



Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

“Reducción de la variabilidad en la humedad final del PT mediante implementación de metodología Lean Six Sigma en línea de extrusión de alimentos para mascotas”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN GESTIÓN DE PROCESOS Y SEGURIDAD DE LOS ALIMENTOS

Presentado por:

Vicente Serrano Delgado

Jenniffer Barzallo Galvez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, Mayra Delgado, porque su ejemplo de esfuerzo constante y de superación diaria es el verdadero motor de este logro. Ella me enseñó a no detenerme frente a las dificultades, a mantenerme firme y a buscar siempre la manera de mejorar.

Este proyecto también es suyo, pues gran parte de mi perseverancia y disciplina nacen de sus enseñanzas. Que al volver a leer estas páginas recuerde que, así como mi madre nunca se detuvo, yo tampoco debo hacerlo, y que cada meta alcanzada es solo un escalón más hacia nuevos desafíos y oportunidades.

Vicente Serrano Delgado

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes con su apoyo constante me han dado la fuerza necesaria para alcanzar esta meta académica.

De manera especial, agradezco a mi sobrina Rachell, cuyo nacimiento y estos primeros cinco meses de vida me han brindado una motivación única. Verla crecer en este tiempo me ha recordado cada día la importancia de perseverar y superarme, no solo por mis propios sueños, sino también para ser un ejemplo para ella en el futuro.

Asimismo, extendiendo mi gratitud a mi compañera de tesis, por su compromiso, colaboración y dedicación, cualidades que fueron fundamentales para culminar de manera satisfactoria este proyecto de titulación.

Vicente Serrano Delgado

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor.
Gracias por enseñarme a nunca rendirme, incluso en los momentos más difíciles. Este logro es
tan suyo como mío.

Jenniffer Barzallo Gálvez.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por ser mi guía y fortaleza. A mi familia, por ser mi pilar incondicional.

A los amigos que obtuve en la maestría, gracias por acompañarme en este camino, por su apoyo, sus palabras de aliento y por los momentos compartidos que hicieron más llevadero este recorrido.

A mi compañero de tesis por su compromiso, responsabilidad y dedicación constante durante todo este proceso.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, han dejado una huella en mi vida académica y personal. Cada uno ha contribuido a que hoy este logro sea una realidad.

Jenniffer Barzallo Gálvez.

Declaración Expresa

Nosotros Vicente Serrano y Jenniffer Barzallo acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

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

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

Guayaquil, 15 de agosto del 2025.

Ing. Vicente Serrano Delgado

Autor 1

Ing. Jenniffer Barzallo Gálvez

Autor 2

Evaluadores

Ing. Patricio Javier Cáceres Costales PhD

Profesor de Materia

Ing. María Denise Rodríguez Zurita PhD

Tutora de proyecto

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo aplicar la metodología Lean Six Sigma para reducir la variabilidad de humedad en el proceso de extrusión-secado de alimentos balanceados para mascotas. El diagnóstico inicial mostró que la humedad final del producto no cumplía de manera consistente con la especificación de $8,5\% \pm 0,5$, presentando una media de 8,01%, una desviación estándar de 0,31% y un Cpk de 0,55. Mediante herramientas estadísticas (análisis de capacidad, boxplots, Ishikawa y Pareto) se identificó que la causa principal era la distribución desigual del producto en el secador. Como acción de mejora se implementó un desmoronador en la entrada del secador, logrando reducir la variabilidad a $\sigma = 0,24$ y aumentar el Cpk a 1,13. El Value Stream Mapping evidenció mejoras en los tiempos de ciclo (−18%), en la reducción de reprocesos (−70%) y en la disminución del inventario en proceso (−38%). Finalmente, se estableció un plan de capacitación y control para asegurar la sostenibilidad de los resultados.

Palabras clave: Lean Six Sigma, Cpk, control estadístico de procesos, extrusión, secado, alimentos balanceados, variabilidad de humedad.

Abstract

This study aimed to apply the Lean Six Sigma methodology to reduce moisture variability in the extrusion-drying process of pet food production. The initial diagnosis showed that the final product's moisture did not consistently meet the specification of $8.5\% \pm 0.5$, with an average of 8.01%, a standard deviation of 0.31%, and a Cpk of 0.55. Using statistical tools (process capability analysis, boxplots, Ishikawa and Pareto), the main root cause was identified as the uneven distribution of product within the dryer. As an improvement action, a crumbler was installed at the dryer inlet, reducing variability to $\sigma = 0.24$ and increasing the Cpk to 1.13. The Value Stream Mapping highlighted improvements in cycle times (−18%), rework reduction (−70%), and work-in-process reduction (−38%). Finally, a training and control plan was implemented to ensure the sustainability of results.

Keywords: Lean Six Sigma, Cpk, Statistical Process Control, extrusion, drying, pet food, moisture variability.

INDICE

1.1.	Introducción	2
1.2.	Descripción del problema	2
1.3.	Justificación del problema	4
1.4.	Objetivos	5
1.4.1.	Objetivo General	5
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	5
1.5.	Marco Teórico.....	6
1.5.1.	Estado del Arte.....	6
1.5.2.	Bases Teóricas	9
1.5.3.	Marco Conceptual.....	14
2.	Marco metodológico	17
2.1.	Enfoque metodológico	17
2.2.	Lugar del estudio.....	17
2.3.	Materiales utilizados	17
2.4.	Metodología Lean Six Sigma – Ciclo DMAIC.....	18
2.5.	Procesamiento de la información.....	19
3.1.	Fase definición DMAIC.....	21
3.1.1.	Requisitos del cliente interno y externo (VOC).....	21

3.2. Fase Medición DMAIC.....	23
3.2.1. Línea Base del Proceso (Estado Inicial de la Humedad)	23
3.2.2. Análisis de Capacidad (Cp, Cpk, Pp, Ppk)	24
3.2.3. Análisis de Variabilidad por Zonas del Secador (Boxplots).....	25
3.3. Fase Análisis DMAIC.....	27
3.3.1. Identificación de causas raíz (diagrama de Ishikawa)	27
3.3.2. Verificación de las Causas	29
3.4. Fase Mejora DMAIC	31
3.4.1. Implementación del desmoronador en la entrada del secador	31
3.4.2. Descripción técnica del demoronador.....	31
3.4.3. Evaluación de la mejora.....	33
3.4.4. Value Stream Mapping (VSM).....	36
3.5. Fase Controlar DMAIC.....	39
3.5.1. Plan de capacitación y estandarización para operadores	39
3.5.2. Plan de control formal.....	40
4.1 Conclusiones	42
1.2. Recomendaciones	42
Bibliografía.....	43

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

LEI Límite Inferior de Especificación

LES Límite Superior de Especificación

PT Producto Terminado

VSM Value Stream Mapping

VOC Voz del Cliente

DMAIC Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar

DPMO Defectos Por Millón de Oportunidades

CEP Control Estadístico de Procesos

WIP Work In Progress

SOP Standard Operating Procedure

CTQ Critical To Quality

SPC Control Estadístico de Procesos

CT Cycle Time

LT Lead Time

NIR Near Infrared Spectroscopy

Simbología

Cp Índice de capacidad potencial

Cpk Índice de capacidad real

Cpu Índice de capacidad hacia el límite superior

Cpl Índice de capacidad hacia el límite inferior

Pp Capacidad potencial de un proceso

Ppk Capacidad real del proceso a largo plazo

Cpm Capacidad de proceso

σ Desviación estándar

μ Media

Kg Kilogramo

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Requisitos del cliente interno y externo	21
Ilustración 2	Análisis estadístico del % de humedad PT obtenido de Minitab	23
Ilustración 3	Informe de capacidad entre/dentro plazo para la Humedad PT (%)	25
Ilustración 4	Gráficas de cajas de Humedad según su ubicación.....	26
Ilustración 5	Diagrama de Ishikawa	28
Ilustración 6	Diagrama de Pareto de las principales causas que generan reprocesos	30
Ilustración 7	Plano inicial del secador de extrusión	32
Ilustración 8	Plano del secador de extrusión con desmoronador instalado	32
Ilustración 9	Desmoronador de extrusión implementado.....	32
Ilustración 10	Análisis estadístico del % Humedad PT después de implementar el demoronador	33
Ilustración 11	Informe de capacidad entre/dentro plazo del %Humedad PT post mejora	34
Ilustración 12	Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviación estándar	35
Ilustración 13	Prueba de igualdad de varianzas antes, después	36
Ilustración 14	Mapa de flujo de valor actual (VSM actual)	37
Ilustración 15	Mapa de flujo de valor futuro (VSM futuro).....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Destino producto no conforme y perdida por reproceso.....	4
Tabla 2	Destino producto no conforme y perdida por reproceso.....	22
Tabla 3	Análisis de cumplimiento de especificaciones de humedad	23
Tabla 4	Resultados del análisis de capacidad	24
Tabla 5	Análisis de Variabilidad por Zonas del Secador (Boxplots).....	26
Tabla 6	Equipo de mejora continua	27
Tabla 7a	Análisis Causa Raíz mediante 5 ¿Por qué?	28
Tabla 7b	Principales causas de Reproceso	29
Tabla 8	Análisis comparativo del % de humedad.....	33
Tabla 9	Análisis comparativo del índice de capacidad	34
Tabla 10	Análisis comparativo de indicadores claves	38
Tabla 11	Plan de capacitación operarios y técnicos de extrusión	39
Tabla 12	Plan de control formal.....	40

Capítulo 1

1.1. Introducción

En la industria de alimentos balanceados para mascotas, el proceso de extrusión y secado desempeñan un papel crucial en la calidad del producto final, especialmente en lo que respecta a parámetros de textura, densidad, vida útil e inocuidad del alimento. Uno de los principales desafíos en estos procesos es mantener un control riguroso sobre la humedad, ya que, una variabilidad excesiva expone el alimento a tener una afectación en el crecimiento microbiológico, pérdida de calidad organoléptica, sobrecostos en reprocesos o rechazos de producto terminado, lo cual, se traduce en pérdidas de eficiencia en el proceso productivo.

En este contexto, metodologías de mejora continua como Lean Manufacturing y Six Sigma han demostrado ser eficaces en la reducción de desperdicios, variabilidad y problemas críticos dentro de los procesos industriales. La integración de estas dos metodologías permitirá un enfoque estructurado y orientado a resultados que busca eliminar la variabilidad y optimizar el desempeño del proceso mediante herramientas estadísticas y filosofía lean.

Se aplicará la metodología Lean Six Sigma bajo un enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), con el propósito de reducir la variabilidad del contenido de humedad en el proceso de extruido- secado de una planta de alimentos balanceados para mascotas. Proporcionando un control que mejore la calidad del producto, disminuyendo retrabajos y garantizando una mayor eficiencia operativa, de forma que se beneficie a las partes interesadas.

1.2. Descripción del problema

En la planta de alimentos balanceados para mascotas objeto de estudio, se ha identificado una alta variabilidad en los niveles de humedad del producto final tras el proceso de extrusión y

secado. Esta fluctuación representa un problema crítico, ya que, puede comprometer la estabilidad del producto, su vida útil y generar devoluciones o quejas por parte de los grupos de interés. Además, la variabilidad de humedades en los diferentes lotes del proceso genera reprocesos, pérdida de productividad y aumento de costos operativos.

Actualmente, no existen controles estadísticos robustos ni estandarizaciones en la toma de decisiones frente a los ajustes del proceso, lo que contribuye a mantener una alta dispersión en los resultados. A pesar de que se realizan las mediciones de humedad por parte del operador de la extrusora cada hora del proceso, no se cuenta con un análisis estructurado que permita identificar la causa raíz ni definir acciones sostenibles de mejora.

Este problema, no solo afecta la calidad y seguridad del alimento, sino también en el cumplimiento de especificaciones internas y normativas. Por ello, resulta necesario implementar una metodología que permita abordar la variabilidad de forma sistemática y con base en datos objetivos. Lean Six Sigma ofrece herramientas como el análisis de capacidad de proceso, diagramas de Ishikawa, análisis de Pareto y modelos estadísticos que permitan comprender y reducir la variabilidad existente, generando un impacto positivo en la calidad del producto final.

Se ha realizado un análisis del producto no conforme desde enero 2023 hasta marzo 2025 en el cual se identifica una pérdida total de \$ 119.778,49, por lo que se evalúa los puntos críticos que intervienen en la humedad fuera de parámetros el cual se da destino como producto no conforme representando un reproceso y pérdida.

Tabla 1*Destino producto no conforme y pérdida por reproceso*

Año	Producto no conforme por alta humedad (kg)	Valor económico	Valor recuperado por reproceso	Valor perdido
2023	103265	\$99.844,40	\$49.962,50	\$-49.881,90
2024	116302	\$98.869,53	\$56.771,00	\$-42.098,53
2025	47348	\$51.472,06	\$23.674,00	\$-27.798,06
Total				\$-119.778,49

*Fuente propia***1.3. Justificación del problema**

En el proceso de Extrusión- Secado mantener un nivel de humedad dentro de rangos específicos es fundamental. Sin embargo, la falta de control estadísticos, la ausencia de análisis causa raíz y la variabilidad inherente a factores como temperatura, presión, tiempo de secado y condiciones ambientales, generan diferencias significativas entre lotes e incluso dentro del mismo lote. Esta variabilidad se traduce en productos fuera de especificaciones, reprocesos, pérdida de materias primas, mayores costos energéticos y un impacto negativo en la satisfacción del cliente.

Implementar una metodología robusta como Lean Six Sigma permitirá atacar esta problemática desde una perspectiva estructurada y basada en datos. Esta metodología fusiona el enfoque de mejora continua de Lean Manufacturing con el control estadístico riguroso de Six Sigma haciendo posible identificar y reducir las fuentes de variabilidad, estandarizar el proceso y

establecer controles sostenibles en el tiempo, contribuyendo a generar soluciones permanentes a la problemática, aumentar la eficiencia del proceso y competitividad de la planta.

Adicionalmente, el presente proyecto de titulación aporta un valor académico y práctico, al demostrar la aplicabilidad de herramientas de mejora de calidad en un entorno industrial real, generando evidencia para futuras implementaciones en la industria de alimentos balanceados (piensos), donde aún existen oportunidades de innovación en control de procesos y reducción de desperdicios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Reducir la variabilidad del contenido de humedad en el proceso de extrusión-secado en una planta de alimentos para mascotas aplicando metodología Lean Six Sigma, con el fin de mejorar la calidad del producto y la eficiencia del proceso.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Definir el problema y los requisitos del cliente (interno y externo), mediante el análisis de la situación actual del proceso de extrusión-secado y la recolección de datos históricos de humedad.
- Medir la variabilidad del contenido de humedad mediante herramientas estadísticas y análisis de capacidad del proceso (C_p , C_{pk}), para establecer una línea base del desempeño actual.
- Analizar las posibles causas raíz de la variabilidad en el proceso, utilizando herramientas como diagramas de Ishikawa.

- Proponer e implementar acciones de mejora y control para reducir la variabilidad, estandarizar parámetros operativos y establecer controles estadísticos que aseguren la estabilidad del proceso a largo plazo.

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Estado del Arte

A Nivel Internacional

Varios estudios recientes demuestran que la implementación de Lean Six Sigma ha sido exitosa en plantas de alimentos, logrando mejoras significativas en eficiencia, reducción de desperdicios y control de calidad. Singh Sodhi (2021), aplicó Lean Six Sigma en una empresa de confitería con el objetivo de reducir defectos en el proceso de llenado y disminuir retrabajos. Este estudio se basó en las etapas de producción en las que se evidenció pérdidas significativas por desperdicios en MP y sobrellenado, se implementó las fases de DMAIC, mediante este método de controles estadísticos u parámetros definidos se logró disminuir fallas de llenado con la meta de disminuir el 40% en errores del proceso de llenado y un 35% de retrabajos, de esta forma se evidenció la eficiencia de este método en procesos continuos con un impacto directo en costos y calidad.

En un estudio realizado en una planta de alimentos en Perú, se desarrolló la implementación de la metodología Lean Six Sigma, con la finalidad de mejorar la calidad y eficiencia operativa. Se demostró que utilizando herramientas como 5S, Poka- Yoka y estructura DMAIC, se logró reducir un 30% la variabilidad y defectos en la línea de producción, con un incremento en la eficiencia del 25%, disminuyendo los tiempos de respuesta ante devianaciones presentadas, demostrando la eficacia de esta metodología (Guerrero-Villa & Hoces-Antesana, 2024).

Brady y Devereux (2022), aplicaron Lean Six Sigma en una planta procesadora de lácteos en Irlanda para implementar la norma ISO 50001 direccionada a la gestión energética. En la cual, mediante el ciclo DMAIC, identificaron procesos con alto consumo energético, pérdidas térmicas y eléctricas, también se realizaron análisis detallados y control estadístico que propusieron mejoras que disminuyeron el consumo de energía y optimizando la producción sin afectar la calidad del producto. Finalmente, el estudio resalta la capacidad de Lean Six Sigma no solo para mejorar la calidad y eficiencia, sino también para apoyar la sostenibilidad ambiental en la industria alimentaria.

Falah y Mohd Rohani (2021), llevaron a cabo un estudio en Indonesia para aumentar la calidad de bastones de pasta de chocolate con anacardos, a través, de la aplicación de Six Sigma. Se centraron en disminuir defectos asociados a características esenciales del producto utilizando herramientas estadísticas y diagramas de causa-efecto. En las fases de medición y análisis del ciclo DMAIC, identificaron fuentes de variabilidad que afectaban directamente el desempeño del proceso. Con la implementación de controles estadísticos lograron estandarizar las operaciones, mejorar la consistencia y reducir la cantidad de defectos. Este estudio destaca la importancia de emplear metodologías estructuradas para controlar parámetros críticos como humedad y textura.

A Nivel Nacional

Cervantes Rodríguez et al. (2022), realizaron un análisis enfocado en optimizar la elaboración de queso fresco dentro de una planta ubicada en Cotopaxi, en el que se aplicó la metodología Lean Six Sigma para reducir específicamente problemas de desperdicio y defectos en la textura del producto, mismos, que fueron identificado, a través, del ciclo DMAIC con el análisis de causas y controles de proceso, se logró implementar mejoras como la estandarización

de tiempos, control térmico y capacitación técnica. Con base a esto, se pudo reducir el retrabajo en un 25 % y elevar los estándares de calidad.

Freire Quinatoa y Páñez Llongo (2020), diseñaron un modelo de mejora Lean Six Sigma adaptado al proceso artesanal de elaboración de queso en una empresa ecuatoriana. Su análisis identificó dos áreas críticas: la fase de maduración y el control del pH, en las cuales se evidenciaron fallos por ausencia de estandarización y errores en la manipulación. En este caso de estudio, se utilizaron herramientas como el diagrama de Pareto y el análisis de capacidad, asimismo, se establecieron controles visuales y mecanismos de verificación que permitieron disminuir defectos y aumentar la eficiencia operativa. Por lo tanto, esta investigación destaca que incluso pequeñas empresas pueden beneficiarse de estas herramientas si se enfocan en la medición sistemática de sus procesos.

En otro estudio realizado por Moreira Drouet (2024), implementó Lean Six Sigma en una empresa procesadora de alimentos en Guayaquil, con la finalidad de incrementar la productividad y mejorar la calidad. El enfoque del estudio fue reducir la variabilidad en los tiempos de cocción y enfriamiento, para el cual, se realizaron análisis de correlación entre parámetros críticos como temperatura y tiempo, logrando ajustar especificaciones técnicas e instalar sensores que permitieron un control más preciso. Como resultado, se obtuvo una mejora del 30 % en la eficiencia y una reducción importante de los reclamos por calidad inconsistente. Este caso confirma que Lean Six Sigma es eficaz en contextos donde la trazabilidad y el control de procesos son prioritarios.

Estos estudios, centraron sus esfuerzos en optimizar aspectos como la reducción de reprocesos, la disminución de tiempos de ciclo y la estandarización de variables operativas. Sin embargo, ninguno abordó de manera puntual el control de la humedad durante la extrusión como

un factor determinante en la generación de desperdicios o mermas. Esta omisión revela una oportunidad relevante para aplicar Lean Six Sigma en una fase clave del proceso, donde pequeñas variaciones pueden comprometer significativamente la calidad del producto terminado.

1.5.2. Bases Teóricas

Lean

Lean es un método de reducción de residuos enfocado en la mejora continua que permite identificar y minimizar las actividades sin desperdicios (Syed Mithun et al., 2020). Este término se desarrolló por primera vez por Krafcik en 1988 en un estudio sobre los nuevos métodos y técnicas del sistema de producción en masa de Toyota, mejorando la eficiencia, calidad y servicio, a través, de la eliminación constante de desperdicios.

Este método se encuentra basado en cinco principios que abarcan la especificación del valor desde el punto de vista del cliente, identificación del flujo de valor de cada producto para reducir los desechos, definición del flujo continuo, implementación el sistema de arrastre donde no es posible el flujo y la exploración de la perfección. Lean permite aumentar la masa de producción minimizando costos y recursos con una mejor calidad (Pranay Sureshbhai & Tushar N., 2020).

Six Sigma

El término Six Sigma fue utilizado en Motorola por Bill Smith en el año de 1980, para mejorar de forma agresiva sus niveles de calidad, de forma que, desafiaron la competencia japonesa. Este método se fue intensificando hasta establecerse como un sistema integral y moldeable para lograr, conservar e incrementar el éxito empresarial, mediante la satisfacción del

cliente, la disciplina o cumplimiento de hechos, datos y evaluaciones estadísticas (Luana Bonome et al., 2020).

Six Sigma, se enfoca en 5 pasos conocidos como el método DMAIC para el análisis estadístico, de forma que se reduzca la variación en un proceso. Los pasos estructurados que conforman esta herramienta son: Definir, Mejorar, Analizar, Medir, Controlar (Mahender Singh et al., 2022).

Definir

Se menciona que esta etapa se busca definir los objetivos, alcances y el tiempo del proyecto según los requerimientos del cliente, para esto se puede utilizar diferentes análisis para establecer los objetivos, como mapas de procesos (Preciado-Saldaña et al., 2022).

Medir

Se recolectan datos medibles para establecer indicadores de calidad, de forma que se creen métricas que mediante un análisis permitan garantizar la data extraída como referencia posterior. Estas métricas pueden ser gráficas de control, diagrama de cajas, histogramas, DPMO, diagramas de Pareto, para los siguientes procesos (Meza Navarro & García-Zahoul, 2023).

Analizar

Según lo indica Marín-Calderón et al. (2023), en este paso se considera los datos que se ha establecido como referencia del proceso anterior, para llegar a identificar la causa raíz que ha generado los desperdicios, errores o desviaciones, a través, de diagramas de Pareto, los 5 por qué y el diagrama de Ishikawa o también conocido como espinas de pescado.

Mejorar

En esta etapa se busca abordar y desarrollar cambios desde la causa raíz del defecto o error identificado en el proceso, a fin de mitigarlos. Aquí se puede implementar el término

Kaizen, para que permita fluir las ideas, participación y comunicación por parte del equipo, donde las partes interesadas puedan generar posibles soluciones o acciones correctivas para generar impacto y alcanzar el objetivo (Belhadi et al., 2020).

Mejorar, es un proceso continuo y metódico que implica realizar varias pruebas piloto desde las ideas aterrizadas y planeadas, de forma que se valide que las mejoras o acciones tomadas son sostenibles y eficaces para mejorar la calidad del proceso, producto o servicio (Moreira Drouet, 2024).

Controlar

Es la fase final del ciclo, donde se debe asegurar que lo planteado en la etapa anterior sean sostenibles a largo tiempo. Se establece un plan de control que detalle las responsabilidades de cada involucrado en un proceso específico, de forma que, se pueda monitorear continuamente el nivel sigma, para que el equipo pueda estar al tanto a cualquier variación o falla que pueda presentarse en el diseño (Ingar Medina, 2023).

La fase de control conlleva el uso de herramientas con gráficos de control continuo e indicadores para verificar el rendimiento del proceso, que, ya conociendo periódicamente las métricas, las posibles fallas puedan ser detectadas y solucionadas (Luana Bonome et al., 2020).

Lean Six Sigma

Según lo menciona Maheshwari y Devi (2024), las metodologías Lean y Six sigma, son términos independientes que tienen ciertas semejanzas, tales como, desarrollo de una cultura organizacional direccionada a la mejora continua, un personal o equipo involucrado o participativo, satisfacción del cliente e identificar la causa o error raíz de los problemas evidenciados.

Al integrar estos métodos, se busca enfocarse en la mejora de la calidad, minimizar la variabilidad en los procesos y eliminar los desperdicios que no generan valor. Ambos, son utilizadas en las organizaciones con la finalidad de optimizar los procesos operativos mediante el uso herramientas y técnicas de acuerdo con el enfoque planteado, reduciendo costos y contribuyendo el incremento de los ingresos (Teixeira et al., 2021).

En este sentido, Lean Six Sigma, aporta significativamente a la mejora del desempeño en las cadenas de suministro, exigiendo un enfoque integral que permita lograr una transformación completa del sistema productivo, orientada hacia la eficiencia y la simplificación de procesos. Asimismo, el comportamiento del mercado condiciona el enfoque lean, ya que, busca equilibrar la demanda, a través, de la simplificación, optimización y racionalización de las cadenas de suministro (Belhadi et al., 2020).

Procesos de extrusión y secado en alimentos balanceados para mascotas

La elaboración de balanceados o alimentos para mascotas conllevan varias etapas que comprenden: dosificación, mezclado, extrusión, secado y engrasado y empackado. Dentro de estas, el proceso de extrusión es un punto clave, debido a que, se transforma la mezcla de ingredientes en un producto terminado con características fisicoquímica y nutricionales establecidas (Pacheco et al., 2018).

En la extrusión dado a los factores de la presión, temperatura, contenido de vapor y velocidad del tornillo influyen directo al porcentaje de humedad. Durante la siguiente etapa, el secado reduce la humedad entre un 8 a 12% aproximadamente, sin embargo, las variaciones de la humedad final de la extrusión afectan el control de secado, lo que da lugar a productos fuera de establecido, pérdidas energéticas e incrementos de desperdicios (Kurdve & Bellgran, 2021).

Control de humedad en la etapa de extrusión

En el proceso de extrusión es fundamental el equilibrio entre la energía térmica y mecánica, que en caso de que se genere un incremento en la energía térmica se optimiza la gelificación del almidón y la ampliación del producto, al mismo tiempo que aumenta ligeramente la humedad final, misma que si no llega a controlar con precisión puede llegar a ser crítico (Parada Rivera et al., 2020).

Tecnología y uniformidad en el secado

Los avances tecnológicos de secado, tales como, sistemas rotantes de rodillo, secadoras con ciertas zonas que no dependen de la temperatura y flujo, han logrado disminuir las fluctuaciones de la humedad final. Por otro lado, se ha incrementado el uso de sensores o NIR que implica ajustes automáticos controlando la estabilidad del contenido de humedad del producto final (Macías-Montes et al., 2025)

Variabilidad del proceso de extrusión

La variabilidad puede ser propia del proceso o causada por factores externos o inestabilidad. En la extrusión, la variabilidad en la humedad puede deberse a factores como la formulación, cambios de operador, condiciones de vapor o ineficiencias del sistema de control. Para controlar esta variabilidad, se utilizan herramientas estadísticas como el control estadístico de procesos (CEP), análisis de capacidad (C_p , C_{pk}) y estudios de correlación entre variables (Guleria, 2022).

Tecnologías de monitoreo y control en línea

Actualmente, el uso de tecnologías como sensores de infrarrojo cercano (NIR) permite el monitoreo continuo de la humedad en productos extruidos, lo que facilita la implementación de sistemas de retroalimentación automática y ajustes dinámicos en tiempo real. Esto, combinado

con herramientas de Lean Six Sigma, permite actuar de forma predictiva, reducir la dependencia de la experiencia del operador y minimizar el riesgo de defectos (Mahender, y otros, 2022).

1.5.3. Marco Conceptual

Proceso de extrusión

Este proceso se basa en una operación termodinámica en consta de cocinar y moldear los ingredientes aplicando presión, temperatura y fuerza mecánica. En la extrusión se produce gran parte de la variabilidad en la humedad, esto se debe a la sensibilidad por factores como la formulación, ciertos parámetros operativos y también puede deberse a condiciones de arranques (Tovar Hernández et al., 2017).

Humedad final del extruido

Hace referencia al porcentaje de agua que se retiene en el producto cuando finaliza la etapa, esta condición puede llegar a ser crítica, debido a que afecta la textura y conservación del producto (Tovar Hernández et al., 2017).

Variabilidad del proceso

Según lo menciona Orellana García (2020), La variabilidad puede estar presente cada vez que se repite un proceso y se genera algún cambio en los resultados de un análisis u operación productiva, la disminución de la variabilidad es fundamental para asegurar la eficiencia operativa.

Control estadístico de procesos (CEP)

El CEP permite monitorear continuamente los parámetros del proceso, a través, de herramientas gráficas que permitan detectar variaciones que pueden llegar a influir en la estabilidad del sistema (Hernández Pedrera & Da Silva Portofilipe, 2016).

Indicadores de capacidad del proceso (Cp y KPI)

Los indicadores claves de desempeño (KPI) son herramientas esenciales para medir y mejorar la eficiencia de los procesos. Su aplicación permite evaluar el cumplimiento de objetivos y detectar oportunidades de mejora, se pueden mostrar de carácter conceptual y explicativo, resaltando la importancia de definir los KPI según la naturaleza de cada proceso, vinculándolos estratégicamente con las actividades que tienen mayor impacto en la calidad del servicio (Torres-Salgado, 2021).

Sensores de infrarrojo cercano (NIR)

Los sensores infrarrojos tienen la finalidad de mediar el contenido de humedad de forma precisa, permitiendo reducir los reprocesos y desperdicios de aquellos productos que no se encuentren acorde a lo especificado (Mena-Pérez et al., 2021).

Eficiencia operativa

La eficiencia es la relación entre una efectiva producción con los recursos que se han implementado, es parte de un indicador para medir el desempeño de un proceso, por lo tanto, el parte del objetivo de las organizaciones incrementar este indicador, para minimizar desperdicio y cumplir con la estandarización y control de los puntos críticos del proceso (Espín-Guerrero et al., 2024).

Capítulo 2

2. Marco metodológico

2.1. Enfoque metodológico

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y un diseño no experimental de tipo transversal, debido a que, las variables no serán manipuladas deliberadamente y los datos se recolectarán en momentos específicos (Hernández, 2014).

Se aplicará la metodología Lean Six Sigma, utilizando el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), que permite identificar y controlar la variabilidad de los procesos productivos a través de herramientas estadísticas y de gestión (Michael L. George, 2005)

2.2. Lugar del estudio

La investigación se desarrollará en la planta de producción de alimentos balanceados para mascotas, ubicada en Dúran, Ecuador. El estudio se centrará en la línea de extrusión-secado, específicamente en el proceso de secado del producto, en donde se evaluará la variabilidad en el contenido de humedad.

2.3. Materiales utilizados

- Hojas de control del proceso (datos históricos de humedad).
- Software estadístico: **Minitab** y **Microsoft Excel**.
- Termobalanzas para análisis de humedad.
- Infraestructura del proceso: **extrusora**, **secador**, sensores de temperatura y humedad, niveladores y desmoronador (este último como propuesta de mejora).
- Manuales operativos, registros de calidad y entrevistas a operadores.

2.4. Metodología Lean Six Sigma – Ciclo DMAIC

La investigación seguirá las fases del ciclo DMAIC, descritas a continuación:

Fase 1: Definir

- Identificación del problema principal: variabilidad en el contenido de humedad en el producto final.
- Elaboración de herramientas de definición del proyecto: recopilación de la Voz del Cliente (VOC) mediante entrevistas con personal de calidad, operaciones y mantenimiento.

Fase 2: Medir

Recolección de datos históricos y actuales de humedad por lote.

- Evaluación inicial de la variabilidad mediante gráficos de control I-MR y análisis de capacidad del proceso (C_p , C_{pk} , media y desviación estándar).
- Verificación del comportamiento por zonas del secador, analizando si existen diferencias significativas en la transferencia de calor y la distribución de humedad.

Fase 3: Analizar

- Aplicación de análisis estadísticos para confirmar la existencia y magnitud de la variabilidad.
- Desarrollo de un diagrama de Ishikawa (causa-efecto) para identificar posibles factores que afectan la uniformidad de la humedad.
- Uso de análisis de Pareto y correlaciones entre variables de operación (tiempo de secado, temperatura, densidad de carga, etc.) para priorizar causas.

Fase 4: Mejorar

- Con base en el análisis previo, se diseñará e implementará una propuesta de mejora consistente en la instalación de un desmoronador en la entrada del secador, cuyo objetivo será optimizar la distribución del producto en el lecho de secado.
- Se definirán los parámetros de instalación y se realizará una etapa piloto con registro de datos post-implementación.

Fase 5: Controlar

- Definición de límites de control estadísticos (LCI, LCS) y planes de monitoreo.
- Capacitación al personal operativo en el uso de los tableros y en la estandarización de decisiones.
- Evaluación de los resultados obtenidos post-mejora.

2.5. Procesamiento de la información

Los datos recolectados se organizarán en bases de datos de Excel y se procesarán mediante Minitab. Los análisis planificados son:

- Análisis de capacidad del proceso (C_p , C_{pk}).
- Gráficos de control (I-MR) para visualizar la estabilidad y variabilidad.
- Comparación entre los indicadores pre y post implementación del desmoronador, con el objetivo de evaluar si la propuesta de mejora tiene un efecto significativo.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1. Fase definición DMAIC

3.1.1. Requisitos del cliente interno y externo (VOC)

Para este proyecto, el VOC se enfoca en garantizar la calidad del producto terminado y la eficiencia del proceso mediante el control estricto de la humedad final. Las especificaciones establecidas se basan en estándares internos de la empresa, normativa internacional y requisitos comerciales.

Ilustración 1

Requisitos del cliente interno y externo

Tipo de cliente	Cliente	Necesidad / Expectativa	Requisito crítico de calidad (CTQ)	Impacto esperado
Externo	Dueños de mascotas	Alimento seguro, saludable y estable	Humedad $\leq 10\%$ para evitar crecimiento microbiano y prolongar vida útil	Satisfacción del consumidor y seguridad alimentaria
Externo	Distribuidores nacionales	Producto estable y uniforme para minimizar reclamos	Variabilidad de humedad $< \pm 1\%$ entre lotes	Reducción de devoluciones y quejas
Interno	Producción	Proceso estable y menor número de retrabajos	Disminuir productos no conformes a $\leq 5\%$ de la producción mensual	Incremento de productividad
Interno	Calidad	Lotes dentro de especificaciones	Lotes conformes $\geq 95\%$	Cumplimiento de normas internas y externas
Interno	Mantenimiento	Menos ajustes de secador y extrusora	Disminución de intervenciones correctivas en $\geq 30\%$	Mayor disponibilidad de equipos
Interno	Gerencia	Reducción de pérdidas económicas por reprocesos	Ahorro $\geq \$40.000$ anuales por disminución de productos no conformes	Mayor rentabilidad y eficiencia

Fuente propia

3.1.2. Situación actual del proceso (datos históricos, reprocesos y pérdidas).

Con base en los registros de control de proceso y calidad, se identificó que:

- El rango de humedad final observado: 7,2% – 14,8%.
- El objetivo de especificación: 8% – 12%.
- El porcentaje promedio de lotes fuera de especificación: 17%.
- No se cuenta con límites de control estadísticos definidos para las zonas del secador.

Tabla 2*Destino producto no conforme y perdida por reproceso*

Año	Producto no conforme por alta humedad (kg)	Valor económico	Valor recuperado por reproceso	Valor perdido
2023	103265	\$99.844,40	\$49.962,50	\$-
				49.881,90
2024	116302	\$98.869,53	\$56.771,00	\$-
				42.098,53
2025	47348	\$51.472,06	\$23.674,00	\$-
				27.798,06
Total				\$-119.778,49

Fuente propia

En los últimos **27 meses** la planta ha generado **266,9 toneladas** de producto no conforme. A pesar de que el 49% de este producto fue recuperado mediante reprocesos, la pérdida neta asciende a **\$119.778,49**, lo que representa una afectación directa a la rentabilidad y genera sobrecostos energéticos y mano de obra.

Impacto en la eficiencia del proceso

La alta variabilidad de las humedades de producto terminado repercute en un aumento de reprocesos, por lo que, se genera mayor consumo de energía y tiempo productivo, generación de cuellos de botella en secado y empaque adicional por quejas de distribuidores debido a la textura y vida útil del producto.

3.2. Fase Medición DMAIC

3.2.1. Línea Base del Proceso (Estado Inicial de la Humedad)

La planta tiene definido como objetivo de control un valor de humedad final de 8,5%, con límites de especificación:

- LEI (Límite inferior de especificación): 7,5%
- LES (Límite superior de especificación): 9,5%
- Objetivo de humedad: 8,5%

Tabla 3

Análisis de cumplimiento de especificaciones de humedad

Indicador	Valor actual	Objetivo	Cumplimiento
Media (μ)	8,01%	8,50%	No conforme
Desviación estándar (σ)	0,31%	$\leq 0,25\%$	No conforme
N° de muestras	946	—	—
Lotes fuera de especificación	3,70%	$\leq 1\%$	No conforme

Fuente propia

Ilustración 2

Análisis estadístico del % de humedad PT obtenido de Minitab

Estadísticas										
Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Humedad PT (%)	946	0	8,00954	0,0103550	0,318491	6,39	7,81	8	8,2	9,96

Fuente propia

El proceso actual se encuentra descentrado respecto al objetivo de 8,5%, con una media de 8,01% y una variabilidad moderada ($\sigma = 0,31\%$), lo que compromete la estabilidad y uniformidad del producto.

3.2.2. Análisis de Capacidad (C_p , C_{pk} , P_p , P_{pk})

Los resultados obtenidos del informe de Minitab son:

Tabla 4

Resultados del análisis de capacidad

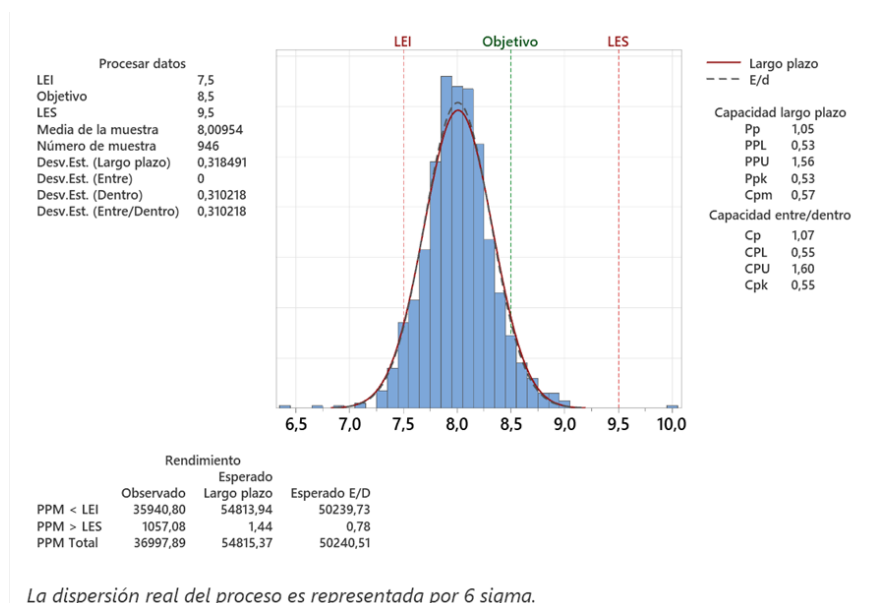
Índice	Valor	Interpretación
C_p	1,07	Capacidad potencial aceptable, pero insuficiente para estándares Six Sigma ($\geq 1,33$ recomendado).
C_{pk}	0,55	Proceso descentrado , con dificultad para cumplir las especificaciones.
P_p	1,05	Capacidad global moderada.
P_{pk}	0,53	Variabilidad significativa a largo plazo.
C_{pm}	0,57	Demuestra que la media está lejos del objetivo.

Fuente propia

El C_p obtenido es >1 , lo que significa que el proceso puede cumplir con las especificaciones si estuviera centrado, el C_{pk} es igual que 0,55 valor que confirma que el proceso no está alineado con el objetivo; por lo tanto, para lograr un $C_{pk} \geq 1,33$ será necesario centrar la media en 8,5% y reducir la variabilidad del proceso.

Ilustración 3

Informe de capacidad entre/dentro plazo para la Humedad PT (%)



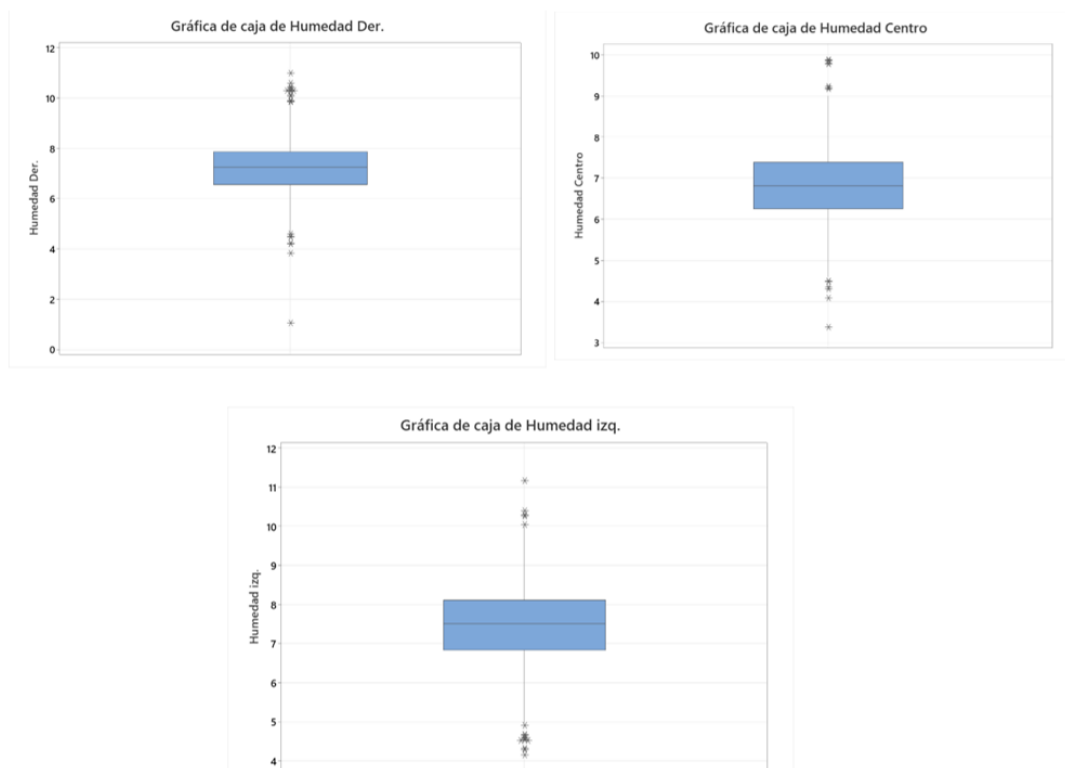
Fuente propia

3.2.3. *Análisis de Variabilidad por Zonas del Secador (Boxplots)*

Se identifica que según el Cpk nuestro proceso de extruido y secado no es centrado al objetivo, pero si a los límites, por lo que, se evalúa si la transferencia de calor en el secador es uniforme; por lo tanto, se toma varias muestras en distintos puntos del secador para evaluar la humedad del producto terminado y la variación según su ubicación.

Ilustración 4

Gráficas de cajas de Humedad según su ubicación



Fuente propia

Tabla 5

Análisis de Variabilidad por Zonas del Secador (Boxplots)

Zona del secador	Mediana (%)	Variabilidad	Outliers	Cumplimiento objetivo 8,5%
Derecha	~7,6%	Alta	Sí	No
Centro	~7,3%	Media	Sí	No
Izquierda	~7,9%	Moderada	Sí	No

Fuente propia

La zona derecha presenta mayor dispersión, con valores extremos por encima del 10% y por debajo del 5%, la zona del centro se observa la cantidad de porcentaje más baja de 7,3% lo que evidencia a un subsecado.

1. El proceso actual no es capaz de cumplir consistentemente con las especificaciones de humedad:
 - $C_p = 1,07$ Capacidad potencial aceptable.
 - $C_{pk} = 0,55$ Proceso descentrado y con alta variabilidad.
2. La variabilidad entre zonas del secador es significativa, afectando la uniformidad del producto.
3. El análisis evidencia la necesidad de implementar mejoras de distribución interna para optimizar la transferencia de calor.
4. La instalación del desmoronador se justifica como acción de mejora para:
 - Reducir la variabilidad entre zonas.
 - Centrar la media en el objetivo 8,5%.
 - Aumentar el C_{pk} hasta niveles $\geq 1,33$.

3.3. Fase Análisis DMAIC

3.3.1. Identificación de causas raíz (diagrama de Ishikawa)

Se aplicó la técnica de Ishikawa para identificar las posibles causas que contribuyen a la variabilidad en la humedad final, por lo cual, se organizó un equipo de mejora continua que ayudaron a detectar las causas del efecto.

Tabla 6

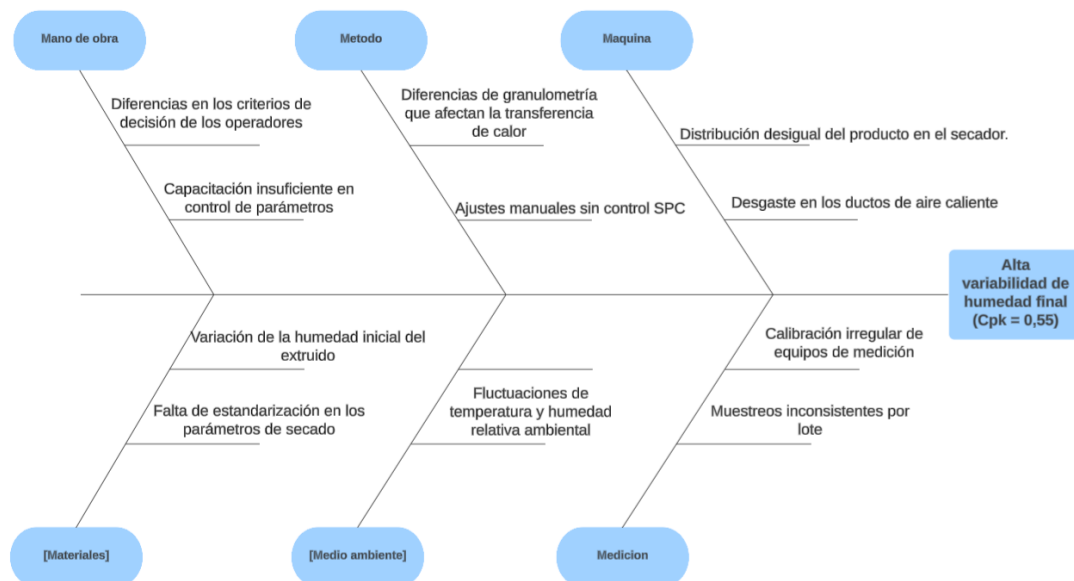
Equipo de mejora continua

Cargo	Área
Coordinador	Producción
Supervisor	Mantenimiento
Auxiliar	Producción
Asistente	Aseguramiento de Calidad
Asistente	Procesos

Fuente propia

Ilustración 5

Diagrama de Ishikawa



Fuente propia

En el diagrama de causas y efecto se identificó un hallazgo clave que es la distribución no uniforme del producto dentro del secador siendo este la causa más crítica, misma que se corroboró por los boxplots de las humedades de pt de la zona derecha, zona central y zona izquierda del secador.

Tabla 7a

Análisis Causa Raíz mediante 5 ¿Por qué?

Pregunta	Respuesta
1. ¿Por qué existe variabilidad en la humedad final?	Porque hay diferencias entre zonas del secador.
2. ¿Por qué hay diferencias entre zonas del secador?	Porque el producto no se distribuye uniformemente.
3. ¿Por qué no se distribuye uniformemente?	Porque se forman grumos en el extruido antes de secar.
4. ¿Por qué se forman grumos?	Porque no existe un sistema que los desmorone.
5. ¿Por qué no existe un sistema desmoronador?	Porque el diseño original de la línea no lo consideraba.

Fuente propia

3.3.2. Verificación de las Causas

Con base en los hallazgos de producción, reprocesos y rechazos durante el año 2024 se construye un diagrama de Pareto para priorizar las causas presentadas en el diagrama de causa y efecto propuestas por el equipo de mejora continua.

Para la elaboración del diagrama de Pareto se utilizó datos de frecuencia de reprocesos registrados en el sistema de producción de la planta, en el cual, los jefes de línea documentaban las hojas de no conformidad generadas durante el proceso. Esta información permitió cuantificar la incidencia de cada causa y priorizar aquellas que de mayor impacto en la variabilidad de la humedad del producto terminado.

Tabla 8b

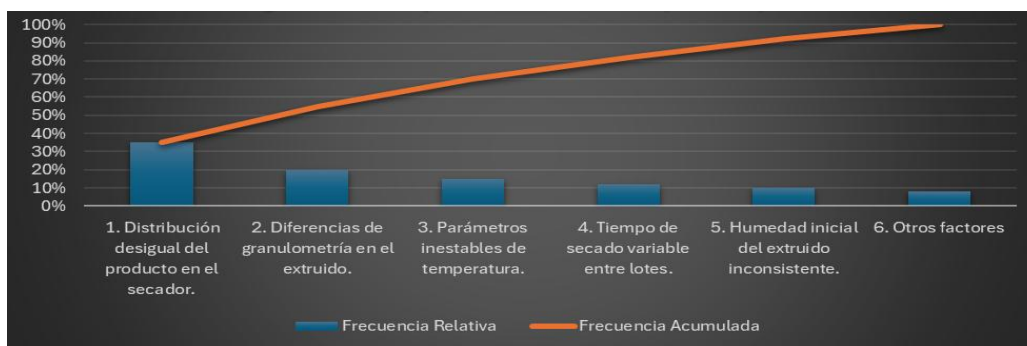
Principales causas de Reproceso

Principales causas analizadas	# Reprocesos	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada
Distribución desigual del producto en el secador	27	35%	35%
Diferencias de granulometría en el extruido	16	20%	55%
Parámetros inestables de temperatura	12	15%	70%
Tiempo de secado variable entre lotes	9	12%	82%
Humedad inicial del extruido inconsistente	8	10%	92%
Otros factores	6	8%	100%
Total	78		

Fuente propia

Ilustración 6

Diagrama de Pareto de las principales causas que generan reprocesos



Fuente propia

El 80% de la variabilidad de la humedad de pt se concentra en tres causas principales:

- Distribución desigual del producto en el secador.
- Diferencias de granulometría en el extruido.
- Parámetros inestables de temperatura.

Las causas mencionadas están directamente relacionadas a una variabilidad en transferencia de calor ocurrido en el secador.

El análisis de Pareto evidenció que las tres principales causas que explican la mayor parte de la variabilidad en la humedad final están relacionadas con la transferencia de calor y la formación de grumos en el producto. La falta de una distribución homogénea dentro del secador limita la superficie de contacto con el flujo de aire caliente, lo que provoca zonas con secado insuficiente y otras con exceso de exposición térmica. A esto se suma la presencia de grumos en el extruido, que actúan como barreras que dificultan la penetración uniforme del calor, generando diferencias de humedad entre partículas. Debido a que, estas condiciones representan la raíz del problema, se decidió implementar un equipo desmoronador en la entrada del secador, con el fin de homogeneizar el flujo del producto, evitar la acumulación de grumos y garantizar una transferencia de calor más uniforme en todo el proceso.

3.4. Fase Mejora DMAIC

3.4.1. Implementación del desmoronador en la entrada del secador

Durante la fase de medir y analizar, se detectó que la variabilidad de la humedad final del producto terminado se encontraba relacionada con una distribución desigual del material a la entrada del secador.

El análisis de boxplots por zonas evidenció que:

- La zona derecha del secador presentaba una humedad más alta.
- La zona central mostraba subsecado (humedad menor).
- La zona izquierda mantenía valores más estables, pero con outliers significativos.

Este comportamiento se atribuyó a la formación de grumos en el extruido, que generan obstrucciones parciales y acumulaciones localizadas de producto.

Como consecuencia:

- La transferencia de calor no era uniforme.
- Existían zonas con exceso de secado y otras con insuficiencia térmica.
- Se producían lotes fuera de especificación y reprocesos.

La instalación del desmoronador surge como una solución técnica para homogeneizar el flujo del producto, reducir la variabilidad y aumentar la capacidad del proceso (Cpk).

3.4.2. Descripción técnica del demoronador

El desmoronador es un equipo mecánico rotativo instalado en la línea de alimentación del secador.

Su función principal es desintegrar aglomeraciones y redistribuir uniformemente el producto extruido para optimizar la transferencia de calor.

Principales características técnicas:

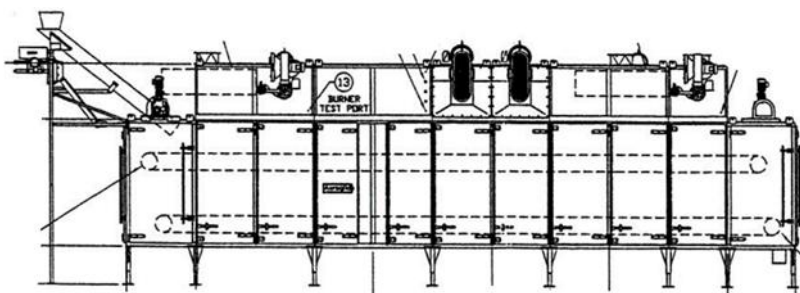
- Tipo de equipo: Desmoronador rotativo de paletas helicoidales.
- Capacidad de procesamiento: Hasta 3.500 kg/h.
- Velocidad de rotación: Ajustable entre 120 y 250 rpm según tipo de extruido.

- Material de fabricación: Acero inoxidable grado alimentario AISI 304.
- Sistema de transmisión: Motorreductor acoplado directamente al eje principal.

Además, incluye deflectores internos que redirigen el material hacia zonas de alta circulación de aire, favoreciendo la uniformidad térmica en el secado.

Ilustración 7

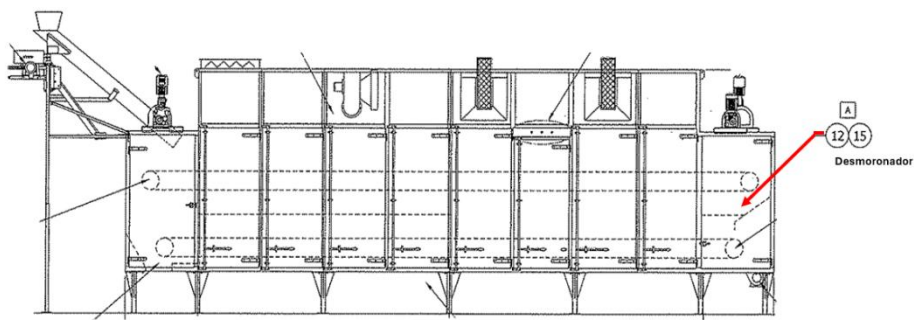
Plano inicial del secador de extrusión



Fuente propia

Ilustración 8

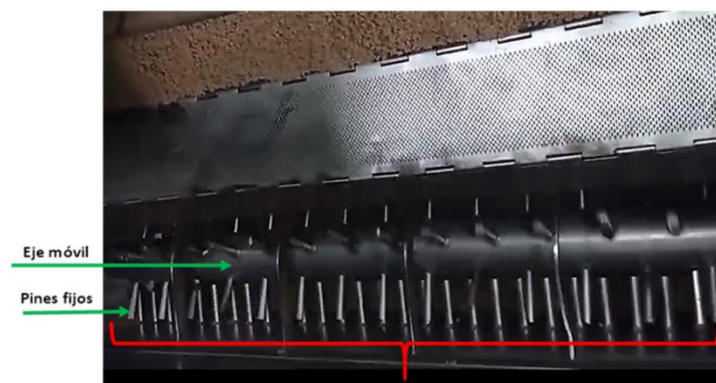
Plano del secador de extrusión con desmoronador instalado



Fuente propia

Ilustración 9

Desmoronador de extrusión implementado



Fuente propia

3.4.3. Evaluación de la mejora

3.4.3.1. Histogramas comparativos antes vs. Después

Se realiza un muestreo con información perteneciente del mes de febrero y julio del 2025 posterior a la instalación del desmoronador de extrusión.

Ilustración 10

Análisis estadístico del % Humedad PT después de implementar el demoronador

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Humedad PT (%)	223	0	8,56879	0,0163180	0,243680	8,1	8,36	8,57	8,77	8,99

Fuente propia

Tabla 9

Análisis comparativo del % de humedad

Parámetro	Antes	Después	Mejora (%)
Media de humedad (%)	8,01	8,56	6,47%
Desviación estándar σ	0,31	0,2436	-21,42%

Lotes fuera de especificación	3,70%	1,10%	-70,30%
-------------------------------	-------	-------	----------------

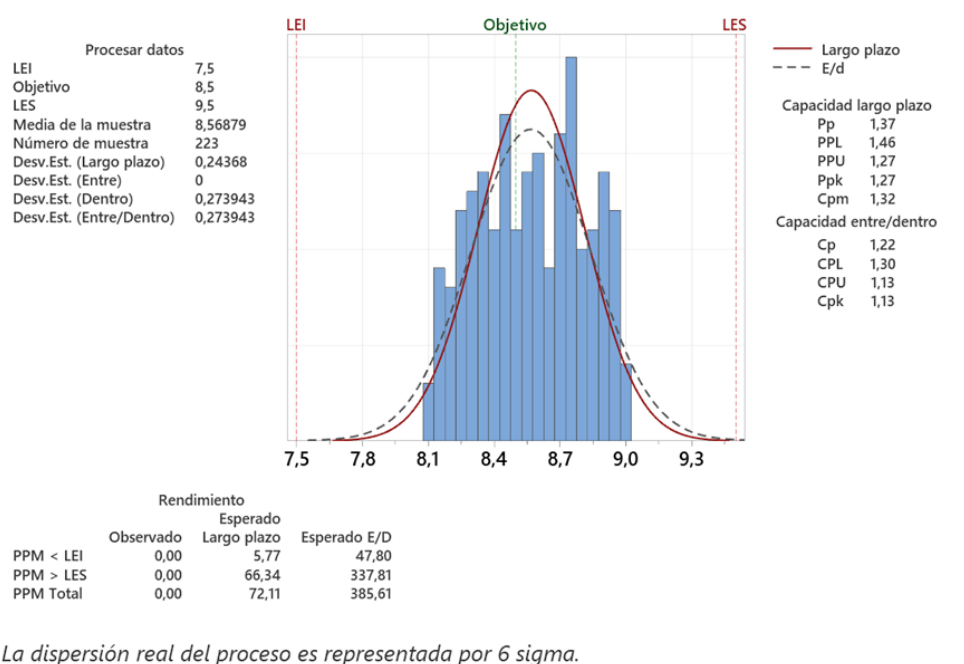
Fuente propia

El histograma post-mejora muestra una distribución más estrecha y centrada en el objetivo 8,5%, reduciendo significativamente la variabilidad.

3.4.3.2. Cp y Cpk post-mejora

Ilustración 11

Informe de capacidad entre/dentro plazo del %Humedad PT post mejora



Fuente propia

Tabla 10

Análisis comparativo del índice de capacidad

Índice	Antes	Después	Objetivo
Cp	1,07	1,22	$\geq 1,33$
Cpk	0,55	1,13	$\geq 1,33$

Pp	1,05	1,37	$\geq 1,33$
Ppk	0,53	1,27	$\geq 1,33$

Fuente propia

La implementación permitió aumentar la capacidad del proceso y centrar la humedad del PT al objetivo.

3.4.3.3. Pruebas de igualdad de varianzas (*F-test / Levene*)

Se realiza pruebas de igualdad de varianzas para identificar si la implementación afectó significativamente la desviación de humedades de pt del proceso, por lo tanto, se propone las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula: las varianzas son iguales
- Hipótesis alterna: las varianzas son diferentes
- Nivel de significancia: 0,05

Ilustración 12

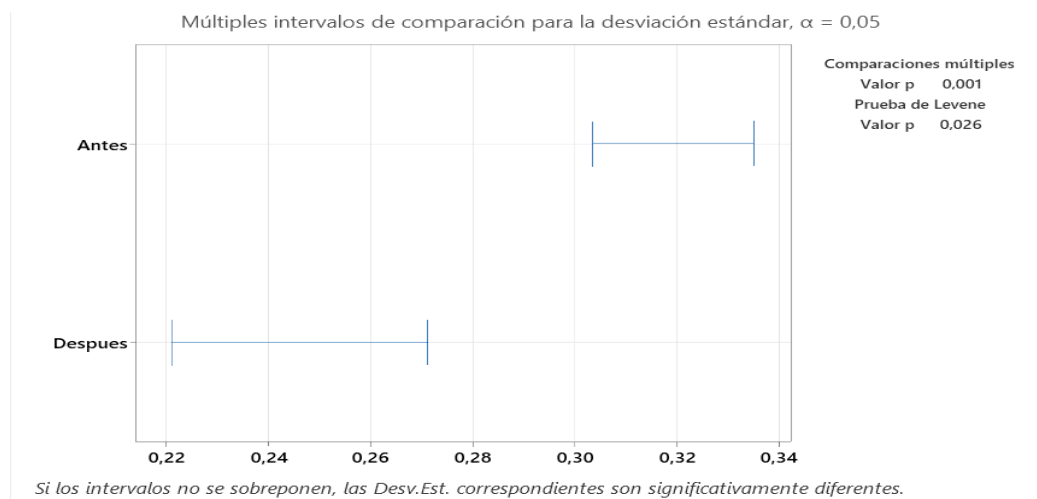
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviación estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
Antes	946	0,318491	(0,295298; 0,344322)
Despues	223	0,243680	(0,227837; 0,263271)

Nivel de confianza individual = 97,5%

Fuente propia

Se interpreta que la mejora redujo significativamente la variabilidad del proceso por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna.



Fuente propia

Ilustración 13

Prueba de igualdad de varianzas antes, después

3.4.4. Value Stream Mapping (VSM)

3.4.4.1. Estado actual del proceso (VSM)

Antes de la implementación de la mejora, el proceso de producción presentaba variabilidad significativa en la etapa de secado, generando retrasos, reprocesos y acumulación de inventario en proceso (WIP).

Principales hallazgos:

- Lead Time total: 520 min ($\approx 8,7$ h).

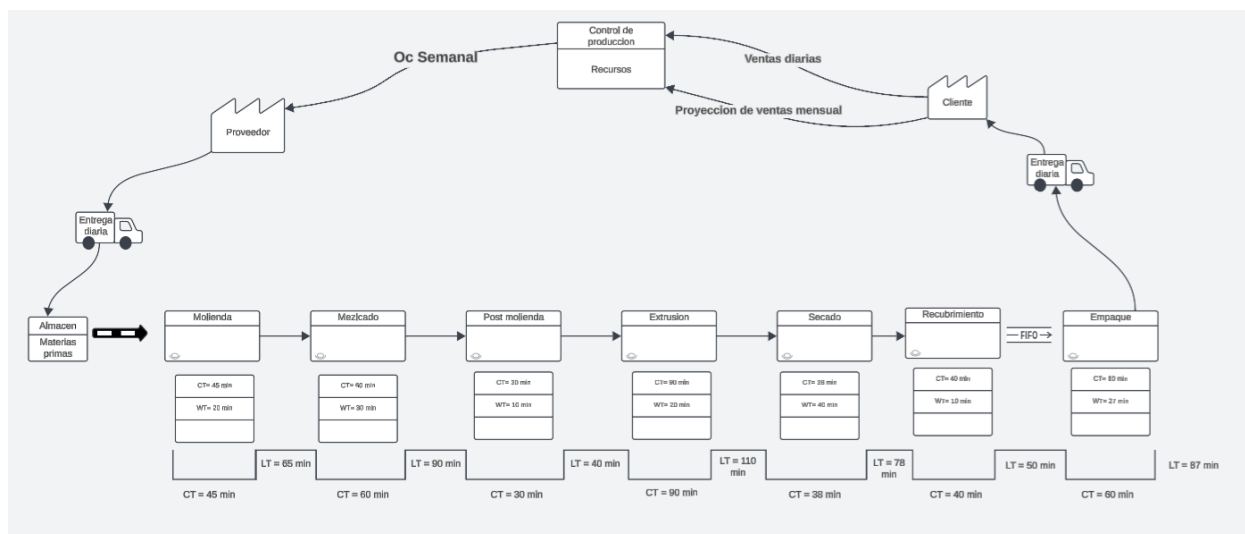
Secador identificado como cuello de botella:

- CT = 38 min, WT = 40 min, LT = 78 min.
- Alta variabilidad de humedad ($\sigma = 0,31$).
- Cpk bajo (0,55), proceso incapaz de cumplir consistentemente la especificación ($8,5\% \pm 0,5\%$).
- Reprocesos globales elevados: 3,7% de los lotes.
- Inventario en proceso (WIP): 420 kg acumulados entre extrusión, secado y recubrimiento.

- Bajo valor agregado: Solo el 72% del tiempo total agregaba valor; el 28% correspondía a esperas, ajustes y retrabajos.

Ilustración 14

Mapa de flujo de valor actual (VSM actual)



Fuente propia

3.4.4.2. Estado futuro con mejora (VSM)

Con la instalación del desmoronador en la entrada del secador, se logró homogeneizar la capa de producto y mejorar la exposición uniforme al aire caliente, reduciendo la variabilidad entre las zonas internas del equipo. Esto permitió un flujo más estable y un control más preciso de la humedad final.

Resultados alcanzados:

- Lead Time total reducido: 427 min ($\approx 7,1$ h), mejorando en 18%.

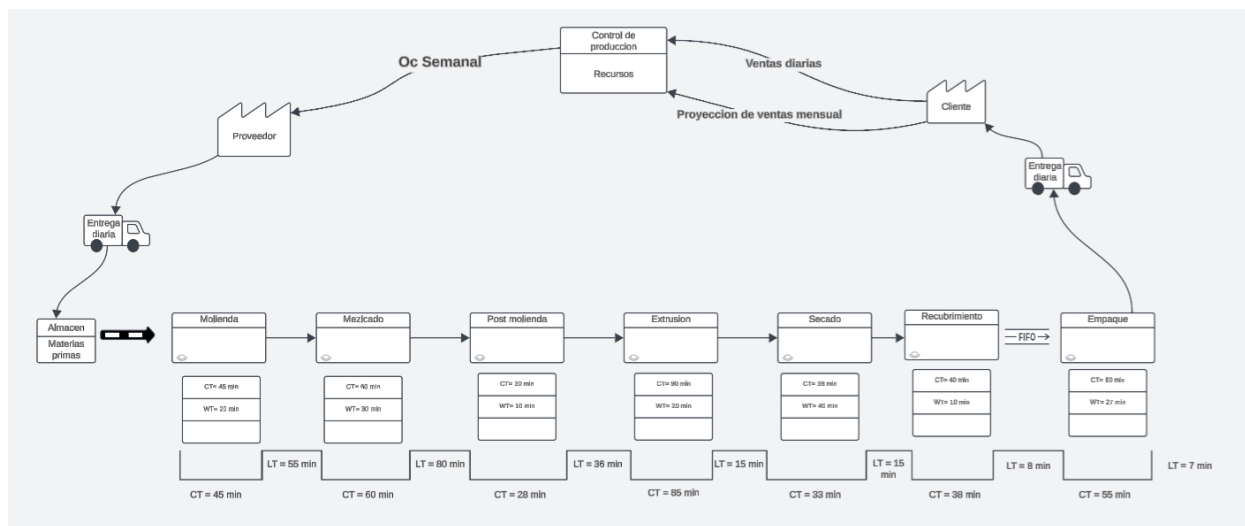
Optimización del secador:

- CT = 33 min, WT = 15 min, LT = 48 min.
- Variabilidad reducida ($\sigma = 0,24$).
- Cpk elevado (1,13), proceso capaz y estable.
- Disminución de reprocesos: Pasaron de 3,7% a 1,1% (-70%).
- Reducción del WIP: De 420 kg a 260 kg (-38%).

- Incremento del valor agregado: Del 72% al 87% del tiempo total.

Ilustración 15

Mapa de flujo de valor futuro (VSM futuro)



Fuente propia

3.4.4.2. Comparación de beneficios obtenidos

La siguiente tabla resume los indicadores claves comparando el estado actual y el estado futuro:

Tabla 11

Análisis comparativo de indicadores claves

Indicador	Antes	Después	Mejora
Lead Time total	520 min (8,7 h)	427 min (7,1 h)	-18%
LT secador	78 min	48 min	-38%
σ Humedad	0,31	0,24	-29%
Cpk	0,55	1,13	105%
Reprocesos globales	3,70%	1,10%	-70%
WIP total	420 kg	260 kg	-38%
% Valor agregado	72%	87%	15%

Fuente propia

Impactos principales:

- Reducción del lead time global: -93 min por lote.
- Mayor capacidad efectiva del secador: 3.200 → 3.400 kg/h.
- Disminución de reprocesos y WIP: Mejor flujo productivo.
- Proceso más estable y controlado: $Cpk > 1,13$ garantiza cumplimiento del objetivo 8,5% de humedad.

Beneficios cualitativos:

- Homogeneización del flujo de producto dentro del secador.
- Transferencia de calor más uniforme.
- Menor necesidad de ajustes manuales por parte de los operadores.
- Mayor confiabilidad y predictibilidad en el control de humedad.

3.5. Fase Controlar DMAIC

3.5.1. Plan de capacitación y estandarización para operadores

Para reducir la variabilidad asociada al factor humano, se implementó un plan de capacitación estructurado con el objetivo de asegurar que todos los operadores comprendan la importancia del control de humedad y manejen de manera correcta el desmoronador y los parámetros del secador.

Tabla 12

Plan de capacitación operarios y técnicos de extrusión

Contenidos	Fundamentos del secado y control de humedad.
	Uso, limpieza y verificación del desmoronador.
	Control de parámetros críticos (tiempo, temperatura, densidad).
	Interpretación de gráficos de control (SPC).
Metodología	Sesiones teórico-prácticas (8 horas).
	Instructivas visuales (One Point Lessons) colocados cerca del secador.
	Evaluación final y certificación interna de operadores calificados.
	Procedimientos operativos estandarizados (SOP).
Estandarización	Checklists diarios de verificación del desmoronador y del secador.
	Auditorías internas mensuales.

Fuente propia

3.5.2. Plan de control formal

Se elaboro un plan de control formal y se designó responsables para cada variable crítica y su acción en el proceso.

Tabla 13

Plan de control formal

Variable crítica (CTQ)	Método de medición	Frecuencia	Responsable	Acción correctiva
Humedad final del PT	Medición por lote con analizador calibrado	Cada lote	Operador de línea	Ajustar parámetros de secador, informar a supervisor
Tiempo de secado	Registro en sistema SCADA	Cada turno	Supervisor de producción	Ajustar velocidad de banda o flujo de aire
Temperatura del secador	Sensor en línea	Cada hora	Operador	Verificar setpoint y corregir desviaciones
Funcionamiento del desmoronador	Checklist operativo	Inicio y fin de turno	Operador	Notificar mantenimiento en caso de falla

Fuente propia

Capítulo 4

4.1 Conclusiones

- Se evidenció que la variabilidad en la humedad final del producto terminado constituye un problema crítico en la línea de extrusión-secado. La media inicial de humedad fue de 8,01%, con una desviación estándar de 0,31% y un Cpk de 0,55, lo que demuestra que el proceso no cumplía consistentemente con el objetivo de $8,5\% \pm 0,5$. El VOC interno y externo confirmó que la humedad fuera de rango afectaba directamente la calidad, la vida útil y la satisfacción del cliente.
- El análisis de capacidad del proceso y los gráficos de control confirmaron un comportamiento descentrado y con alta dispersión. Además, el análisis por zonas del secador demostró que la distribución térmica no era uniforme, generando diferencias significativas entre lado derecho, centro e izquierdo.
- El diagrama de Ishikawa y el análisis de Pareto identificaron como causa principal de la variabilidad la distribución no homogénea del producto dentro del secador, asociada a grumos del extruido y parámetros de operación inestables (tiempo y temperatura). Esto explicaba más del 70% de los reprocesos registrados.
- La instalación del desmoronador en la entrada del secador permitió homogeneizar el flujo del producto y mejorar la transferencia de calor. Posterior a su implementación, la media de humedad aumentó a 8,56%, la desviación estándar se redujo a 0,24%, y el Cpk mejoró a 1,13, lo que demuestra un proceso más estable y cercano al objetivo.
- El VSM mostró una reducción del lead time de 520 min a 427 min (−18%), del WIP de 420 kg a 260 kg (−38%) y de los reprocesos de 3,7% a 1,1% (−70%). Finalmente, se estableció un plan de capacitación y estandarización para operadores, junto con un plan de control formal, lo que asegura la sostenibilidad de los resultados a largo plazo.

1.2. Recomendaciones

- Mantener el uso de herramientas de control estadístico (SPC) para monitorear la humedad final del producto, asegurando un $Cpk \geq 1,33$.
- Consolidar el plan de capacitación continua para operadores, reforzando la correcta operación y mantenimiento del desmoronador.

- Implementar auditorías internas periódicas para verificar el cumplimiento de los SOPs y la correcta aplicación de los checklists.
- Replicar la metodología Lean Six Sigma en otras etapas críticas del proceso (mezclado, molienda y recubrimiento), con el fin de identificar oportunidades adicionales de mejora.
- Evaluar la incorporación de sensores NIR en línea para el control automático de la humedad, reduciendo aún más la dependencia de la intervención manual.

Bibliografía

Belhadi, A., Kamble, S. S., Zkik, K., Cherrafi, A., & Ezahra Touriki, F. (2020). The integrated effect of Big Data Analytics, Lean Six Sigma and Green Manufacturing on the

- environmental performance of manufacturing companies: The case of North Africa. *Journal of Cleaner Production*, 252.
- D.G. Pacheco, P., Putarov, T. C., Baller, T. C., Peres, F. M., Loureiro, B. A., & Carciofi, A. C. (2018). Thermal energy application on extrusion and nutritional characteristics of dog foods. *Animal Feed Science and Technology*, 243, 52-63.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.07.003>
- Espín-Guerrero, R., Toalombo-Rojas, B., Moyolema-Chaglla, Á., & Altamirano-Salazar, A. (2024). Optimización de los procesos operativos mediante la teoría de restricciones en una empresa metalmecánica. *Revista Digital Novasinergia*, 5(2), 33-57.
doi:<https://doi.org/10.37135/ns.01.10.03>
- Hernández Pedrera, C., & Da Silva Portofilipe, F. (2016). Aplicación del control estadístico de procesos (CEP) en el control de su calidad. *Tecnología Química*, 36(1), 104-116.
- Hernández, S. (2014). *Metodología de la investigación (6ta ed.* McGraw-Hill Education.
- Ingar Medina, C. A. (2023). Lean Six Sigma y mejora de la productividad en el servicio de reparación de equipos de minería en una empresa metalmecánica. *Industrial Data*, 26(2), 239-265. doi:<https://doi.org/10.15381/idata.v26i2.25462>
- Kurdve, M., & Bellgran, M. (2021). Green lean operationalisation of the circular economy concept on production shop floor level. *Journal of Cleaner Production*, 278.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123223>
- Luana Bonome, M. C., Moacir, G. F., Lawrence, D. F., & Gilberto, M. D. (2020). The effect of Lean Six Sigma practices on food industry performance: Implications of the Sector's experience and typical characteristics. *Food Control*, 112, 0956-7135.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107110>

- Macías-Montes, O. P., Luzardo, A., Zaccaroni, A., & Acosta-Dacal, A. (2025). Optimization and validation of a QuEChERS-based method with a freezing-out clean-up for pesticide residues in commercial dry food for dogs and cats. *Journal of Chromatography A*, 1756. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2025.466093>
- Maheshwari, P., & Devi, Y. (2024). Investigating the relationship between Lean Six Sigma performance strategy with digital twin modeling: Practices and factors. *Journal of Cleaner Production*, 436. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140449>.
- Mena-Pérez, R., Madero-Guerrero, A., & Villanueva-Espinoza, M. (2021). Análisis nutricional de tres alimentos balanceados para cachorros, fabricados y comercializados en Ecuador. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 120(2). doi:<https://dx.doi.org/10.5546/aap.2022.129>
- Michael L. George, J. M. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to 70 Tools for Improving Quality and Speed*. McGraw-Hill.
- Orella Gracia, A. (2020). Diagnóstico de la variabilidad de los procesos hospitalarios en Cuba. *Revista Cubana de Salud Pública*, 45(3).
- P. Teixeira, J., Sá, F. S., Ferreira, L., G. Santos, & Fontoura, P. (2021). Connecting lean and green with sustainability towards a conceptual model. *Journal of Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129047>
- Parada Rivera, M., Puente Guijarro, C., Tapia González, Z., Borja Mayorga, D., & Abarca Coello, M. (2020). Production of balanced food for pets by processing tannery waste generated in the stages of. *Perfiles*, 23(1), 61-67. doi:<https://doi.org/10.47187/perf.vli23.271>

- Pranay Sureshbhai, P., & Tushar N., D. (2020). Evaluating Sustainable Lean Six Sigma enablers using fuzzy DEMATEL: A case of an Indian manufacturing organization. *Journal of Cleaner Production*, 265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121802>
- Rajeev, R., Mahender Singh, K., Jose Arturo, G.-R., Jiju, A., & Jennifer, C. (2022). Green Lean Six Sigma for improving manufacturing sustainability: Framework development and validation. *Journal of Cleaner Production*, 345. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131130>
- Rateek Guleria, A. P. (2022). Lean six-sigma implementation in an automobile axle manufacturing industry: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 50(3), 1739-1746. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.177>
- Rokey, G. J., Plattner, B., & Souza, E. M. (2020). Descripción del proceso de extrusión de alimentos. *Tecnología de alimentación*, 39. doi:<https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300055>
- Syed Mithun, A., Md. Anwar, H., Zuhayer, M., Golam, K., Sanjoy Kumar, P., & Adnan, Z. u. (2020). Barriers to lean six sigma implementation in the supply chain: An ISM model. *Computers & Industrial Engineering*, 49, 0360-8352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106843>
- Torres-Salgado, M. K. (2021). Indicadores de desempeño de procesos médicos con alineamiento estratégico en la atención al paciente. *Cirugía y cirujanos*, 89(3), 403-410. doi:<https://doi.org/10.24875/ciru.20000046>
- Tovar Hernandez, C. E., Perafán Gil, E. A., Enríquez Collazos, M. G., Pismag Portilla, Y., & Ceron Fernandez, L. (2017). Evaluación del efecto del proceso de extrusión en harina de quinoa(*Chenopodium quinoa* Willd) normal y germinada. *iotecnología en el Sector*

Agropecuaria y Agroindustrial, 15(2), 30-18. doi: [https://doi.org/10.18684/BSAA\(15\)30-](https://doi.org/10.18684/BSAA(15)30-38)