

Título de Tesis Doctoral: **Nuevas estrategias de optimización en procesos de pesaje multicabezal**

Autor. **Alexander De Jesús Pulido-Rojano**

Resumen

En los últimos años, la industria del envasado de alimentos ha experimentado un gran crecimiento. Existen muchos factores que han contribuido a este crecimiento y algunos de ellos incluyen conceptos modernos y avances en la tecnología. Los gerentes de la industria alimentaria deben velar por mantener la rentabilidad en un mercado cada vez más competitivo, al tiempo de proporcionar a los clientes productos de alta calidad y un buen servicio. Una mayor automatización de las líneas de envasado puede ayudar a estas empresas a cumplir con los requisitos de calidad y servicio; por ejemplo, las pesadoras multicabezal utilizadas en los procesos de pesaje multicabezal.

La tecnología de pesaje multicabezal ha revolucionado las líneas de envasado y se utiliza para reducir la variabilidad de productos y procesos. Una pesadora multicabezal consta de varios cabezales de pesaje o tolvas que garantizan que los productos sean pesados con mucha rapidez y precisión. Esto permite envasar la cantidad deseada de un producto de acuerdo con su peso objetivo (valor nominal). Puede instalarse como parte de una línea integrada de pesaje y envasado o conectarse con equipos de envasado existentes. Además, es ideal para el pesaje preciso y rápido de productos que varían en tamaño, desde granulados a productos grandes y voluminosos.

En la presente Tesis Doctoral, se desarrolla un conjunto de estrategias diseñadas para optimizar el proceso de envasado en pesadoras multicabezales y minimizar la variabilidad en el peso del producto envasado. Para esto, se utilizan técnicas de optimización monoobjetivo y multiobjetivo, el índice de reducción de variabilidad, la función de pérdida de Taguchi y un análisis estadístico para identificar y establecer la estrategia que ofrezca el mejor rendimiento en términos de variabilidad en el peso del paquete.

El enfoque de mejora que proponemos es práctico y se basa en el estudio del ajuste de llenado de las tolvas para encontrar las condiciones operativas óptimas de la pesadora multicabezal. Para cada estrategia, se desarrollaron algoritmos exactos los cuales siguen una estrategia enumerativa explícita o búsqueda exhaustiva para evaluar distintos valores del número de tolvas combinadas.

En el enfoque multiobjetivo propuesto, los algoritmos utilizan una novedosa estrategia a priori para generar soluciones Pareto-óptimas y seleccionar un subconjunto de tolvas en cada operación de envasado, de tal manera que la importancia relativa de los objetivos considerados es dinámicamente gestionada y ajustada. Una vez que el proceso de envasado ha sido mejorado, este se monitorea y controla a través del diseño de un gráfico de control modificado.

La estructura de la presente Tesis Doctoral se resume en ocho capítulos los cuales poseen el siguiente contenido:

El **Capítulo 1** contiene la introducción, los antecedentes y los objetivos del problema tratado. La introducción coloca en contexto la investigación ofreciendo una descripción de lo que son los productos envasados, la normativa legal que regula el contenido de los paquetes y los requisitos de cumplimiento que deben acatar los envasadores y exportadores que pretenden vender su mercancía en Europa. Asimismo, este capítulo presenta los distintos sistemas de dosificación de productos más utilizados, además de una descripción detallada del proceso de pesaje multicabezal y de la pesadora multicabezal, objeto de la presente Tesis Doctoral. Conjuntamente con lo anterior,

encontramos también un “estado del arte” de las investigaciones y avances en este tipo de procesos. Asimismo, son hallados los objetivos de la presente investigación.

En el **Capítulo 2** se describe toda la metodología utilizada a lo largo de este trabajo para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el Capítulo 1. Se introducen los conceptos de optimización, la optimización monoobjetivo y la optimización multiobjetivo como técnicas para la mejora del proceso de pesaje multicabezal. Estas técnicas se combinan con un conjunto de estrategias propuestas en el Capítulo 3 para la optimización del proceso de envasado. Adicionalmente, son descritas las herramientas de Diseño y Análisis de Experimentos (DOE) y Análisis de Varianza (ANOVA), utilizadas para hallar la configuración óptima del proceso una vez optimizado bajo cada enfoque propuesto (monoobjetivo y multiobjetivo). Finalmente, se introducen los conceptos de gráficos de control modificados, los cuales son diseñados en el Capítulo 7 para el control y monitoreo del proceso de pesaje multicabezal.

El **Capítulo 3** presenta tres estrategias de envasado para optimizar el proceso de pesaje multicabezal. Cada una de ellas es planteada mediante un enfoque monoobjetivo pretendiendo minimizar la diferencia, en valor absoluto, entre el contenido efectivo del paquete y su peso objetivo. En este sentido, algoritmos exactos fueron planteados y programados para cada estrategia. La evaluación del proceso fue realizada mediante un procedimiento de envasado sugerido. Los experimentos numéricos para medir el rendimiento de las estrategias fueron hechos simulando distintas condiciones de entrada para el proceso. Además, en este capítulo se presenta un caso práctico en el que se utilizan datos reales para dos tipos de productos a envasar.

El **Capítulo 4** toma como entrada las conclusiones de los experimentos numéricos del Capítulo 3, buscando, mediante la implementación y desarrollo del DOE y el ANOVA, encontrar la configuración de operación óptima para el proceso multicabezal cuando se implementa la estrategia con mejores resultados bajo un enfoque monoobjetivo. La validez del efecto de los factores sobre el proceso fue confirmando a través del desarrollo de la metodología del análisis de residuos y residuos al cuadrado propuesta por Zúnica y Romero (1988). Asimismo, un caso de estudio en la configuración óptima de la pesadora multicabezal es presentado para los productos utilizados en caso práctico del Capítulo 3.

En el **Capítulo 5** se aborda el proceso de pesaje multicabezal bajo un enfoque multiobjetivo. Cada estrategia propuesta en el Capítulo 3 es planteada y programada considerando el tiempo de permanencia del producto en el sistema de envasado. Mediante la utilización de la programación compromiso propuesta originalmente por Yu (1973) y Zeleny (1973), los objetivos considerados durante las operaciones de envasado son ajustados y manejados dinámicamente. Un novedoso procedimiento multiobjetivo para llevar a cabo el proceso es propuesto en este capítulo. Los experimentos numéricos permiten diferenciar e identificar la estrategia con mejor rendimiento en este enfoque.

En el **Capítulo 6**, análogo al Capítulo 4, se identifica, mediante las técnicas del DOE y el ANOVA, la configuración óptima multiobjetivo para el proceso de pesaje multicabezal cuando se implementa la estrategia con mejor rendimiento en los experimentos numéricos del Capítulo 5. Además, en este capítulo, la validez estadística de los factores también son corroborados al desplegar la metodología del análisis de residuos y residuos al cuadrado propuesta por Zúnica y Romero (1988).

El **Capítulo 7** presenta el diseño de las cartas de control modificadas en el monitoreo del proceso de pesaje multicabezal para cada estrategia con mejor rendimiento en cada enfoque (monoobjetivo en el Capítulo 3 y multiobjetivo en el Capítulo 5), fijando, previamente, las condiciones óptimas de operación halladas en los Capítulos 4 y 6. Se logra obtener los límites de control modificados, así como el valor del intervalo en el que la media del proceso puede variar para asegurar una fracción no conforme de 0.0001.

El **Capítulo 8** muestra las conclusiones obtenidas en cada uno de los anteriores capítulos y presenta las líneas futuras de investigación que proponemos en el campo del pesaje multicabezal.