymer science*.
- Selvi, K. &. (2014). Six sigma-overview of DMAIC and DMADV. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering*, 16-19.
- Sreedharan V., R. V. (2018). Critical Success Factors of TQM, Six Sigma, Lean and Lean Six Sigma. *Benchmarking : An International Journal* , 3479-504.
- Sunder M, V. (2016). Constructs of Quality in Higher Education Services. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 1091-111.
- TESTEX. (10 de 04 de 2023). Obtenido de <https://www.testertextile.com/es/producto/probador-de-rigidez-de-la-tela-tf113/>
- WYPYCH, J. (1985). *Polyvinyl Chloride Degradation*. Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science Publishers B. V.

Apéndices y anexos necesarios

Anexo 1. Hoja de recolección de datos de la etapa uno, departamento de preparación de plastisoles y compuestos.

Orden: _____ Referencia: _____

Plastisol: _____

Fecha: _____ Objetivo: _____

Observaciones del proceso en Preparación de Plastisoles y compuestos:

Pesaje completo y adecuado:

Batido:

RPM	Altura de Aspa	Tiempo de batido	Masa (Kg)	Tiempo de medición:	Observación

Viscosidad resultante:

¿Requiere ajuste?:

¿Cuánto? (tabla de batido si se requiere):

Anexo 2. Casa de la calidad del proceso productivo de la capa Special en Proquinal Costa Rica

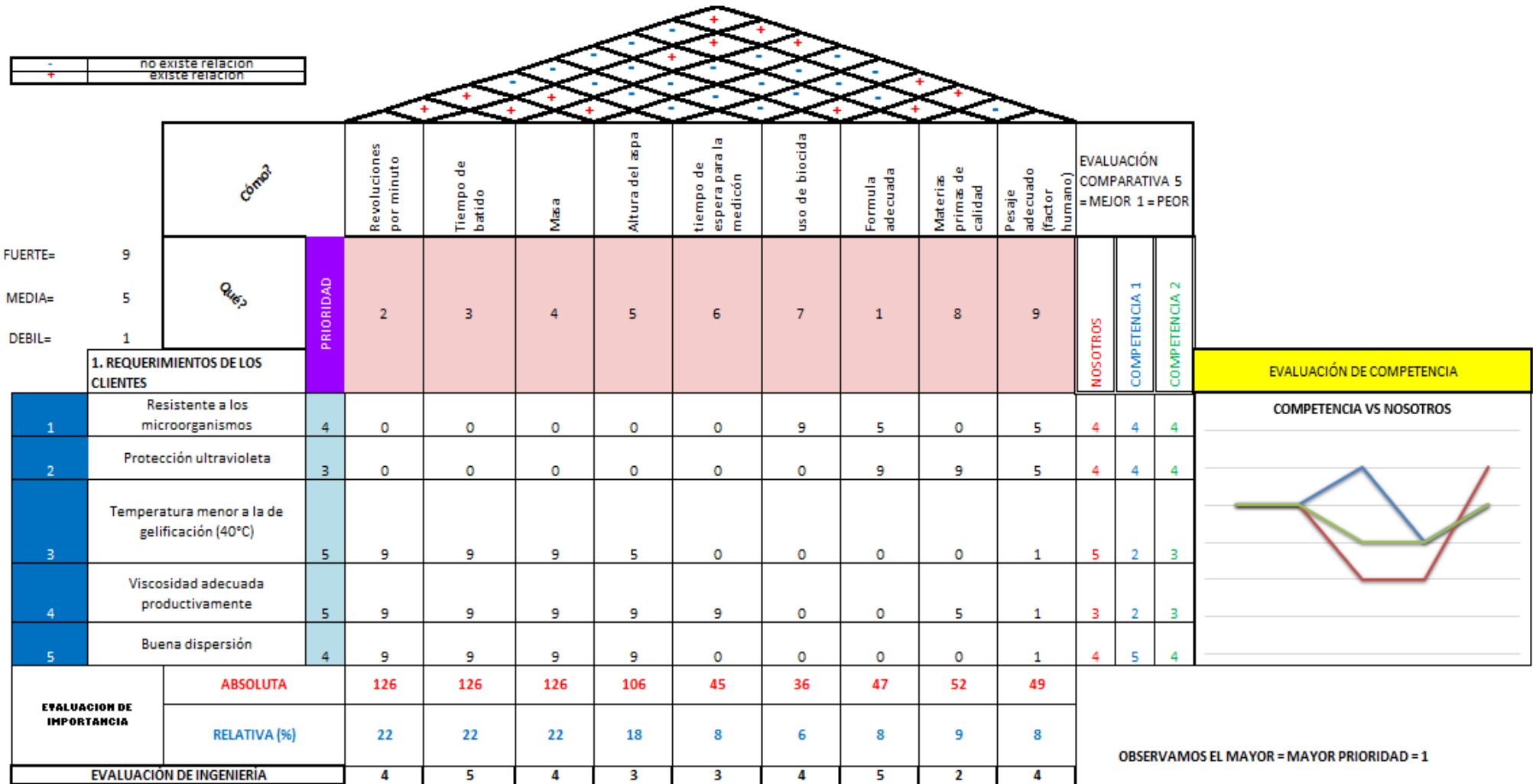


Ilustración 16 QFD del proceso productivo del plastisol Capa Special en Proquinal CR