

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE PROTOCOLOS PARA
FABRICACIÓN DE PRODUCTOS.
APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DOE
PARA MEJORAS EN BALANZAS
INDUSTRIALES.***

Alumno/Alumna: Mateo, Aranda, Iñigo

Director/Directora (1): Jesús Rodríguez Martín

Director/Directora (2): Patxi Ruiz de Arbulo López

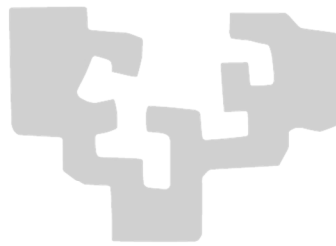
Curso: 2018/2019

Fecha: BILBAO 27/06/2019

PROYECTO FIN DE GRADO
DISEÑO DE PROTOCOLOS PARA
FABRICACIÓN DE PRODUCTOS.
APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DOE
PARA MEJORAS EN BALANZAS
INDUSTRIALES.

CASO DIBAL

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Resumen

El siguiente trabajo pretende ser una guía de consulta y de aplicación para el desarrollo e implantación de la metodología del diseño experimental DOE, en los distintos equipos de balanzas industriales de la empresa DIBAL.

El proyecto surge por medio de las propuestas de DIBAL. La necesidad de mejorar lleva a la búsqueda de metodologías que permitan incrementar la calidad de sus balanzas industriales. La globalización y la existencia de mercados abiertos internacionalmente, en un sector tecnológico como es el de “aparatos de precisión, medida y control” en el que opera DIBAL, hacen que la innovación y la mejora continua sean fundamentales para su supervivencia y éxito futuro. Es por ello, que la búsqueda de herramientas que ayuden a la mejora e innovación de la empresa y sus productos es primordial y debe tener una presencia diaria en la actividad empresarial.

DIBAL posee un proceso de calidad y comprobación final de sus balanzas pero, no realiza ningún tipo de test en sus equipos que permita la obtención y confirmación de los parámetros de trabajo que generen el mejor funcionamiento del proceso. Tras un periodo de investigación, se opta por la metodología estadística del diseño experimental, en inglés DOE, Design of Experiments.

El DOE permite a DIBAL comprobar si los parámetros con los que trabajan los equipos son los más eficientes, o no, y cuáles serían las mejores respuestas posibles. También ayuda al diseño de la estrategia experimental más óptima reduciendo las repeticiones experimentales innecesarias. Permitiendo así el mejor diseño de la máquina y una mejor adaptación a las necesidades del cliente.

Palabras clave: Diseño de experimentos (DOE), Diseño factorial experimental, Aplicación del DOE para equipos industriales.

Summary

The following work pretends to be a guide of consultation and application for the development and implantation of the methodology of the "Design of experiments" DOE, in the different equipments of industrial scales of the company DIBAL.

The project arises through the proposals of DIBAL. The need to improve leads to the search for methodologies that allow to increase the quality of their industrial scales. Globalization and the existence of internationally open markets, in a technological sector such as "precision, measurement and control devices" in which DIBAL operates, make innovation and continuous improvement essential for their survival and future success. Therefore, the search for tools that help the improvement and innovation of the company and its products is paramount and must have a daily presence in business.

DIBAL has a quality process and final verification of their scales but does not perform any type of test on their equipment that allows obtaining and confirming the working parameters that generate the best performance of the process. After a period of research, we opt for the statistical methodology of the experimental design, in English DOE, Design of Experiments.

The DOE allows DIBAL to check whether the parameters with which the teams work are the most efficient, or not, and what would be the best possible answers. It also helps to design the most optimal experimental strategy by reducing unnecessary experimental repetitions. This allows the best design of the machine and a better adaptation to the customer's needs.

Keywords: Design of experiments (DOE), Experimental factorial design, Application of DOE for industrial equipment.

Laburpena

Hurrengo lanak, DIBAL enpresako balantza industrial ekipamendu desberdinetako erreferentzia eta aplikazio gida izan nahi du, DOE diseinu esperimentalaren metodologia garatzeko eta ezartzeko.

Proiektuak DIBALen proposamenen bidez sortzen da. Hobetzeko premiak, balantza industrialen kalitatea areagotzeko aukera ematen duten metodologiak biltzea dakar. Berrikuntza eta etengabeko hobekuntza funtsezkoak dira bizirauteko eta etorkizunean arrakasta izateko, bereziki DIBALek funtzionatzen duen sektore teknologikoan, hala nola, "doitasun, neurketa eta kontrol aparatuak", globalizazio eta irekita dauden nazioarteko merkatuen esistentziagatik. Horregatik, enpresaren eta bere produktuen hobekuntza eta berrikuntzan laguntzen duten tresnak funtsezkoak dira, eta negozio jardueran eguneroko presentzia izan behar dute.

DIBALek bere balantzen kalitate eta azken egiaztapenen prozesu bat du, baina ez du prozesuaren funtzionamendurik onena sortzen duten lan parametroen lorpen eta baieztapenen probarik egiten bere ekipamenduetan. Ikerketa aldi baten ondoren, diseinu esperimentalaren metodologia estatistikoa aukeratzen da, ingeleraz DOE, Design of Experiments.

DOEk ekipamenduak lan egiten duen parametroak egokienak diren ala ez egiaztatzea baimentzen du DIBAL, eta ahalik eta erantzun onenak zeintzuk izan litezke argitzen du. Era berean, estrategia esperimental hoberena diseinatzen laguntzen du, alferrikako errepikapen esperimentalak murrizten dituen bitartean. Horrela, makinaren diseinu onena ziurtatzea eta bezeroaren beharretara hobeto egokitzea lortzen da.

Gako-hitzak: Esperimentuen diseinua (DOE), Diseinu esperimental faktoriala, DOEren aplikazioa ekipamendu industrialetarako

ÍNDICE

<i>I. MEMORIA</i>	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. CONTEXTO.....	2
2.1. DIBAL. Área industrial.....	3
2.2. Características generales equipos de DIBAL	4
3. OBJETIVOS Y ALCANCE	5
3.1. Objetivos.....	6
<i>II. METODOLOGÍA</i>	9
1. INVESTIGACIÓN. ELECCIÓN DEL DOE	9
2. ESTUDIOS Y SIMPLIFICACIONES INICIALES.....	9
2.1 Selección del equipo de estudio	10
3. INTRODUCCIÓN AL DOE.....	11
4. ELEMENTOS DEL DOE	12
5. CLASIFICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES	13
5.1. Diseños factoriales completos.....	13
5.2. Diseños factoriales fraccionados	14
5.3. Diseños de Plackett-Burman.....	14
5.4. Diseños de superficie de respuestas	14
5.5. Diseños Taguchi.....	14
6. METODOLOGÍA. PROCEDIMIENTO DE DESARROLLO DEL DOE.....	14
6.1. Definición.....	15
6.2. Medición	15
6.3. Planificación	16
6.4. Ejecución de la experimentación	17
6.5. Análisis de los resultados de la experimentación	17
6.6. Mejora y experimentos de confirmación	18
6.7. Optimización. Elección de los niveles de trabajo.....	18
6.8. Control y estandarización.....	19
7. DESARROLLO DEL DOE PARA EL CW800:.....	21
7.1 Primera fase. Definición del caso de estudio.....	21
7.2 Segunda fase. Medición del caso de estudio.....	23
7.2.1 Definición de factores de entrada y niveles.	23
7.2.2 Características del CW800 y reducción de variables.	35
7.2.3 Determinación de replicaciones.	35
7.3 Tercera fase. Planificación del DOE para el caso de estudio.....	36
7.4 Cuarta fase. Ejecución de la experimentación para el caso de estudio.	39
7.5 Quinta fase. Análisis de los resultados para el caso de estudio.....	42
7.5.1 Cálculo de los efectos principales.....	46
7.5.2 Cálculo de las interacciones dobles.....	50
7.5.3 Cálculo de la interacción triple	53
7.5.4 Cálculo contribuciones básicas.....	55
7.5.5 Gráficos y tablas de decisión	57
7.5.6 Modelización.....	60
7.6 Sexta fase. Mejora y experimentos de confirmación para el caso de estudio.....	61
7.7 Séptima fase. Optimización. Elección de los niveles de trabajo.....	63

7.8	Octava fase. Control y estandarización para el caso de estudio	66
8.	CONSIDERACIONES GENERALES DEL DOE Y DEL TRABAJO	67
III.	CONCLUSIONES	71
IV.	REUNIONES EN DIBAL Y CRONOGRAMA DE TAREAS	73
V.	BIBLIOGRAFÍA	75
	ANEXOS.....	77
1.	Comprobación de pesajes de la célula.	83
1.1.	Pesajes excéntricos.....	93
1.2.	Tabla resumen de todos los pesajes.....	95
1.3.	Gráficos errores en los pesajes.....	96
2.	Diseño del experimento. Diseño factorial de tres factores a dos niveles.	97
2.1.	Cálculo efectos principales	99
2.2.	Cálculo de las interacciones de dos factores	100
2.3.	Cálculo de la interacción de tres factores	101
2.4.	Efectos “Productividad”	102
2.5.	Efectos “Pesos OK”	104
2.6.	Efectos “Pesos erróneos”	106
2.7.	Efectos “Paquetes próximos”	108
3.	Replicaciones experimentales	110
3.1.	Análisis “Productividad”	111
3.2.	Análisis “Pesos OK”	112
3.3.	Análisis “Pesos erróneos”	113
3.4.	Análisis “Paquetes próximos”	114
4.	Gráficos diseño del experimento.....	115
4.1.	Gráficos efectos principales	115
4.2.	Gráficos interacciones de los factores	117
4.3.	Gráfica normal de los efectos.....	119
4.4.	Diagramas de Pareto para los efectos	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las variables controlables y no controlables del CW800	24
Tabla 2. Velocidades CW800	25
Tabla 3. Resumen de medias y desviaciones de los pesajes, y desviación estándar media y del proceso	29
Tabla 4. Dsico de 2kg a velocidad 2	30
Tabla 5. Disco de 2kg a velocidad 5	30
Tabla 6. Combinaciones de los niveles para el CW800	40
Tabla 7. Combinaciones de niveles codificados para el CW800	40
Tabla 8. Respuestas del experimento	41
Tabla 9. Codificación experimental	43
Tabla 10. Combinaciones experimentales	46
Tabla 11. Cálculo del efecto principal para A	47
Tabla 12. Cálculo del efecto principal para A	47
Tabla 13. Tablas de los efectos principales	47
Tabla 14. Cálculo de las interacciones para el factor BC	50
Tabla 15. Efectos de las interacciones	51
Tabla 16. Interacción triple	54
Tabla 17. Efectos de la interacción triple	54
Tabla 18. Cálculo de las contribuciones básicas	55
Tabla 19. Contribuciones básicas pesos OK	55
Tabla 20. Tabla para representación de la gráfica de efectos normales	59
Tabla 21. Replicación 1	61
Tabla 22. Replicación 2	62
Tabla 23. Cálculo de las medias	62
Tabla 24. Análisis de las varianzas entre experimento y replicaciones	63
Tabla 25. Respuestas medias	64
Tabla 26. Tablas de los efectos e interacciones de los factores	64
Tabla 27. Niveles que más afectan positivamente a las respuestas	66

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfica normal de los efectos principales de la productividad	48
Gráfico 2. Interacciones para los pesos OK	52
Gráfico 3. Efectos y contribuciones básicas para los pesos Ok	56
Gráfico 4. Diagrama de Pareto para paquetes próximos	59
Gráfico 5. Gráfica normal de los efectos de Pesos OK	60

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Vista de la situación de las instalaciones de DIBAL en Derio	2
Imagen 2. Instalaciones de DIBAL en Derio. En el frente oficinas y centros de ingeniería, en la parte trasera zona de producción y almacén	2
Imagen 3. A la izquierda un tipo de balanza comercial, a la derecha una balanza retail. Se pueden ver las diferencias entre el sector comercial e industrial que cubre DIBAL..	3
Imagen 4. Tipo de paquete y envases con los que las balanzas industriales de DIBAL trabajan	3
Imagen 5. Distintos tipos de balanzas industriales. A la izquierda el modelo GW4000+, clasificadora por peso. A la derecha una etiquetadora con cabezal inclinable	4
Imagen 6. Detalle cinta de alimentación y seguido, la célula de pesaje	5
Imagen 7. A la izquierda una pantalla de control. A la derecha una doble etiquetadora	5
Imagen 8. El equipo arriba mostrado es un modelo CW800, en él se pueden ver las tres cintas y el monitor de control.	11
Imagen 9. En la imagen arriba, podemos ver como se introducen los factores controlables y las variables de entrada, y como las variables de salida se ven alteradas por las variables no controlables.	12
Imagen 10. Fase 1, Flujograma	15
Imagen 11. Fase 2, Flujograma	16
Imagen 12. Fase 3, Flujograma	16
Imagen 13. Fase 4, Flujograma	17
Imagen 14. Fase 5, Flujograma	17
Imagen 15. Fase 6, Flujograma	18
Imagen 16. Fase 7, Flujograma	18
Imagen 17. Fase 8, Flujograma	19
Imagen 18. FLUJOGRAMA DE APLICACIÓN DEL DOE.....	20
Imagen 19. Tamaños máximos de paquete para 280ms y 60ms.....	26
Imagen 20. Tamaños máximos para 330ms y 85ms.....	27
Imagen 21. Tamaños máximos de paquete.....	32
Imagen 22. Distintas formas de los paquetes.....	33
Imagen 23. Distintos formatos para los paquetes.....	33
Imagen 24. CW800 con disco de pruebas	34
Imagen 25. Ventana Minitab, para decidir el diseño factorial.....	38
Imagen 26. Ventana Minitab, resolución de los diseños.....	39
Imagen 27. Diseño experimental para el CW800	39

I. MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la manufactura posee numerosos y muy diversos procesos de fabricación. Distintos pero todos ellos comparten una serie de características y objetivos comunes. Estos objetivos se resumen en el aumento de calidad del producto final, la seguridad durante el proceso, mínimos costes de producción y reducción de los tiempos de fabricación. Todos estos objetivos responden a la necesidad de competir en un mercado abierto en el que la empresa necesita ser mejor que sus competidores.

Para conseguir dicho propósito de mejora los parámetros de los procesos productivos son fundamentales. En toda organización del sector industrial el dominio de los procesos industriales y sus parámetros es imprescindible. Estos parámetros deben ser analizados y elegidos conscientemente por la empresa u organización. A pesar de establecer unos parámetros estándar durante el proceso de producción pueden darse situaciones, fruto bien sea del azar o errores propios del proceso o humanos, variables no asignables o asignables respectivamente, que afectan y cambian la manufactura. Estos cambios producen variabilidad en el proceso.

Dichas variables influyen con distintos niveles de importancia al desarrollo productivo. El objetivo de la empresa es encontrarlos y conocer cuál de dichas variables tiene mayor relevancia en la fase productiva y la relación que existe entre ellas, con la finalidad de controlarlas y hacerlo también así con el proceso. Este control de la variabilidad implica un mejor conocimiento y dominio de los procesos productivos, lo que lleva a la mejora en la calidad, un aumento del desarrollo eficiente de la empresa y una mayor competitividad dentro del sector.

Para ello el uso de herramientas científicas en concreto estadísticas, es de vital importancia para conseguir los objetivos, disminuyendo y controlando la variabilidad de manera eficiente y eficaz. Esto es requisito indispensable para aquellas empresas que quieran competir en el actual entorno industrial.

DIBAL, empresa en la que se desarrolla el siguiente trabajo fin de grado, es una organización del sector industrial dedicada a aportar soluciones de pesaje y etiquetado para los sectores del comercio y la industria. El siguiente trabajo pretende dar una respuesta eficaz a las necesidades y mejoras planteadas por DIBAL, dentro de su área industrial de “balanzas industriales o retail”.

Tras realizar un estudio en profundidad de las balanzas industriales de DIBAL y de las necesidades planteadas, se concluye que las herramientas estadísticas de diseño experimental, en inglés “Design of experiments (DOE)”, pueden dar respuesta a los planteamientos de DIBAL.

A pesar de haber ejemplos de aplicación del DOE en la industria, su uso no está muy extendido en el sector industrial debido principalmente a la necesidad de conocimientos para su aplicación. La finalidad del siguiente TFG es proporcionar a los responsables y trabajadores de DIBAL, una “guía personalizada” de aplicación de los procesos del diseño experimental a los distintos equipos industriales que DIBAL ya ha desarrollado y para aquellos que en un futuro pueda desarrollar. Con el objetivo de que la metodología

DOE ayude al desarrollo y mejora de los equipos en los que se aplique. Permitiendo a DIBAL perfeccionar sus productos, aumentando su calidad y competitividad en el mercado.

2. CONTEXTO

El siguiente proyecto fin de grado, surge ante la propuesta de mejora de equipos planteada por DIBAL, en su área industrial. DIBAL sociedad anónima, es una empresa de orígenes bizkainos y con domicilio social en Derio, Bizkaia. Opera en el sector de fabricación de aparatos de precisión, medida y control. Como indica la empresa en su página web “En DIBAL somos expertos en soluciones de pesaje y etiquetado para los sectores del comercio y la industria. Desarrollamos y fabricamos balanzas comerciales y equipos de pesaje y etiquetado industriales desde 1985”.

DIBAL cuenta a día de hoy, con alrededor de 150 trabajadores distribuidos entre sus tres instalaciones: DIBAL TECHNOLOGY CO. LTD. en Kunshan, China, DIBAL MÉXICO Sociedad Filial en Ciudad de México, México y DIBAL, SEDE CENTRAL en Derio, Bizkaia.



Imagen 1. Vista de la situación de las instalaciones de DIBAL en Derio



Imagen 2. Instalaciones de DIBAL en Derio. En el frente oficinas y centros de ingeniería, en la parte trasera zona de producción y almacén

DIBAL es una empresa con más de 30 años de experiencia en el sector de pesaje y etiquetado. Comenzó con la fabricación de balanzas comerciales en torno a 1985. Posteriormente y con la finalidad de dar respuesta a las necesidades del sector, amplía el campo de actuación y comienza a desarrollar equipos de pesaje industrial, sistemas de pesaje y etiquetado automático. DIBAL cuenta ahora mismo con dos grandes sectores de actividad, las balanzas comerciales en mercados minoristas y las balanzas industriales enfocadas a actividades industriales.



Imagen 3. A la izquierda un tipo de balanza comercial, a la derecha una balanza retail. Se pueden ver las diferencias entre el sector comercial e industrial que cubre DIBAL

2.1. DIBAL. Área industrial.

DIBAL ofrece soluciones para una gran cantidad de industrias fundamentalmente alimentarias en el área de gestión de producto, clasificación y logística. Las industrias avícolas, cárnicas, hortofrutícolas, conserveras, etc. son los principales clientes de DIBAL. Los equipos industriales están orientados al tratamiento de productos de venta al por menor (retail en inglés significa: “minoristas, al por menor”). Los equipos industriales de DIBAL poseen a su vez sistemas informáticos que facilitan la integración en las aplicaciones informáticas y sistemas ERP del cliente.



Imagen 4. Tipo de paquete y envases con los que las balanzas industriales de DIBAL trabajan

Dentro del entorno industrial, DIBAL ofrece muy diversas soluciones: softwares, PCs industriales, etiquetadoras automáticas o manuales, clasificadoras de y por peso... Es importante en primer lugar, señalar que todas estas soluciones corresponden al sector industrial y no al comercial. Esta separación entre sectores es importante tanto dentro de la organización de DIBAL como para el desarrollo del siguiente trabajo, pues se va a tratar únicamente el sector industrial.



Imagen 5. Distintos tipos de balanzas industriales. A la izquierda el modelo GW4000+, clasificadora por peso. A la derecha una etiquetadora con cabezal inclinable

El desarrollo y ejecución del proyecto se realiza en las balanzas industriales de DIBAL. Las balanzas industriales tienen mayor número de componentes, mayor tamaño y un mayor coste de producción económico y de tiempo, comparándolas con las comerciales. La puesta a punto de una balanza retail, conlleva una serie de pruebas distintas debido a estas diferencias.

2.2. Características generales equipos de DIBAL

El área industrial de DIBAL cuenta con una gran variedad de equipos. La oferta es muy amplia, pero los equipos con más peso son las balanzas industriales o retail. Por lo general todas ellas presentan componentes comunes o similares con distintas dimensiones y materiales, pero siguen cumpliendo las mismas funciones independientemente del equipo en el que se encuentren. Se pueden distinguir las siguientes partes compartidas o más generales, en las máquinas:

- **Cinta de alimentación.** Se trata de la cinta que realiza el aporte de productos al equipo.
- **Célula de pesaje.** Lleva incorporada una cinta que permite realizar pesajes dinámicos o estáticos. Suele ser la segunda cinta y la que se encarga como es lógico de realizar los pesajes.



Imagen 6. Detalle cinta de alimentación y seguimiento, la célula de pesaje

- **Pantalla de control.** Contiene el interfaz entre el usuario y balanza.
- **Etiquetadoras.** Se encargan de etiquetar el producto con los datos registrados en el pesaje de la célula.



Imagen 7. A la izquierda una pantalla de control. A la derecha una doble etiquetadora

- **Expulsores.** Encargados de retirar/discriminar aquellos productos que no cumplan ciertas características por lo general de peso.
- **Cinta de expedición.** Suele ser la tercera y última cinta aunque pueden incorporarse más cintas perfectamente. En ella se realiza la clasificación por peso, la discriminación del producto o el etiquetado.

Como se ha comentado no todos los equipos de DIBAL poseen los elementos indicados y en el mismo orden. Los equipos pueden variar los elementos cambiando la dimensión o forma de las cintas, el tipo de expulsor, la posición de las etiquetadoras, etc. Pero siguen cumpliendo con la misma finalidad descrita.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

DIBAL cuenta con controles de calidad para todas las balanzas, equipos y accesorios, lo cual requiere de un gran esfuerzo experimental. Estos controles son una fase propia

del proceso productivo de cualquier equipo y cumplen con el objetivo de entregar adecuadamente y bajo los parámetros estipulados, los equipos al cliente.

Los test realizados a los equipos son una comprobación final, es decir, controlan que el equipo ensamblado esté trabajando dentro de los niveles de calidad normales de funcionamiento. Lo que no identifica esta prueba de calidad es si las condiciones de funcionamiento son las más óptimas y eficientes para el proceso.

La situación del mercado actual en el área de “aparatos de precisión, medida y control” exige innovar y mejorar los equipos de forma continua. El aumento de las productividades y la disminución de fallos en los equipos es crucial para ser competitivos en este mercado. Por ello es necesario idear una estrategia o mecanismos que permitan mejorar los equipos de DIBAL y que les permitan diferenciarse del resto de competidores en el mercado. No solo realizar una fase de comprobación final, sino que también se realice una fase de optimización del equipo.

Es necesario también tener en cuenta a la hora de definir los objetivos, las características de trabajo de DIBAL. La existencia de un gran número de equipos industriales y de modelos hace que mejorar el conjunto del área industrial sea una gran labor. No solo hay que tener en cuenta el número de equipos sino la frecuencia con la que a estos se les realiza modificaciones y mejoras que cambian continuamente las máquinas. Además de los nuevos prototipos que va lanzando DIBAL.

Ante esta situación, es necesario encontrar una herramienta que sea flexible y que permita establecer un proceso experimental de manera rápida y sin generar elevados costes, tanto en el diseño como en la realización.

3.1. Objetivos

Se definen por tanto dos objetivos principales a los que llegar y que se encuentran relacionados entre sí.

- DIBAL requiere conocer cuáles son las capacidades máximas de sus equipos. Estableciendo unas condiciones y parámetros de trabajo para las básculas industriales u otros componentes, se debe determinar cuáles son las máximas prestaciones que se pueden obtener para esas situaciones.
- Trabajando bajo unas condiciones dentro de los límites de los equipos de DIBA, y con los requisitos del cliente, determinar que parámetros influyen en mayor medida en las respuestas del equipo. Controlando dichos valores para obtener mejores resultados.

Para ambos objetivos es necesario aplicar una metodología experimental que permita obtener resultados empíricos. Se espera obtener simultáneamente ambos resultados realizando un proceso experimental, testeando los equipos dentro de los valores límites de las máquinas y de los fijados por los clientes. Consiguiendo así los valores de las respuestas para una serie de parámetros de funcionamiento. Y a partir de estos resultados, las máximas capacidades de los equipos y qué variables afectan en mayor o menor medida al proceso. El objetivo es conseguir la correcta combinación de parámetros de producción que optimicen y obtengan los mejores resultados.

Encontrar una metodología que consiga llegar simultáneamente a ambos objetivos y permita ahorrar en procesos experimentales es primordial. La reducción de gastos

experimentales innecesarios es muy importante pues, cada experimento que se realiza de más supone un gasto de tiempo y económico que debe cubrir la empresa. También las propias circunstancias de producción de DIBAL con unos requisitos y estructuras en continuo cambio, dependiendo del cliente y del propio DIBAL, suponen un mayor rango de parámetros que experimentar.

El objetivo final es encontrar el método que aúne estos tres principios: optimizar el número de experimentos, flexibilidad ante los cambios en los parámetros de producción, y asegurar la obtención clara y fiel, de los resultados finales que permitan llegar a obtener los dos objetivos del comienzo.

II. METODOLOGÍA

1. INVESTIGACIÓN. ELECCIÓN DEL DOE

Antes de comenzar con el desarrollo de la metodología del proyecto, la necesidad de encontrar un método que cubra los objetivos anteriormente planteados supone realizar un examen previo de los métodos científicos existentes. Se realiza una investigación enfocada a herramientas estadísticas que permitan obtener los objetivos.

Al tratarse de un proceso donde los resultados a analizar son los de funcionamiento del equipo, el método debe ser experimental. Esto conduce en un primer momento a la metodología de diseño experimental, DOE (Design of Experiments). Una vez encontrada la metodología del DOE se plantea la pregunta, “¿Cuál es la ventaja o utilidad del diseño de experimentos?”. Para contestar a esta pregunta se cree conveniente comentar el proceso previo, o las etapas de desarrollo, que ha tenido el trabajo.

Al comenzar la realización del trabajo los objetivos estaban claros y definidos. Estos eran, la optimización de los parámetros de trabajo y la obtención de las máximas capacidades de producción bajo unas condiciones. A su vez, el proceso para la consecución de estos objetivos tenía y tiene, que ser llevado a cabo a través de la práctica, experimentalmente. En un principio se opta por realizar la experimentación en las máquinas sin seguir ningún tipo de guion o método simplemente repitiendo los experimentos, cambiando las combinaciones y valores de las variables y anotando los resultados obtenidos con la esperanza de conseguir unos resultados. Tras realizar el análisis de los equipos esta opción se descarta al ser muy compleja y costosa. La realización de los experimentos teniendo en cuenta tantas variables y niveles no es viable y se pone en riesgo el logro de los objetivos. Es por ello que se procede a realizar una fase de investigación.

Tras la fase de investigación y un nuevo análisis de los equipos, el “diseño de experimentos” pasa a ser el método más interesante y que mejor se ajusta a lo buscado. Se procede entonces con el estudio de la herramienta DOE. Durante este estudio se encuentran también programas informáticos (Minitab y Statgraphics) de gran ayuda, que afianzan y ratifican la elección del DOE como método a seguir. Estos programas facilitan la labor del desarrollo del diseño experimental y la obtención de resultados. Gracias al diseño de experimentos se consigue realizar un programa experimental con las combinaciones de valores y variables suficientes, para obtener resultados correctos.

En resume, y tras la investigación realizada se obtiene la siguiente conclusión: el DOE es un método estadístico que permite organizar de manera eficiente y eficaz el diseño de cualquier tipo de experimento, evitando esfuerzos innecesarios y consiguiendo resultados reales, fiables y aplicables tras la realización experimental.

2. ESTUDIOS Y SIMPLIFICACIONES INICIALES

Previo a comenzar con el diseño de experimentos DIBAL realiza una selección de los equipos en los que llevar a cabo el proceso experimental, ante el gran número de

equipos existentes. Dichos equipos seleccionados incluyen distintos modelos de balanzas industriales y sus diversos componentes. Durante visitas a DIBAL se conocen dichos equipos y se realiza un estudio de las características de las distintas balanzas y componentes de ese conjunto seleccionado. Se analiza su funcionamiento, tipos de paquetes con los que trabajan, tratamiento de los productos, componentes electrónicos y neumáticos, etc.

Tras este estudio de los equipos, la realización, planteamiento y estudio de los procesos experimentales para cada uno supone un gran esfuerzo y llevarlo a cabo supondría un elevado número de horas y la consiguiente extensión de este trabajo. Debido a esto y habiendo analizado minuciosamente los equipos de estudio planteados por DIBAL, se considera que la mejor opción para desarrollar con éxito el trabajo y que este, sirva de ayuda para lograr los objetivos de DIBAL, es realizar un esquema general para la implantación del DOE.

Este esquema consta de las etapas para realizar un procedimiento experimental con las herramientas DOE. La idea es crear un manual de aplicación general que DIBAL pueda implantar en cualquier equipo. Además de este “manual”, se ha realizado un ejemplo de desarrollo del DOE para un equipo pues resulta más fácil la aplicación del desarrollo experimental si se dispone de un ejemplo.

1.1 Selección del equipo de estudio

El equipo seleccionado para realizar el DOE en él, es el CW800. Se trata de una controladora automática de peso (CW, Check weight) que forma parte del área industrial de DIBAL. La funcionalidad principal del CW800 es la discriminación de paquetes que no se encuentren dentro de un rango de peso determinado.

El CW800 consta de tres cintas. La primera cinta es de alimentación, regula y suministra los paquetes al equipo. La segunda cinta contiene la célula de pesaje y se encarga del pesaje de los paquetes. La última y tercera cinta es la de expedición, es en esta última donde se rechazan o no los paquetes que entran en el equipo.



Imagen 8. El equipo arriba mostrado es un modelo CW800, en él se pueden ver las tres cintas y el monitor de control.

Además de esto el CW800 posee una serie de características principales:

- Los alcances de la célula de pesaje del CW800 van de los 2g a los 6Kg.
- Tiene la opción de realizar pesajes estáticos o dinámicos.
- Pueden ensamblarse distintos tipos de expulsores en su última cinta, hasta un máximo de tres. Pudiendo ser de pistón neumático, soplado de aire o pala giratoria.
- Además de expulsores pueden acoplarse otros componentes. Guías de paquetes, lectores de códigos de barras, volteadores de productos, protectores de metacrilato, etc.
- La longitud de las cintas puede variar entre 350 y 500 mm de longitud (también la cinta de la célula de pesaje) y tienen una anchura fija de 280 mm.
- La estructura del CW800 es de aluminio anodizado por lo que ciertos tipos de productos como son los congelados no pueden o, no se recomienda que sean procesados en este equipo.

En definitiva, este equipo de complejidad de estudio experimental media, reúne las características más comunes de las balanzas industriales. Es por ello, por lo que se ha decido realizar el caso de estudio del DOE en este equipo, ya que las conclusiones realizadas en el siguiente estudio, son extrapolables en su mayoría a los demás equipos de los que dispone DIBAL.

3. INTRODUCCIÓN AL DOE

El DOE es una herramienta que nos permite, a través de unos procedimientos matemáticos, aplicar la estadística a la experimentación. Según Geoffrey Keppel y Thomas D. Wickens en su libro “Design and Analysis, a researcher’s handbook” (1991), un experimento consiste en un conjunto de actividades, ejecutadas bajo un determinado

plan de actuación, que sirven para obtener y analizar datos. La experimentación sufrió un cambio radical entre la llamada experimentación “clásica” del primer tercio del siglo XX a la experimentación “moderna” con los cambios introducidos por A. Fisher. El proceso experimental se transforma entonces en una experiencia planeada con antelación, en la que la información es obtenida a partir de la manipulación de los niveles o valores de determinadas variables para examinar su influencia sobre otras. De tal forma que se crean las condiciones necesarias para observar un fenómeno.

El DOE consist, por tanto, en diseñar y ejecutar una prueba, o serie de pruebas, en las cuales se introducen cambios deliberados en las variables de entrada que forman el proceso, de manera que sea posible observar e identificar, las causas de los cambios en la variable de salida.

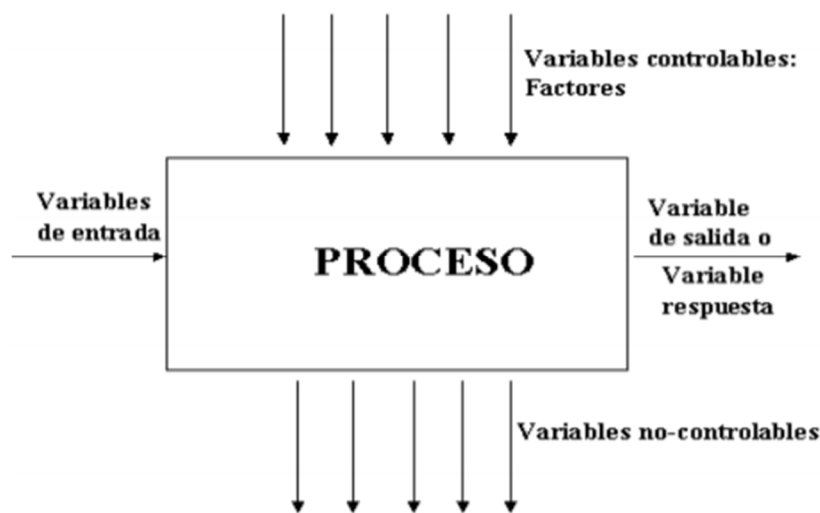


Imagen 9. En la imagen arriba, podemos ver como se introducen los factores controlables y las variables de entrada, y como las variables de salida se ven alteradas por las variables no controlables.

4. ELEMENTOS DEL DOE

Dentro del proceso experimental y el conjunto de experimentos se deben distinguir los distintos elementos que están involucrados en ellos y cuya definición facilitará la labor experimental y la comprensión del siguiente trabajo.

En la realización de todo experimento se espera obtener una respuesta o respuestas, en función de la variación de los valores de las variables entrada. Estas variables reciben el nombre de factores. Estos factores se diferencian entre **factor/es experimentales** y **factor/es respuesta**. Los **factores experimentales** se dividen a su vez, en **factores controlables** y **no controlables**. Los **factores controlables** son las variables causas o de entrada. Son estas variables las que toman distintos valores en cada ensayo y que se supone influyen en los valores que tomen las respuestas. Los distintos valores que toman los factores controlables reciben el nombre de **niveles**.

Los **factores respuesta** son las variables efecto, de salida o de respuesta, que toman valores en función del valor de los factores experimentales. A partir de estas se calculan la importancia de los factores controlables, los **efectos** de estos sobre las variables salida.

A parte de las variables de entrada y respuesta existen las **variables latentes**. Estas variables son desconocidas y pueden ser o no controladas. Estas variables pueden tener en mayor o menor medida, dependiendo de su control, una influencia final sobre el resultado del experimento. Se denominan **factores no controlables** y sus efectos pueden neutralizarse o mitigarse mediante repeticiones y/o aleatorización en el desarrollo experimental.

No obstante, la propia naturaleza de este método de investigación no hace desaparecer la existencia de errores por mucho que estos se intenten mantener controlados. El **error experimental** se produce al existir una diferencia entre el valor verdadero de la respuesta y el valor observado. La existencia de errores es fruto de esas variables latentes, incontrolables (factores no controlables), como errores de medición, estado de la maquinaria, etc. que, sumándose entre ellos provocan una desviación del verdadero valor generando la variabilidad e inexactitud de los resultados.

Conocidas el conjunto de variables intervinientes en el proceso, el diseño experimental consiste en establecer un programa que indique que factores experimentales se cambiarán, cómo y cuándo, sobre la **unidad experimental**. La unidad experimental es el elemento en el que se realiza el experimento, en este caso equipos de balanzas retail, en concreto el modelo CW800.

Tras esto y completando la definición previa realizada del DOE en la introducción. El diseño de experimentos estadístico, selecciona la estrategia experimental más adecuada para el caso que se quiere estudiar, asegurando que el plan elegido tiene una posibilidad razonable de identificar y cuantificar de manera correcta, la importancia e interacción de los factores.

5. CLASIFICACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

A continuación, y de manera muy breve, se muestra los distintos tipos de DOE que existen y que pueden ser aplicados al estudio de los equipos y del CW800, indicando sus características principales.

5.1. Diseños factoriales completos

La característica principal de los diseños factoriales completos es que incluyen todas las combinaciones posibles de todos los factores y sus correspondientes niveles. El número total de experimentos a realizar resulta del producto entre el número de niveles de cada factor. Comúnmente se suele realizar diseños factoriales completos a dos niveles “ 2^k ”. Este diseño nos permite conocer el impacto de cada factor y todas sus interacciones en la respuesta, además de un modelo de proceso.

5.2. Diseños factoriales fraccionados

Estos diseños son interesantes cuando los recursos son limitados, o el número de experimentos para un diseño factorial completo es muy elevado, ya que hay una gran cantidad de factores o un gran número de niveles por factor que hay que experimentar. Un diseño fraccionado es un diseño en el cual solo un subconjunto seleccionado o "fracción" del total de las corridas experimentales del diseño factorial completo son evaluadas. Los diseños factoriales fraccionados suelen seguir una cantidad " 2^{k-p} " de experimentos. La desventaja de estos diseños es que al no tener en cuenta todas las combinaciones, los efectos e interacciones de los factores pueden confundirse.

5.3. Diseños de Plackett-Burman

Los diseños de Plackett-Burman son diseños ortogonales de 2 niveles. Pueden ser utilizados para el estudio de k factores en N experimentos, cumpliéndose $k=N-1$ y N múltiplo de 4. En este diseño las interacciones entre dos factores se presuponen insignificantes por lo que son despreciadas. El objetivo principal de este diseño es la identificación de los factores que realmente influyen en la respuesta.

5.4. Diseños de superficie de respuestas

Un diseño de superficie de respuesta es un conjunto de procedimientos que permiten la mejor comprensión de las respuestas y su optimización. La metodología del diseño de superficie de respuesta se utiliza con frecuencia para refinar los modelos una vez determinados los factores importantes. Esta técnica permite encontrar una configuración de factores que produzca la "mejor" respuesta y modelarla en función del valor de estos. Las diferencias entre una ecuación para el cálculo de efectos de una superficie de respuesta y de un diseño factorial, es la adición de términos elevados al cuadrado o cuadráticos para el estudio de los resultados.

5.5. Diseños Taguchi

Un diseño de Taguchi permite diseñar experimentos con sólo una fracción de las combinaciones factoriales. El objetivo principal de este diseño es disminuir la variabilidad del proceso. Esto permite elegir un producto o proceso que funciona con mayor consistencia en el entorno operativo, definiendo la configuración óptima de los factores controlables para robustecer el proceso y disminuir su variabilidad.

6. METODOLOGÍA. PROCEDIMIENTO DE DESARROLLO DEL DOE

El proceso de realización del DOE, conlleva una serie de fases que hay que seguir, para la obtención de los mejores resultados posibles. A continuación se desglosa la metodología del DOE en etapas, para que se facilite su aplicación en los equipos de DIBAL. El objetivo de final de estas fases es la obtención de los parámetros de trabajo óptimos que mejoren el proceso de la máquina. Esta metodología de desarrollo consiste en realizar de forma progresiva la definición de factores, niveles y elección del diseño experimental entre otros, para finalmente llegar a obtener unos resultados en las últimas etapas. El proceso a seguir consta de los siguientes pasos.

6.1. Definición

Durante esta fase se definen los equipos sobre los que se va a trabajar, el proceso que realiza y la información de la que se dispone, así como los objetivos de la experimentación. También se recopila información acerca del equipo como pueden ser los niveles de calidad exigidos, errores comunes del proceso, o los parámetros de funcionamiento normal del proceso.

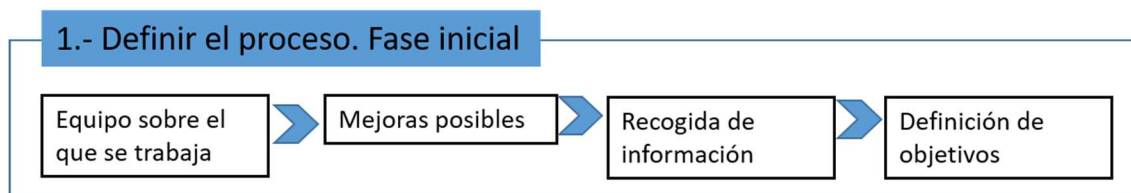


Imagen 10. Fase 1, Flujograma

6.2. Medición

En esta fase se localizan y clasifican los factores del proceso que influyen en las respuestas. Es primordial en esta fase, identificar con rigurosidad las variables necesarias y verdaderamente influyentes, con el objetivo de disminuir al máximo el esfuerzo experimental. Se realiza también una clasificación entre los factores encontrados, separándose en variables controlables y no controlables o latentes explicadas anteriormente. Finalmente, se establecen los niveles de los distintos factores manteniendo la idea de intentar reducir los esfuerzos experimentales, y conseguir los mejores resultados posibles.

A la hora de definir las variables y qué niveles experimentar, es necesario tener en cuenta los objetivos experimentales planteados en la primera fase. La fase 2 es de vital importancia para la continuación del DOE y la consecución los objetivos planteados. Esta fase requiere de un tiempo de análisis en profundidad, puesto que cuantas más variables se encuentren que tengan un peso en el proceso, mayor porcentaje de éxito tendrá la experimentación y mejor será la modelización y estandarización final del proceso.

Una vez encontradas las variables es necesario fijar los niveles con los que experimentarlas. Los niveles de los factores de entrada fijados tendrán importancia a la hora de establecer un esfuerzo experimental. Un ejemplo de esta importancia se puede ver en el cambio de las combinaciones posibles que existen entre un modelo de 3 factores a dos niveles, con 2^3 (8 combinaciones) combinaciones y un modelo de 3 factores a 3 niveles, con 3^3 combinaciones (27 combinaciones). En el caso de que la experimentación suponga un elevado coste, ya sea económico y/o de tiempo, los niveles y factores tendrán que ser elegidos minuciosamente para conseguir los objetivos finales y reducir el trabajo experimental.

Una manera de identificar factores que no tengan relevancia experimental es analizar si para distintos niveles de éstos, las respuestas del experimento sufrirán variaciones. En el caso de no obtener variaciones significativas, o no esperarlas, se puede establecer un nivel fijo para estos factores para la realización de toda la experimentación. Estos

factores se consideran no significativos, ya que sus efectos no son apreciables o son inexistentes y no alteran el valor de las interacciones, por lo que se puede prescindir de analizarlos a dos o más niveles.

También en esta fase es interesante realizar una estimación de las replicaciones del experimento que se van a realizar. Replicaciones llevadas a cabo en la fase posterior 6, que tendrán una función de comprobación. Una replicación experimental no es más que la repetición de los experimentos bajo las mismas condiciones y valores de los factores. Con esto se busca cuantificar los errores experimentales, y realizar un estudio de la varianza de estos.

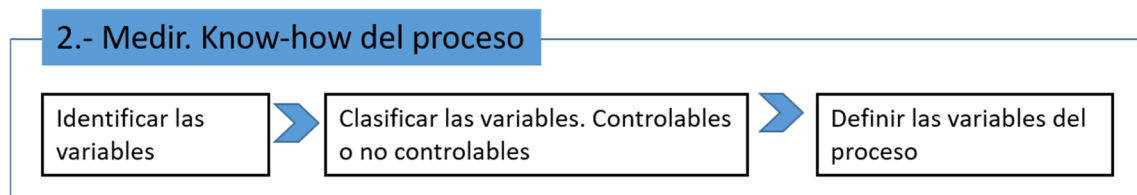


Imagen 11. Fase 2, Flujograma

6.3. Planificación

El objetivo principal durante esta fase es la de seleccionar el diseño experimental más adecuado, teniendo en cuenta las características y limitaciones del proceso.

- La cantidad total de experimentos que pueden ser ejecutados, considerando las restricciones del propio proceso o equipo que se evalúa.
- La cantidad de factores controlables y no controlables.
- Los niveles de experimentación de los factores y con ello el rango experimental.

En función de las características del proceso y del objetivo perseguido se selecciona el diseño. De forma esquemática se muestran los pasos de selección del diseño en la siguiente imagen.

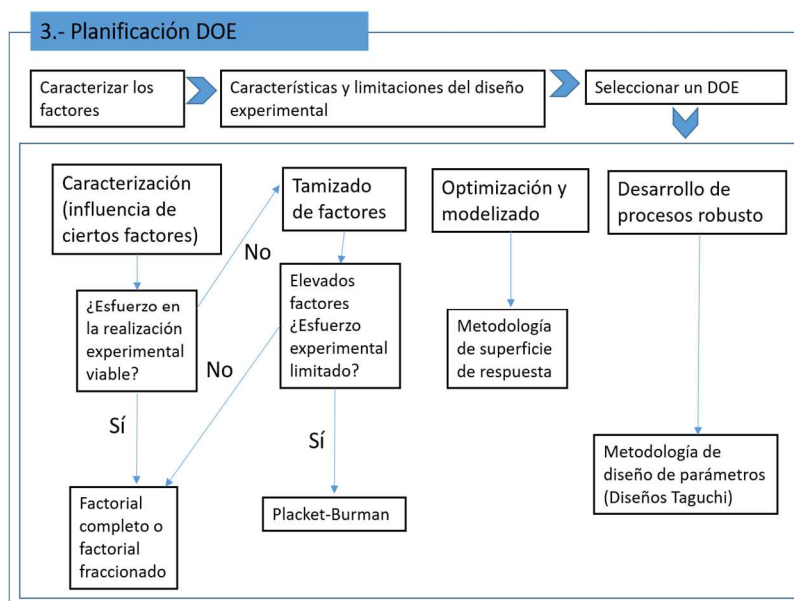


Imagen 12. Fase 3, Flujograma

6.4. Ejecución de la experimentación

En esta fase se procede con la experimentación. Se prepara la unidad experimental con los valores de los factores a analizar y se recogen las respuestas. Es muy importante mantener unas condiciones estables durante la realización experimental. Desarrollar de la manera más metódica y rigurosa posible los experimentos permite reducir el efecto de los factores no controlables en las respuestas.

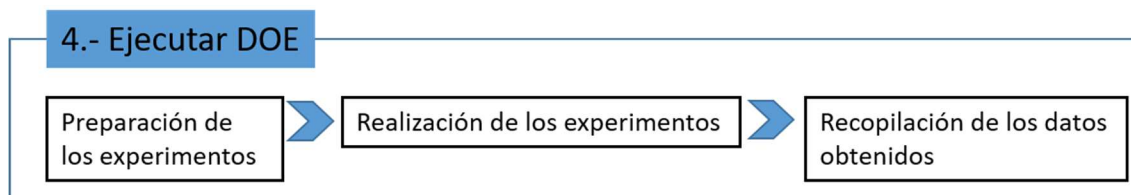


Imagen 13. Fase 4, Flujograma

6.5. Análisis de los resultados de la experimentación

El análisis de los resultados de la experimentación se basa en el cálculo de determinados indicadores, los llamados efectos, que permiten la determinación de la influencia que tienen los distintos factores y sus interacciones en las respuestas. Para ello los indicadores o efectos que se calculan son los siguientes:

- Los **efectos principales**, son los efectos producidos por la acción en solitario de un factor sobre la respuesta. Sin embargo, la magnitud del efecto se ve influida por las interacciones entre los factores.
- Las **interacciones** son los efectos por causa de las combinaciones de los factores. Dependiendo del número de factores de entrada existirán interacciones desde 2, hasta el número total de factores.
- La **contribución básica** de un factor es el valor del efecto principal de ese factor menos el efecto de su interacción. De tal forma que la contribución básica contabiliza el efecto del factor, suponiendo que no se viese afectado por las interacciones con otros factores.

En esta fase se procede a realizar una modelización del proceso dentro de la zona experimental probada. Esta modelización consiste en generar un modelo de regresión que permita la estimación de las respuestas, en función del valor que toman los factores controlables que se encuentren dentro de la ecuación generada. Estos valores siempre se deben encontrar dentro del rango de valores testeados.

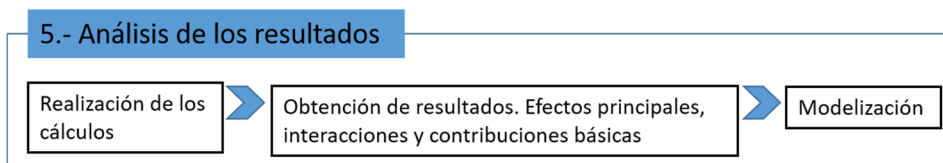


Imagen 14. Fase 5, Flujograma

6.6. Mejora y experimentos de confirmación

En esta etapa se realizan los experimentos confirmatorios. Se realizan las repeticiones del experimento que permiten asegurar y verificar si los resultados obtenidos en la fase 5, son válidos o no. Los efectos de los factores y los modelos de regresión para esos valores de entrada se podrán aplicar y aceptar si estos se repiten en las repeticiones.

En el caso de que los experimentos sean concluyentes se procederá con la siguiente fase, la 7. Pero si la respuesta es negativa, es decir, no existe relación ni coherencia alguna entre los resultados de los experimentos confirmatorios, y los resultados obtenidos en la fase 5, se tendrá que regresar a la fase 2 y comenzar de nuevo con el desarrollo experimental. Al volver a la fase 2, se deberá realizar un replanteamiento de los factores experimentales y una reconsideración de los niveles. Seguido se procederá con la fase 3 y así sucesivamente hasta esta fase, la 6, y conseguir una respuesta afirmativa "sí".

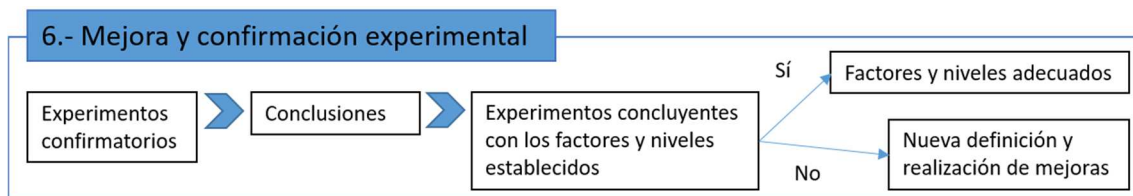


Imagen 15. Fase 6, Flujograma

6.7. Optimización. Elección de los niveles de trabajo

Una vez realizadas las repeticiones y obtener un resultado de semejanza con el experimento inicial, se recogen todos los datos de las respuestas obtenidas hasta el momento, con el objetivo de a partir de sus medias, fijar los mejores valores de trabajo para el proceso. Se deben tener en cuenta para ello todos los datos obtenidos. Todo el desarrollo experimental tiene por finalidad la obtención de los resultados de esta fase.

En esta fase se analiza para que combinación de los niveles testeados se han obtenido mejores respuestas. Para el caso de los equipos de DIBAL en los que se obtienen más de una respuesta de funcionamiento del proceso, se deberá valorar qué tipo de resultados tiene mayor importancia y que combinación de valores consiguen beneficiar a esas respuestas. Aunque también se puede valorar el proceso en general y obtener resultados óptimos, sin ser los mejores, pero que beneficien a todos los tipos de respuestas.

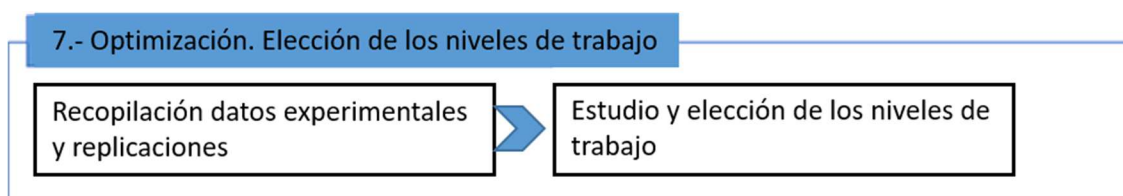


Imagen 16. Fase 7, Flujograma

6.8. Control y estandarización

Una vez realizada la validación de los experimentos y los resultados obtenidos, se establecen los niveles adecuados para el proceso. En esta fase se realiza la estandarización del proceso y se determinan los controles que aseguren su estabilidad, robustez y optimización.

Para DIBAL realizar una estandarización de los equipos es muy complicada, debido a los continuos cambios en la estructura y parámetros de trabajo de las máquinas en función de los requisitos del cliente. Solo en aquellos equipos en los que no se produzcan cambios excesivos podrá realizarse una modelización del proceso. A pesar de ello los responsables de DIBAL tendrán que decidir también, si los cambios suponen una mejora para el equipo.

En cualquier caso, esta es la última fase de la metodología, en la que se conocen los niveles que generan las mejores respuestas y qué respuestas son las más importantes para el proceso. Conocido esto se deberán fijar los niveles productivos encontrados que mejoren las respuestas y entregar al cliente el equipo con dichos parámetros de funcionamiento “personalizados”, o adecuados a mejorar el rendimiento de la máquina a sus necesidades. Aunque estos parámetros no sean fijados, se ha seguido cumpliendo con los objetivos de aumentar el conocimiento sobre la máquina, conociéndose ahora con detalle qué factores y con qué valores funciona mejor el equipo.

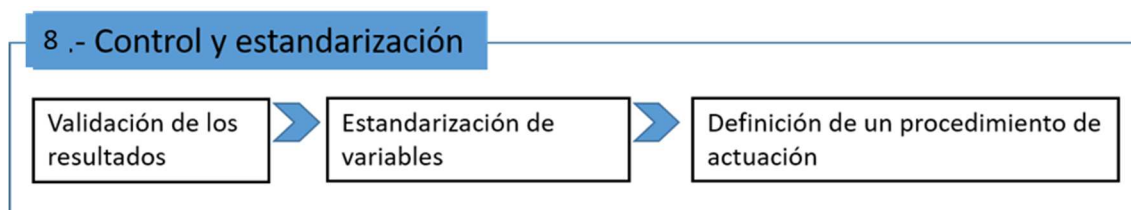


Imagen 17. Fase 8, Flujograma

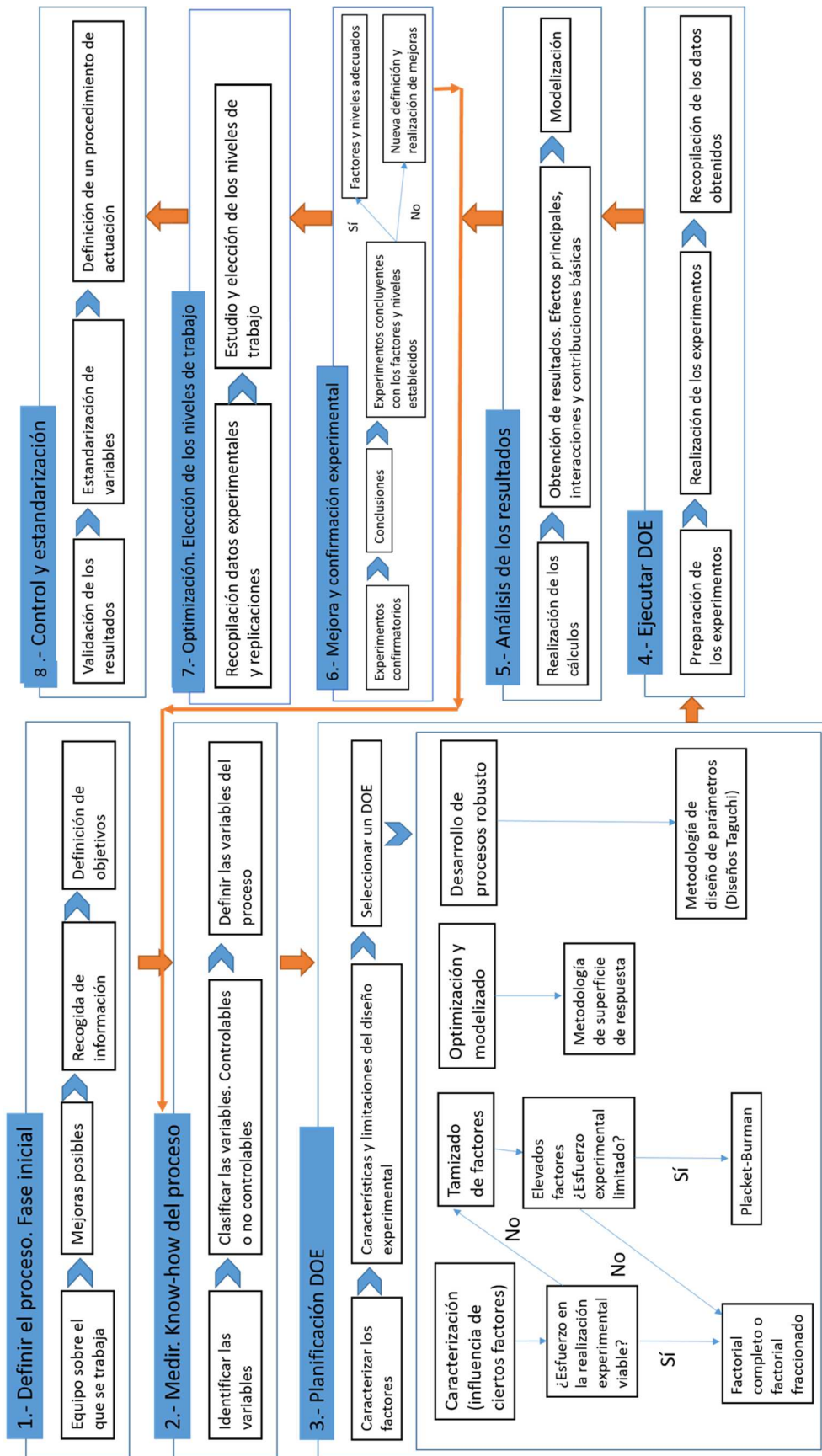


Imagen 18. FLUJOGRAMA DE APLICACIÓN DEL DOE

7. DESARROLLO DEL DOE PARA EL CW800:

A continuación, se procede a la aplicación de la metodología del DOE para el caso de estudio del CW800 (sin ningún tipo de componente extra ensamblado). Durante el proceso de desarrollo metodológico del DOE se han utilizado herramientas estadísticas informáticas. Los programas estadísticos utilizados han sido Minitab18 y StatgraphicsXVII.

Estos programas, permiten crear de forma rápida un diseño experimental con los factores y niveles que se quieren testear. Una vez realizada la fase 4 e introducidos los valores de las respuestas obtenidas en la experimentación en el programa, este calcula los efectos de los factores y sus interacciones. Ambas herramientas informáticas suponen una gran ayuda a la hora de realizar las combinaciones experimentales y el cálculo de los efectos. Además de esto aportan gráficos explicativos y métodos de decisión sobre el diseño más conveniente a aplicar en función de cada caso.

Tanto Minitab como Statgraphics no son complejas de utilizar, siempre y cuando se disponga de unos mínimos conocimientos tanto informáticos como de la metodología DOE. En cualquier caso, el propio Microsoft Excel puede servir de ayuda para aquellos experimentos de fácil diseño donde las combinaciones y codificaciones entre los niveles de los factores no sean muy complejas.

7.1 Primera fase. Definición del caso de estudio.

El CW800 es el equipo sometido al diseño experimental. El objetivo definido para este equipo es obtener resultados e información sobre el proceso, que permitan modelizar y establecer constantes y niveles de los factores intervinientes para la consecución de una mejora de las respuestas del equipo y con ello del proceso. La aplicación del DOE conduce a un mayor dominio y conocimiento del funcionamiento y comportamiento del CW800.

En este caso el DOE está enfocado al estudio y mejora de las variables respuesta del CW800 permitiendo la relación de los distintos niveles de las variables causa, factores controlables, con los factores respuesta que se obtienen. Las respuestas y datos generados durante el proceso del CW800 son 4:

- Errores en las lecturas del peso. Estos errores se han clasificado con el nombre de “pesadas erróneas”. Son los errores asociados a las pesadas incorrectas de la célula de pesaje. La cuantificación de estos errores se realiza en porcentaje.
- Errores por paquetes próximos. Estos errores son fruto de una mala alimentación de paquetes a la célula de pesaje coincidiendo dos paquetes dentro de la célula. Los errores de paquete próximo se deben a posibles deslizamientos de los paquetes en la cinta de alimentación, previa a la de la célula de pesaje, o simplemente una falta de control por parte del sistema software y de PLC que no procesan adecuadamente la información o que generan respuestas erróneas. La célula con la que trabaja el CW800 realiza pesadas de solo una unidad, por lo que al presentarse dos unidades simultáneamente en la célula conducen a un

error de “paquete próximo”. La cuantificación de estos errores se realiza en porcentaje.

- Pesadas Ok. Son todas las pesadas correctas que realiza la célula de pesaje. La forma de cuantificarlas es a partir de porcentajes contabilizando el número de pesadas correctas entre el número de pesadas totales. La diferencia entre el cien por cien de pesadas y los resultados de “pesadas Ok” obtenidos se reparten entre “pesadas erróneas” y “paquetes próximos”.
- Productividad, el número de paquetes por minuto que es capaz de procesar el CW800. Las unidades con las que se trabaja son, por tanto, “paquete/min”.

Durante el planteamiento y la definición del caso se ha procedido a la recogida de información del equipo de balanza industrial CW800. Se tiene acceso a los procedimientos de testing que verifican los estándares de calidad además del historial de errores que se han experimentado durante el testing y el funcionamiento del CW800 en distintas empresas clientes de DIBAL. El análisis de esta información, cumple con la finalidad de entender y conocer los procedimientos de trabajo usados por DIBAL y cuáles son los errores más comunes en el testing, con el objeto de a posteriori tenerlo en cuenta en la ejecución del DOE.

Tras la recopilación de información y la mejor comprensión del proceso se definen los objetivos finales del DOE para el CW800. Entre los objetivos definidos: la mejora de la productividad, reducción de errores tanto de pesadas erróneas como de paquetes próximos y el aumento de las pesadas ok.

El conocimiento de cómo afectan las distintas variables en los factores respuesta y con ello en el funcionamiento del equipo, permite una mayor planificación en el diseño de la máquina y control de las variables que puedan afectar a su correcto funcionamiento bajo unas condiciones de trabajo. El ajuste de los valores de las variables conocidas para unas condiciones de trabajo establecidas por los requisitos del cliente, llevan a la reducción de estos errores mencionados y a productividades más altas. A consecuencia de esto los factores respuesta se ve mejorados.

Al mismo tiempo, el conocimiento aportado por el DOE permite el estudio en profundidad de los errores y el porcentaje de los mismos. Esto permite el desarrollo de modelos de regresión a partir de los cuales estimar cuáles serán los errores esperados que presenta el equipo para unos determinados parámetros de funcionamiento. Esto ayudará tanto a la elaboración de mejores garantías para los equipos adquiridos por los clientes como, a la detección de fallos que se puedan producir o circunstancias de funcionamiento extrañas en los equipos. Gracias al DOE y al modelo de regresión se conocerán con exactitud cuáles son los rendimientos esperados para los parámetros con lo que quiera trabajar el cliente. Permitiendo una venta más exacta, asegurando unas garantías mínimas de trabajo para los equipos que se vendan. Transmitiendo así compromiso por parte de DIBAL con la fiabilidad de la máquina y permitiendo al cliente conocer los resultados del equipo antes de su ensamblaje

Todos estos objetivos o ideas cumplen con otra mucho más potente y que engloba a toda la empresa que es, la mejora en la competitividad de DIBAL. La aplicación del DOE en el CW800 supone una forma de innovación y de mejora de procesos dentro de la empresa, cuyo desarrollo conduce finalmente a la mencionada mejora competitiva y la ventaja en el mercado respecto a sus posibles competidores. Con esto DIBAL logra una mejor calidad de los equipos, mejor previsión del funcionamiento de los mismos y una mejor atención y calidad para el cliente.

7.2 Segunda fase. Medición del caso de estudio.

El proceso que se quiere estudiar es el sistema de discriminación que realiza el CW800 sobre los paquetes que son alimentados a él. A partir de la introducción al equipo de una unidad de producto el CW800 realizará los correspondientes procesos para determinar si ese paquete es apto o no y en su caso no retirarlo o retirarlo, de la línea de embalaje. Para llevar a cabo este procesamiento el CW800 trabaja con una serie de valores que son introducidos en su sistema informático y a partir de los cuales el software, PLC y elementos hardware, ejecutarán el proceso bajo esos parámetros.

7.2.1 Definición de factores de entrada y niveles.

Como se ha indicado la actividad del CW800 conlleva tener en cuenta una serie de variables de entrada cuyos valores pueden fluctuar y que influyen en el correcto funcionamiento del equipo. El ajuste adecuado de las variables del CW800 son calculadas en busca tanto del mejor funcionamiento interno del dispositivo, a nivel software y hardware buscando el mejor procesamiento interno del equipo, como además de la consecución de las mejores respuestas posibles en productividad y número de fallos.

Por ello la definición de las variables intervinientes en el proceso es una labor importante y que requiere de atención por parte del equipo experimental. La no identificación de las variables intervinientes en el proceso puede conducir a la obtención de resultados del DOE, que nada o poco tengan que ver con el comportamiento real del equipo. Esta mala definición de los factores de entrada puede acarrear graves fallos posteriores a la realización experimental, suponiendo desde una mala elección del diseño del experimento hasta la cuantificación errónea de los efectos principales o contribuciones básicas, llevando a un mal análisis experimental y una mala realización de conclusiones finales. Todos estos errores se verán reflejados en la fase de comprobación.

A la hora de categorizar las variables como se ha explicado previamente en el apartado de elementos del DOE, las variables se clasifican en controlables y no controlables. Realizando un pequeño recordatorio, las variables controlables son aquellas que tienen un control provocado, las no controlables, también llamadas variables latentes, son aquellas sobre las que no es posible ningún control aunque sí se pueden minimizar sus efectos. En el caso del CW800 manteniendo un buen estado de la maquinaria y piezas que componen el equipo o, realizando una buena manipulación en la alimentación de paquetes.

Tras el análisis del funcionamiento del CW800 se ha procedido a la determinación de todas las variables intervinientes en el proceso. Se han establecido 10 en total. El siguiente es un cuadro resumen explicativo de las variables encontradas.

Nº	Factor	Tipo de factor	Clasificación	Rango del factor
1	Velocidades	Continua (m/s)	Controlable	V5 (61,5 m/s)
2	Tiempo de establecimiento	Continuo (ms) > 280ms	Controlable	280 ms / 330 ms
3	Tiempo de medida	Continuo (ms) > 60ms	Controlable	60 ms / 85 ms
4	Peso paquete	Continuo (Kg) (Para el CW800 rango de 2g a 6 Kg)	Controlable	250 g
5	Tipo pesaje	(Estático/Dinámico)	Controlable	Estático
6	Longitud de la cinta	Discreta	Controlable	370 mm / 430 mm
7	Embalaje paquete	Listado 1	Controlable	Discos de pesaje de prueba
8	Formato paquete	Listado 2	Controlable	Discos de pesaje de prueba
9	Fallos PLC célula de pesaje		NO controlable	
10	Errores célula de pesaje		NO controlable	

Tabla 1. Resumen de las variables controlables y no controlables del CW800

Se realiza un análisis exhaustivo de las variables localizadas con el objetivo de simplificar y reducir al máximo las 8 variables controlables encontradas. Se pretende con este estudio definir los niveles para realizar la experimentación.

- **Velocidades.**

El CW800 presenta distintas velocidades de operación, la selección de la “velocidad 5” de 61,5 m/s es la elegida para la realización experimental. Dado que a mayores velocidades el procesamiento que debe realizar el equipo debe ser más ágil, siendo la condición más exigente de trabajo en cuanto a velocidad.

Al trabajar también a velocidad 5 y no a velocidades bajas se pueden conseguir bajo unos determinados valores de las variables de entrada, respuestas más significativas y con diferencias perceptibles de las que posteriormente poder extraer conclusiones para los factores que influyen en el proceso. Con esto se quiere decir que, a velocidades

bajas, realizando por ejemplo 100 ciclos de repetición para unas determinadas variables, velocidad, peso y tiempo de medida, no se obtenga un número de fallos suficientemente perceptible para identificar las diferencias entre las combinaciones de distintos valores de factores controlables. Mientras que a velocidad 5 se obtiene un porcentaje de fallos tanto de paquete próximo como de pesadas erróneas mayor, que el desarrollo posterior de conclusiones y el cálculo de los resultados consiguientes.

Sin embargo, las diferencias entre el número de fallos a velocidades altas y a velocidades bajas no son muy elevados. La célula de pesaje y los equipos del CW800 están lo suficientemente ajustados a los parámetros para apenas generar un aumento de fallos al trabajar con distintas velocidades. Pero aun así, este diferencial de fallos entre velocidades bajas y altas genera que la experimentación a velocidad 5 sea más interesante de realizar y facilite variables de salida que permitan obtener los factores que tengan un mayor peso. Se observa en la tabla el conjunto de velocidades de trabajo de las que dispone el CW800.

Velocidades cinta	v0=19m/min	v1=26m/min	v2=35m/min	v3=44m/min	v4=52m/min	v5= 61.5m/min
-------------------	------------	------------	------------	------------	------------	---------------

Tabla 2. Velocidades CW800

A pesar de realizar la experimentación con esta velocidad, una vez acabados los experimentos sería conveniente más bien de obligatorio cumplimiento, realizar una fase de comprobación de los resultados. Repitiendo de nuevo el experimento con velocidades bajas. Comprobando que verdaderamente las conclusiones obtenidas para la velocidad 5 más alta del CW800 también se cumplen en las velocidades más bajas.

En este diseño se realiza la hipótesis de que las conclusiones obtenidas se cumplen para cualquier velocidad simplificando el estudio. Suponiendo como única diferencia entre las velocidades el cambio en la productividad. Sin embargo, previsiblemente las respuestas siguen una relación de proporcionalidad con las velocidades a las que se trabaje, obteniendo menor productividad y menor porcentaje de errores en velocidades bajas como se ha explicado.

Si al final existiesen grandes cambios en función de las velocidades habría que incluir la velocidad como variable a dos niveles, como mínimo, y con ello plantear un nuevo diseño experimental. La finalidad principal de probar solo una velocidad en el proceso experimental cumple con la intención de reducir las variables a considerar, simplificando el modelo y con ello el gasto tanto económico como de tiempo que supone la realización experimental del diseño.

- **Tiempo de establecimiento y tiempo de medida**

Siguiendo con los factores planteados en la tabla, el tiempo de establecimiento junto con el tiempo de medida es el tiempo en milisegundos como mínimo que el paquete que está siendo procesado debe permanecer en su totalidad en la célula de pesaje, para realizar la correspondiente pesada. Por lo tanto, una pesada conlleva dos condiciones necesarias, que el paquete se encuentre en su totalidad dentro de la célula y que lo

haga durante un tiempo total mínimo indicado con la suma del tiempo de establecimiento y de medida.

El tiempo de establecimiento hace referencia al tiempo que necesita una unidad para estabilizarse en la célula para que así, no existan problemas debidos a vibraciones que interfieran en el pesaje y procesamiento del mismo. Mientras que el tiempo de medida es el tiempo que la célula de pesaje requiere para realizar una pesada una vez el paquete se encuentre en su totalidad dentro de los límites del carro de pesaje. Señalar también que estos dos tiempos son procesados en orden, primero el de establecimiento y luego el de medida y que se empieza a contar el tiempo una vez el paquete se encuentra en su totalidad dentro del carro.

Estos tiempos a su vez establecen una condición limitante a la hora de realizar el pesaje de un producto. Puesto que trabajando a una velocidad determinada, si esta es muy elevada y las dimensiones del paquete y célula no son las óptimas no se podrá realizar un pesaje dinámico, limitando el proceso al pesaje estático. Esto se debe a que al tener que cumplir las condiciones necesarias, puede que a velocidades altas no se cumplan ambas condiciones. Para ello se ha realizado una breve hoja Excel que sirva como estimación de las longitudes máximas de los paquetes que se podrían pesar a unas determinadas velocidades. Mientras tanto se determinan dos niveles para los tiempos de establecimiento y de medida para el desarrollo de la experimentación. Siendo 280 ms y 330 ms para el tiempo de establecimiento y 60 ms y 85 ms para el tiempo de medida.

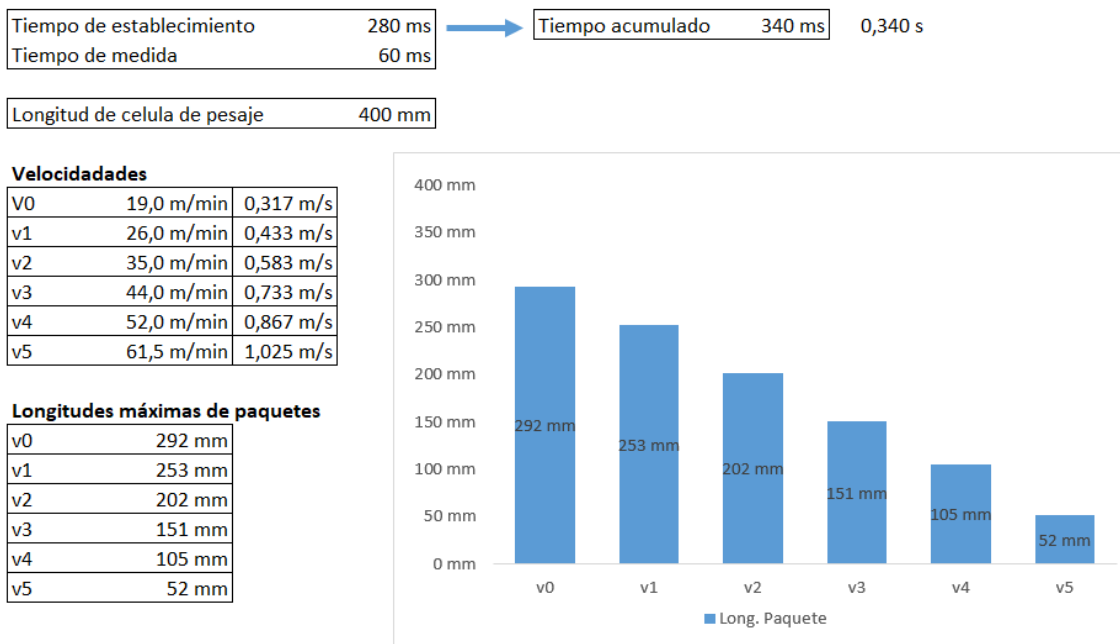


Imagen 19. Tamaños máximos de paquete para 280ms y 60ms

En esta primera imagen se pueden observar como para los valores de los factores tiempo de establecimiento (280 ms) y tiempo de medida (60 ms) para la velocidad 5, únicamente se podría pesar paquetes de longitud máxima 52 mm.

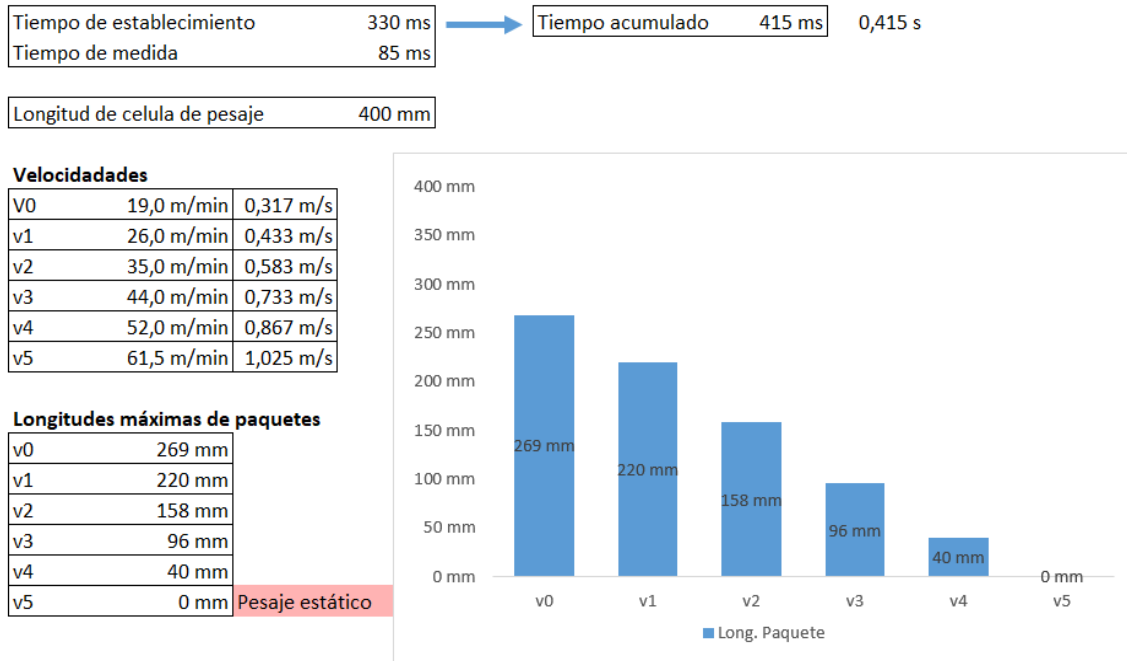


Imagen 20. Tamaños máximos para 330ms y 85ms

En esta segunda imagen con niveles de tiempo de establecimiento y tiempo de medida en 330 ms y 85 ms respectivamente, se puede observar cómo a velocidad 5 es necesario realizar un pesaje estático obligatoriamente.

Puesto que para una combinación de los niveles seleccionados de 330 ms de establecimiento y 85 ms de medida no se puede realizar un pesaje dinámico, se opta por realizar exclusivamente, tratamientos con pesadas estáticas. El experimento se lleva a cabo por medio de discos de prueba de sección circular cuyas dimensiones son de 100 mm de diámetro. Se realiza de nuevo una simplificación con el objetivo de facilitar el diseño y la realización experimental no considerando las pesadas dinámicas, pues el tipo de pesada dinámica o estática no supone cambio alguno en las respuestas.

Al igual que con la velocidad se deberá realizar una comprobación de resultados. Se debe comprobar que los efectos calculados y las interacciones de factores afectan de igual manera al pesaje estático como al dinámico. En el caso de que no se cumpla y los valores de los factores entrada tengan distintas respuestas en pesaje dinámico, deberá modificarse el diseño experimental y realizar uno nuevo. Considerando una nueva variable de tipo de pesaje a dos niveles dinámico o estático. Esto induce también a incluir la velocidad como nueva variable, puesto que se tendrá que jugar con ella para cumplir con las condiciones necesarias de pesaje y no para todas las combinaciones de tiempo de establecimiento y de medida se podrá realizar pesaje dinámico.

- **Peso paquete.**

Centrando la atención ya no en el equipo sino en el paquete a tratar, aparecen una serie de variables susceptibles de experimentar. Dentro de estas, la variable con más importancia aparente es el peso del producto. El CW800 es un equipo cuyo rango de pesaje se encuentra limitado entre 2 g y 6 Kg por lo que los paquetes no podrán

sobrepasar estos límites. Para la determinación de los niveles con los que experimentar la variable peso se realiza un estudio previo al DOE. Comprobando el comportamiento de la célula de pesaje incorporada a los modelos CW800 para una serie de pesos y velocidades de trabajo.

Los análisis realizados se han llevado a cabo con distintas velocidades y pesos de prueba (las distintas tablas se adjuntan en los anexos). El procedimiento seguido consta de muestra de 60 repeticiones de pesadas cada una, para posteriormente calcular la desviación estándar de las mismas y sus errores promedios. También se muestran los requisitos establecidos por norma, que deben pasar las células para unas condiciones de peso y velocidad.

El objetivo principal de la prueba es conocer cuál es la desviación estándar en kilogramos del proceso de pesaje dentro de los límites del CW800. Conocidas estas desviaciones se pueden sacar conclusiones sobre cómo y con qué niveles experimentar la variable peso para la ejecución del DOE.

Para ciertos casos no se cumple la desviación máxima exigida quedando la desviación muestral obtenida por encima de este valor. Estos problemas pueden deberse a la incorrecta colocación de la célula durante el ensamblamiento del CW800, o a la mala calibración de esta. En tal caso la célula defectuosa sería corregida para pasar el filtro de calidad consiguiendo que la desviación estándar de la muestra sea aún menor.

Si se corrige la célula, la nueva desviación estándar dentro de los parámetros de la norma no supondrá un aumento o variación significativa de la desviación estándar ya calculada. Debido a esto, se ha decidido no dar una importancia mayor a estos errores y no realizar una corrección de la célula durante estos experimentos pues no afectan al objetivo de las pruebas realizadas. Sin embargo, sí que se realizarán los arreglos necesarios para la posterior puesta en el mercado del CW800.

Una vez realizada las tablas de “comprobación de pesajes de la célula” (estas tablas se adjuntan en los anexos), para todos los casos planteados se procede a la recogida de todas las desviaciones muestrales y de los errores medios obtenidos. Estos datos se comparan y se obtienen las desviaciones de las propias desviaciones estándar muestrales, su promedio y se realiza la misma operación con los errores medios obtenidos. Se elabora la siguiente tabla:

50 gr	Error medio(Kg)	-0,00046
V = 5	Desviación estandar (Kg)	0,000250
100 gr	Error medio(Kg)	-0,00028
V = 5	Desviación estandar (Kg)	0,000397
500 gr	Error medio(Kg)	-0,00002
V = 5	Desviación estandar (Kg)	0,000262
1 Kg	Error medio(Kg)	-0,00024
V = 5	Desviación estandar (Kg)	0,000481
2 Kg	Error medio(Kg)	0,00033
V = 0	Desviación estandar (Kg)	0,000395
2 Kg	Error medio(Kg)	-0,00017
V = 5	Desviación estandar (Kg)	0,000534
2,7 Kg	Error medio(Kg)	0,00067
V = 0	Desviación estandar (Kg)	0,000365
4 Kg	Error medio(Kg)	0,00123
V = 2	Desviación estandar (Kg)	0,000520
5,4 Kg	Error medio(Kg)	0,00038
V = 4	Desviación estandar (Kg)	0,000544
Excentricos		
Posición 1	Error medio(Kg)	-0,00035
	Desviación estandar (Kg)	0,000183
Posición 2	Error medio(Kg)	-0,00036
	Desviación estandar (Kg)	0,000185
Promedio de la desviación estandar		0,000374
Desviación de la desviación estandar		0,000137
Promedio del error medio		0,000067
Desviación del error medio		0,000529

Tabla 3. Resumen de medias y desviaciones de los pesajes, y desviación estándar media y del proceso

Tras la realización de la tabla se puede obtener información consistente para plantear la estrategia a seguir con la variable “peso paquete” en la realización del DOE. Como se puede observar las desviaciones muestrales de los distintos grupos experimentados son muy pequeñas, siendo la mayor desviación muestral la de 5.4 Kg a velocidad 4 con un valor de 0.000544. Existen variaciones entre las desviaciones de muestras de mayores pesos y de pesos bajos pero estas diferencias apenas son significativas.

Ante esta situación en la que los pesos de los productos y las velocidades afectan tan levemente a las desviaciones estándar en las pesadas y con ello al porcentaje de pesajes correctos que realiza la célula, se puede concluir que la variable peso no supone cambios importantes en las respuestas. Se decide por ello, prescindir del estudio de los efectos que pueda generar la experimentación de la variable peso pues son prácticamente inapreciables.

Los efectos o interacciones que tenga por ejemplo, experimentar el peso a un nivel 1 de 2 Kg y a un nivel 2 de 5 Kg, no supondrán grandes cambios en los factores respuesta. Por ello el peso del producto se experimentará a un solo nivel en este caso 250 g. Habiendo realizado este estudio previo y realizando esta consideración, se consigue simplificar el modelo y la posterior ejecución del mismo.

Además de las conclusiones relativas al pesaje, el análisis llevado a cabo ha servido también para obtener información sobre la velocidad. Como se puede observar, las velocidades de las muestras son en su mayoría de “velocidad 5”, puesto que se ha seguido el mismo principio de exigir el máximo a la máquina, estrategia planteada con anterioridad para la experimentación de la velocidad en el DOE. Aunque el estudio no ha sido enfocado a la velocidad sí que se han realizado muestras con distintos valores de ésta. Los resultados obtenidos demuestran que existe variación, pero muy leve, entre los resultados obtenidos al realizar el experimento a velocidades bajas y altas.

Promedio (Kg)	1,9997
Error medio(Kg)	0,000328
Desviación estandar (Kg)	0,000395

Tabla 4. Disco de 2kg a velocidad 2

Promedio (g)	2,0000
Error medio(g)	-0,000167
Desviación estandar (g)	0,000534

Tabla 5. Disco de 2kg a velocidad 5

La primera tabla es el resultado de la muestra con un paquete de 2 Kg y velocidad 2, mientras que la segunda tabla es de un paquete de 2 Kg a velocidad 5. Como se puede observar la desviación estándar muestral aumenta con la velocidad. A pesar de ello y como ya se comentó en el apartado de la variable velocidad, la diferencia en la desviación es muy pequeña apenas significativa, para realizar distinción de niveles con los que experimentar la velocidad. La diferencia es de 0.000139 entre ambas desviaciones. Esto sirve como confirmación de la simplificación realizada para la experimentación de la velocidad.

Como se ha ido indicando con los factores descritos hasta ahora la estrategia experimental definida para el peso debe ser comprobada. Se ha definido que para la elaboración del DOE el peso sea experimentado a solo un nivel, pues se considera que experimentar a dos o más niveles esta variable apenas aportará información de relevancia sobre los efectos e interacciones ya que no afecta a los factores respuesta. Esta definición deberá ser comprobada posteriormente. Se deberá realizar un nuevo experimento con pesos distintos. En el caso de que los efectos de los factores cambien se deberá evaluar el peso a mínimo dos niveles.

- Tipo pesaje.

La variable tipo de pesaje es una variable cualitativa y se puede ejecutar a dos niveles. Dinámico, pesando el paquete mientras la cinta está en movimiento o estático, si el

pesaje se realiza con la cinta parada. Aunque para esta variable no se han realizado pruebas específicas, como es el caso del peso y velocidad, no parece una variable significativa que vaya a tener un efecto sobre las respuestas. Las variaciones estándar que presente el pesaje dinámico a cualquier velocidad frente al pesaje estático, serán del orden de las desviaciones de las muestras de pesajes de distintos pesos y distintas velocidades. Dicho esto y con las condiciones de tiempo de medida y establecimiento, además del tamaño del paquete, se realizarán pesadas estáticas.

En cualquier caso, la veracidad de la afirmación hecha se deberá confirmar con la realización de un nuevo experimento con pesajes dinámicos. En este proceso se deberá comprobar que los resultados obtenidos con el pesaje estático son compartidos por el pesaje dinámico.

En el caso que no se cumpliera dicha relación y al tratarse de una variable cualitativa, no se podrán recoger en un mismo modelo de regresión ambos tipos de pesaje. Debido a esto, habrá que realizar dos experimentos duplicando el desarrollo experimental para estos nuevos niveles, uno para pesaje dinámico y otro para pesaje estático y generar dos modelos de regresión para cada caso.

Esto supone un gran aumento del esfuerzo experimental, razón por la cual se ha decidido considerar al tipo de pesaje como variable no significativa y con poco interés de estudio reduciendo así el coste del DOE. Hay que señalar que habría también que realizar una redefinición de niveles para los factores ya planteados, pues para determinadas velocidades y tiempos de establecimiento y medida puede que no sea posible el pesaje dinámico.

- **Longitud de cinta.**

La longitud de la cinta hace referencia a la célula de pesaje. Es la largura de los distintos modelos de células de pesaje que se pueden incorporar al CW800. En función de las necesidades del paquete, velocidad de cintas y tiempos de medida y establecimiento se instalará una longitud u otra. Como ya se ha visto anteriormente no para todas las combinaciones se pudo realizar un pesaje dinámico. Si por necesidades productivas u otras el cliente exigiese el tratamiento dinámico de sus productos, se incorporará una cinta acorde a sus necesidades al CW800.

Tiempo de establecimiento	330 ms	→	Tiempo acumulado	415 ms	0,415 s
Tiempo de medida	85 ms				

Longitud de celula de pesaje **450 mm**

Velocidades

v0	19,0 m/min	0,317 m/s
v1	26,0 m/min	0,433 m/s
v2	35,0 m/min	0,583 m/s
v3	44,0 m/min	0,733 m/s
v4	52,0 m/min	0,867 m/s
v5	61,5 m/min	1,025 m/s

Longitudes máximas de paquetes

v0	319 mm
v1	270 mm
v2	208 mm
v3	146 mm
v4	90 mm
v5	25 mm

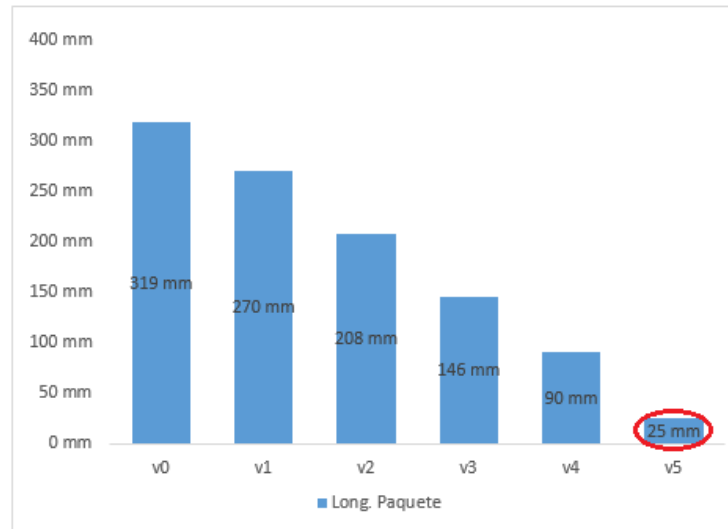


Imagen 21. Tamaños máximos de paquete

Como se puede observar en el gráfico un cambio de 400 mm de longitud a 450 mm supone poder realizar un pesaje dinámico a velocidad 5 con una dimensión máxima de paquete 25 mm.

Estas longitudes de cinta no son continuas ya que existen determinadas dimensiones ya estandarizadas (con continua se refiere a que por ejemplo, no existe la medida de longitud de cinta 426mm). Para esta variable se ha considerado necesario experimentarla a dos niveles. El cambio en la longitud conlleva variaciones en la productividad y en el porcentaje de errores de pesaje. Cuanto mayor sea la longitud de la cinta mayor tiempo tendrá que permanecer el paquete en ella. Aunque la diferencia de tiempos entre una longitud y otra no es muy elevada pues únicamente se trata de varios centímetros de diferencia longitudinal, sí que existen variaciones significativas en las respuestas.

Por ello, los niveles de experimentación seleccionados para el factor longitud de cinta son dos, un primer nivel de 370 mm de longitud y un segundo nivel de 430 mm de longitud. La anchura de la cinta sin embargo, permanece constante y fijada en 280 mm.

- Embalaje y formato del paquete.

Continuando con las características del paquete existen distintos tipos de embalaje y formatos. Siendo el embalaje y el formato una característica cualitativa. Estos valores sin embargo, no parecen afectar o aportar ningún tipo de cambios en los pesajes y en los factores respuesta. Sí que es cierto que dependiendo de un material u otro puede deslizarse o vibrar más fácilmente en la cinta pudiendo llegar a generar más problemas en el procesamiento. A pesar de ello, los cambios de un formato y de un embalaje a otro no suponen más problemas y no presentan efectos de valor en las respuestas.

Existen muy diversos tipos de envoltorios y formas de producto por lo que una consideración individual de cada uno de estos niveles, supondría un gran aumento en el coste experimental. Ante esta situación y con idea de reducir este coste se realiza también la simplificación de considerar los formatos y los paquetes como variables sin peso experimental. Esto supone una reducción en la realización experimental.

Sin embargo, esta hipótesis que supone una gran simplificación en el modelo y que no ha sido probada conlleva los riesgos de que no se cumpla al realizar la repetición experimental con otros paquetes de distinta forma y embalaje. Esto originaría nuevos diseños experimentales para probar los distintos productos que conduciría a realizar modelos de regresión individuales para cada uno o para un grupo de ellos. A pesar de esto, la estrategia considerada más óptima, eficaz e intuitiva, es la de esperar que estas dos variables no supongan cambios relevantes y apreciables en las respuestas, de tal forma que se experimentará a un solo nivel ambos factores con discos sólidos y circulares concebidos para la experimentación.

Forma:

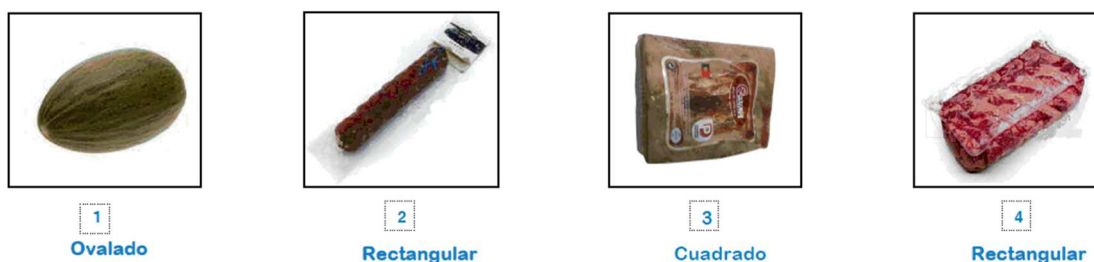


Imagen 22. Distintas formas de los paquetes



Imagen 23. Distintos formatos para los paquetes

Como se puede observar en las imágenes existen distintos formatos de paquetes y embalajes. Estos factores dependen exclusivamente de las necesidades y exigencias del cliente por lo que, no se trata de factores fijos que formen parte del propio funcionamiento del CW800 sino que estos son externos y pueden cambiar. El cambio continuo de productos conduce a que sea aún más difícil definir unos niveles para estos factores y establecer una estrategia experimental. Es por esto también, que se considera únicamente un formato y embalaje a la hora de experimentar ya que, la consideración individual de los distintos tipos posibles en función del cliente sería muy costosa.

También es importante decir que no todos los formatos y embalajes se adecuan a los requerimientos de funcionamiento del CW800. La gran variabilidad de necesidades del

cliente obliga a acotar las prestaciones de este equipo. Por lo que no todos los paquetes podrán ser procesados en esta máquina como es el caso de productos frescos o congelados, ya que el CW800 no tiene los tratamientos adecuados en su estructura para manejarlos. En tal caso las tasas de fallos y en definitiva los valores de las variables respuesta pueden sufrir cambios que correrán a cuenta del mal uso por parte del cliente.

Para el desarrollo del experimento, se ha optado por un disco de pruebas de sección circular de 250 g de peso y diámetro 100 mm (Se puede observar en la imagen derecha).

En la imagen se pueden apreciar las tres cintas que componen el CW800. La cinta más al fondo que se encuentra partida corresponde a la cinta de alimentación. El disco de pruebas se encuentra en la cinta de la célula de pesaje y por último la más cercana la cinta de expedición.

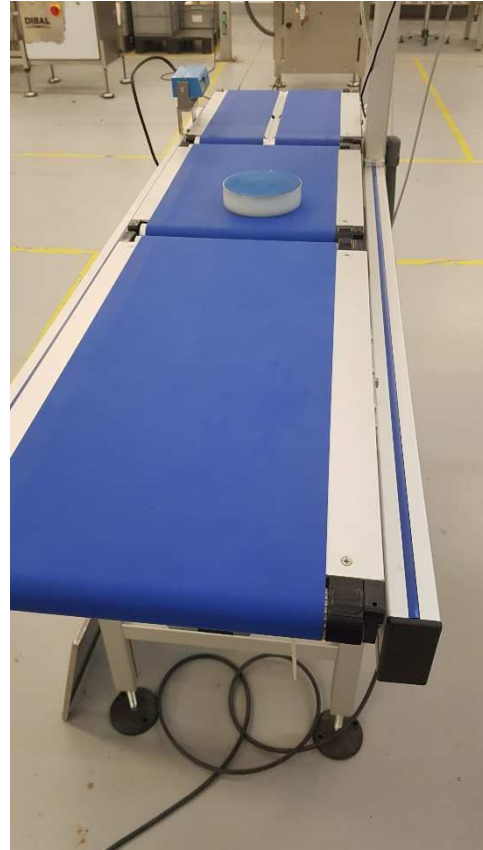


Imagen 24. CW800 con disco de pruebas

- Factores no controlables. Fallos del PLC y errores de la célula.

Una vez acabados de analizar los factores controlables se sigue con los factores no controlables que son las llamadas variables latentes. Sus niveles no pueden ser controlados, aunque sí que es conveniente conocer los factores origen de estas variables no controlables y así ejercer un mínimo control y supervisión de las mismas.

En la tabla del comienzo se señala que los problemas del PLC y de las condiciones de la célula de pesaje pueden conducir a un aumento en los errores. Los problemas del PLC pueden ser originados por falta de velocidad de procesamiento para condiciones de trabajo exigentes o interferencias en las señales por cable. Mientras que los problemas por la célula son debidos a la situación de la misma, limpieza, estado de los sensores, etc. Todo ello y la reducción de los efectos de estas variables se pueden solventar con una instalación, manejo y mantenimiento adecuado.

Se concluye así con el análisis de las variables y los niveles a experimentar. Gracias a este estudio se consigue reducir el número de factores intervinientes en el proceso y con ello el número de experimentos a realizar. Pasando de 8 factores controlables a 3 con dos niveles cada uno. Lo que se traduce en un diseño experimental de 2^3 combinaciones de estudio como máximo. Se ha obtenido por tanto la simplificación con éxito del modelo.

7.2.2 Características del CW800 y reducción de variables.

A diferencia de otros equipos de DIBAL el CW800 es una máquina robusta y definida bajo unos estándares, con el objetivo de cubrir las necesidades en específico de determinadas líneas de embalaje. Esto reduce las variables a tener en cuenta, pudiendo prescindir de los factores “posición detector” y “material de cinta de pesaje” que aparecen en el estudio de otros equipos.

El detector como bien indica su nombre, es un detector previo a la célula de pesaje que manda una señal al PLC para que, o bien pare o arranque la cinta de alimentación al carro de pesaje si hay o no un paquete en espera. El material de la cinta de pesaje es el material del que está hecho la propia cinta para el CW800 son bandas rígidas de poliuretano. Estas características fijas suponen que para el caso del CW800 estos factores no entran dentro del grupo de variables a considerar, suponiendo la reducción en el número de factores controlables a tener en cuenta en el DOE.

7.2.3 Determinación de replicaciones.

Ahora es el turno de definir el número de replicaciones necesarias para estandarizar y confirmar los resultados. Este proceso de replicación es realizado en la fase 6 y consiste en repetir los experimentos con fines confirmatorios. Sin embargo, puede que definir o realizar una estimación de las comprobaciones a realizar resulte más o menos complejo para el caso de este experimento, pues se han realizado numerosas simplificaciones.

Al haber realizado la simplificación de factores con base en estudios experimentales realizados fuera del DOE, aunque similares a la metodología del diseño experimental, es muy probable que las replicaciones confirmen las estimaciones supuestas. Por lo que no es necesario realizar un gran número de repeticiones del experimento.

Definir las replicaciones adecuadas para determinar los fallos cometidos con el modelo planteado permiten evitar el error de tipo I (rechazar el modelo siendo correcto). Hay que ser consciente de que los errores experimentales existen y están presentes en la experimentación por muy riguroso que haya sido el equipo experimental y la realización del DOE. Es por ello, que los resultados deben ser contrastados obligatoriamente en la fase 6 realizando las replicaciones y experimentos confirmatorios.

Al tratarse de un proceso industrial y como es habitual en estos casos, se definirán aproximadamente 2 réplicas y un nivel de significación α igual a 0.05 para realizar las comprobaciones de varianza entre las réplicas y el experimento. El objetivo es confirmar la hipótesis nula de que las réplicas están dentro de los parámetros del primer experimento compartiendo medias. En el caso de confirmar la hipótesis alternativa en la

que han existido errores y las réplicas no tienen los mismos resultados, medias distintas, se volverían a definir los factores y los niveles conforme a los errores obtenidos en estas pruebas.

7.3 Tercera fase. Planificación del DOE para el caso de estudio.

El objetivo principal en esta fase es la de seleccionar un diseño experimental que se ajuste mejor a las necesidades tanto de realización experimental es decir, la ejecución del propio experimento, como de la información posterior que proporcione el modelo sobre la unidad experimental.

Realizando un vistazo general a la fase 2 se puede observar como finalmente se han conseguido 3 factores con dos niveles cada uno es decir, 8 posibles combinaciones. Sin embargo esto no es suficiente para determinar qué modelo utilizar. El proceso experimental y el coste tanto económico como de tiempo que conlleva realizar el experimento es muy importante.

En el caso del CW800 la realización experimental no supone un coste económico y temporal más allá del que un operario dedique a la realización del experimento y recogida posterior de datos. La experimentación en el CW800 no requiere de instalaciones costosas, procesos lentos, o de elevado coste económico por repetición.

La ejecución experimental consistirá en la introducción de los niveles establecidos para los factores de forma rápida y realizar las repeticiones necesarias que sean representativas del modelo. En este caso, se recomienda realizar mínimo más de 200 repeticiones de pesaje para cada combinación de valores experimentales y luego sacar la media. Hay que darse cuenta de que la máquina procesa a velocidad 5 un rango de 125 paquetes al minuto, por lo que 200 pesajes no llegan a los dos minutos de experimentación para cada combinación.

La idea con estas repeticiones es obtener una muestra representativa del proceso con media y desviación dentro de los límites y reducir en cierta medida, el efecto de los factores no controlables en posibles errores de medición que se suman a los errores en la toma de respuestas que puedan ocurrir.

En esta ocasión se realizarán 300 repeticiones. La introducción de los cambios en el tiempo de establecimiento y medida son realizados en meros instantes, suponiendo únicamente cambios introducidos en la programación de la máquina. Mientras que los cambios en la longitud de la cinta, sí que pueden suponer más gasto de tiempo aunque totalmente dentro de los límites lógicos para realizar esta experimentación, no suponiendo un gasto desmesurado de tiempo el cual que se traduce en dinero. Por lo que en líneas generales, los factores a experimentar y su número de niveles no es muy elevado ni costoso. Esto permite la flexibilidad en la ejecución que en definitiva se verá reflejada en la mejor obtención de respuestas y rapidez experimental, siendo una variable importante para decidir el modelo experimental a seleccionar.

Ante esta situación de flexibilidad experimental, el número de combinaciones de estudio, 8 en total, no supone un elevado número para la experimentación. Por lo que los factores y sus niveles pueden ser ensayados en su totalidad, es decir, se puede llevar a cabo el

estudio de todas las combinaciones. El modelo elegido para el estudio es el diseño factorial completo.

El diseño factorial completo, permite medir cómo influyen los factores planteados en el proceso, y cuál es el efecto de sus interacciones. Al variar los niveles de todos los factores al mismo tiempo en lugar de uno a uno, permite estudiar sus interacciones. En el diseño factorial completo se realiza la medición de todas las interacciones de los factores.

El número de corridas a analizar en un diseño factorial a dos niveles es de 2^k , donde k es el número de factores y la base 2 son los niveles a los que se experimenta cada factor. A medida que aumenta el número de factores incluidos en un diseño factorial de 2 niveles el número de corridas necesarias para realizar un diseño factorial completo aumenta rápidamente de manera exponencial. Ante esto la realización de un diseño factorial completo puede ser inviable.

Por lo que la pregunta de si verdaderamente se puede prescindir de las simplificaciones realizadas en la fase 2, habiendo identificado las variables más significativas, la respuesta es un rotundo no. Basando la simplificación en el estudio de las variables realizado y en el principio de Pareto se logra la disminución de 2^8 combinaciones (256) a 2^3 combinaciones (8). Por ello se ha realizado una gran simplificación de variables y de niveles durante la fase dos del desarrollo metodológico.

Otra razón importante para la elección del diseño factorial completo, siempre y cuando sean experimentos de 4 a 16 combinaciones (a partir de 5 factores el número de combinaciones es muy elevado para realizar operaciones manuales) es que por su sencillez, una matriz de experimentos factorial completa 2^k no requiere un software especializado para construirla ni para analizar sus resultados, pudiendo realizarse fácilmente con Excel por ejemplo. Esto supone una mayor accesibilidad a la realización de este tipo de experimentación y de la obtención de resultados siempre que los experimentos tengan pocos factores y niveles

Además de los razonamientos hechos los softwares estadísticos pueden ayudar en la elección del tipo de diseño experimental que utilizar. En función de los factores y niveles los programas aconsejan utilizar un tipo de diseño u otro. A continuación, se muestran los modelos selectivos de los que dispone Minitab18.

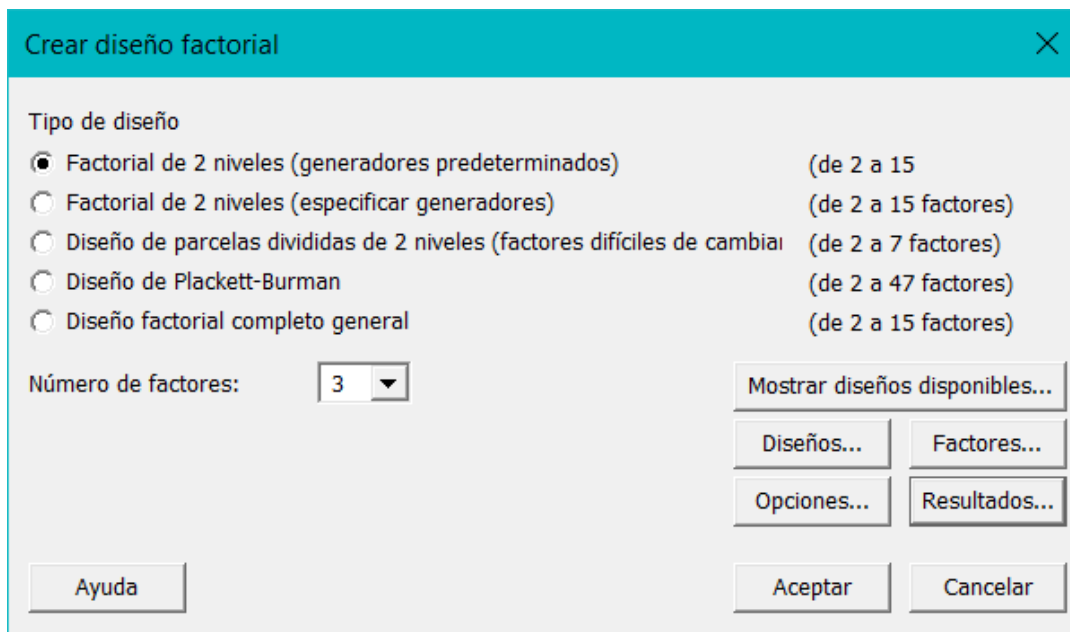


Imagen 25. Ventana Minitab, para decidir el diseño factorial

Como se puede ver en la imagen arriba, se muestran a la derecha el número de factores con los cuales Minitab recomienda usar un tipo de diseño u otro. En este caso, está más que claro que el diseño óptimo es el factorial completo por el número de factores que se tiene. Sin embargo y en caso de duda, es mejor realizar este tipo de consultas previas en el propio programa que se esté utilizando. En este caso el filtro de Minitab es muy claro y consiste en el simple número de factores y niveles a analizar, lo cual resulta muy sencillo para decantarse por uno u otro modelo.

A parte de este filtro para los diseños experimentales existe otro método para la elección del diseño más óptimo y este consiste en la elección de una buena resolución. La resolución, es una característica de los diseños experimentales en la cual uno o más efectos se confunden por lo que no pueden ser estimados correctamente. Se definen por tanto varios niveles de resolución, donde lo deseable es usar el mayor nivel de resolución posible. Los diseños de resolución III, IV y V son los más comunes.

- Resolución III

Ningún efecto principal se confunde con ningún otro efecto principal, pero los efectos principales sí que se confunden con las interacciones de 2 factores.

- Resolución IV

Ningún efecto principal se confunde con ningún otro efecto principal o interacciones de 2 factores, pero algunas interacciones de 2 factores se confunden con otras interacciones de 2 factores y los efectos principales se confunden con las interacciones de 3 factores.

- Resolución V

Ningún efecto principal o interacción de 2 factores se confunde con ningún otro efecto principal o interacción de 2 factores, pero las interacciones de 2 factores se confunden con las interacciones 3 factores y los efectos principales con las interacciones de 4 factores.

Diseños factoriales disponibles (con resolución)

Corrid	Factores														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Com	III													
8		Com	IV	III	III	III									
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Diseños de Plackett-Burman de resolución III disponibles

Factores	Corridas	Factores	Corridas	Factores	Corridas
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Imagen 26. Ventana Minitab, resolución de los diseños

Se observa que para experimentos con tres factores, realizar 8 corridas no supone la existencia de resolución alguna. De nuevo los sistemas estadísticos ofrecen estos gráficos de selección.

Por todas estas razones se decide optar por el diseño factorial completo y realizar con él la labor experimental.

7.4 Cuarta fase. Ejecución de la experimentación para el caso de estudio.

Es aquí cuando comienza la experimentación. Esta fase y el proceso experimental requieren de un procedimiento riguroso y metódico intentando reproducir los experimentos con las mismas situaciones y tratamientos para cada uno de ellos. Para esta fase se realizará una preparación y acopio previo del material o instrumentos si así lo requiere el proceso, con el objetivo de facilitar la posterior experimentación y mantener unas condiciones experimentales óptimas, rigurosas y metódicas.

Elegidos los factores, sus niveles y el diseño experimental que va a ser utilizado, se plantea el orden y combinaciones que van a realizarse.

Diseño de experimento

Factor A	Tiempo de establecimiento	Nivel 1 (-)	280
		Nivel 2 (+)	330
Factor B	Tiempo de medida	Nivel 1 (-)	60
		Nivel 2 (+)	85
Factor C	Longitud cinta de pesaje	Nivel 1 (-)	370
		Nivel 2 (+)	430

Imagen 27. Diseño experimental para el CW800

Se pueden observar los factores a experimentar. Tiempo de establecimiento nombrado factor A, tiempo de medida nombrado factor B y longitud de la cinta de pesaje llamado factor C. Todos los factores se analizan a dos niveles cumpliéndose con el diseño experimental 2^K . El primer nivel de cada factor es el nivel 1, al cual se le asocia un signo negativo (-), (se explicará más adelante el porqué del signo, en el apartado 7.5) y al segundo nivel siempre mayor que el nivel 1, se le denomina nivel 2 y se le asigna el signo positivo (+). Dicho esto, el experimento de tres factores a dos niveles consiste en el estudio de todas las posibles combinaciones e interacciones entre los niveles de los distintos factores.

Nivel Factor A	Nivel Factor B	Nivel Factor C	Respuesta Y
280	60	370	Y_{111}
330	60	370	Y_{211}
280	85	370	Y_{121}
330	85	370	Y_{221}
280	60	430	Y_{112}
330	60	430	Y_{212}
280	85	430	Y_{122}
330	85	430	Y_{222}

Tabla 6. Combinaciones de los niveles para el CW800

En la tabla se puede ver todas las combinaciones posibles entre los factores y niveles a experimentar. El orden de realización de las combinaciones es indistinto aunque en este caso se realizará de arriba abajo siguiendo el orden planteado. En el margen derecho de la tabla se observan los factores respuesta a recoger y en los subíndices los niveles de los factores cuya combinación da como resultado esa respuesta. Las unidades del factor A y B, son en milisegundos y las del factor C en milímetros. En la siguiente tabla se muestra las combinaciones de niveles a seguir.

Tres factores dos niveles

Nivel Factor A	Nivel Factor B	Nivel Factor C	Respuesta Y
1	1	1	Y_{111}
2	1	1	Y_{211}
1	2	1	Y_{121}
2	2	1	Y_{221}
1	1	2	Y_{112}
2	1	2	Y_{212}
1	2	2	Y_{122}
2	2	2	Y_{222}

Tabla 7. Combinaciones de niveles codificados para el CW800

Teniendo ya estos valores y el orden experimental a seguir, antes de comenzar con ello, se vuelve hacer hincapie en llevar a cabo un proceso metódico y riguroso.

- Se deberá calibrar la máquina antes de comenzar con cada combinación, siendo así 8 calibraciones.
- Aunque en el CW800 la posición del detector se mantiene fija asegurarse de que así se cumpla durante todo el desarrollo experimental.
- Asegurarse de que el equipo se encuentra limpio y en condiciones aptas para la realización experimental.
- Una vez seleccionado el disco de pesaje de prueba mantener las características del disco para toda la experimentación.
- Asegurarse de que el software interno del CW800 está grabando las respuestas correctamente y con precisión de mínimo dos decimales, si no es así el operario realizará las operaciones de cambio.

Las repuestas que deberán ser recogidas para su posterior estudio son 4: productividad en paquetes por minuto (paq/min), pesadas correctas, la diferencia con el 100% de pesadas correctas se repartirán entre pesadas erróneas (%) y pesadas de paquete próximo.

Dicho esto, se comienza con la experimentación y la recogida de respuestas. Hay que señalar que los datos con los que se va a trabajar a continuación no son reales. Debido a temas organizativos, DIBAL ha considerado que realizará el proceso experimental en un futuro. Como ya se ha dicho este trabajo cumple con las funciones de guía o manual para la realización del diseño experimental es por esto que, se ha considerado relevante dar un ejemplo de los procedimientos que continúan.

Debido a esta situación y con idea de ofrecer a DIBAL un ejemplo de metodología se ha realizado una simulación de valores. Estos valores se han intentado aproximar lo más posible a los esperados en la realidad a partir del estudio de registros anteriores. Indicar de nuevo que las fases que continúan se basan en valores no obtenidos experimentalmente y que no pueden ser extrapolables a la realidad, aunque sí que cumplen con la finalidad de servir de ejemplo a DIBAL.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Factor A	Factor B	Factor C	Respuesta Y			
			Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erroneos (%)	Paquetes prox.(%)
280	60	370	127	90,97 %	2,84 %	6,19 %
330	60	370	125	95,28 %	3,88 %	0,84 %
280	85	370	126	88,42 %	3,14 %	8,45 %
330	85	370	125	92,79 %	6,46 %	0,75 %
280	60	430	126	93,18 %	3,54 %	3,28 %
330	60	430	124	91,82 %	0,67 %	7,51 %
280	85	430	123	96,45 %	1,14 %	2,42 %
330	85	430	124	95,20 %	4,45 %	0,35 %

Tabla 8. Respuestas del experimento

7.5 Quinta fase. Análisis de los resultados para el caso de estudio.

Obtenidos los resultados de los experimentos es hora de realizar un análisis de los mismos. Las respuestas obtenidas y que requieren de estudio son, la productividad (paq/min), y los porcentajes de pesadas Ok (%), pesadas erróneas (%) y paquetes próximos (%). Con los datos de la fase 4 se realiza el cálculo de los efectos que tienen sobre las respuestas los factores tiempo de establecimiento, tiempo de medida y longitud de cinta y los efectos que producen sus interacciones.

Para el caso de estudio, las herramientas informáticas utilizadas para el cálculo de efectos han sido tres: Excel, Minitab y Statgraphics.



Minitab® 18

statgraphics 18®
centurion

En esta fase se realiza el cálculo de los efectos y se analizan los resultados de la acción e interacción de los factores en las respuestas. Este análisis pretende también evaluar la importancia que tienen los factores y cómo afectan a las variables de salida. Por esta razón recordar los objetivos planteados en la primera fase es importante ya que, el análisis de los resultados deberá estar enfocado a dichos fines y aportar una solución a ellos. En general los objetivos eran dos la modelización del proceso y la detección de posibles mejoras.

Esta fase 5 tiene también una fuerte relación con la fase 3. El modelo de diseño experimental elegido en la fase de planificación 3 supone la realización de los cálculos de esta fase en función a ese diseño ya que, no todos los modelos tienen el mismo procedimiento resolutivo. En este caso se ha planteado el diseño factorial completo de 3 factores a dos niveles que ofrece distintas formas de cálculo para los efectos e interacciones, como a continuación se explica.

En el caso de estudio existen 3 factores, además de estos tres efectos principales que se deben investigar, los factores interactúan entre ellos dando lugar a tres posibles combinaciones de dos factores y a una de tres, AB, AC, BC y ABC respectivamente, que al igual que los efectos principales deberán ser estudiados.

Para facilitar el estudio y realización de los cálculos los experimentos factoriales a dos niveles presentan una ventaja a la hora de codificar las combinaciones de factores y sus niveles, que simplifica la obtención de los resultados. Existen distintas codificaciones, una es atribuir al nivel 1 el valor "1" y al nivel 2 el valor "2", como se puede observar en la siguiente tabla, u otra es la codificación por signos positivos (+) para el nivel 2 y negativos (-) para el nivel 1.

Para definir los niveles de las interacciones de factores se procede de la siguiente forma. Para el caso de la codificación con "1" y "2" el nivel de la interacción quedará definido por la suma de los valores correspondientes a los factores que interactúan. De tal forma que, si la suma es par la interacción tendrá un valor de dos "2", y si la suma es impar tendrá un valor de uno "1". Para el caso de la codificación por signos el nivel de la

interacción será o positivo “+”, o negativo “-”, dependiendo de los niveles de los factores que interactúen siguiendo la regla de signos ((+) (+) = (+), (+) (-) = (-) y (-) (-) = (-)). Para este caso se ha optado por la codificación por signos, pero la elección de una u otra (ambas son igual de efectivas) queda en manos del equipo experimental.

En la siguiente tabla aparecen los factores y las interacciones del diseño experimental. Se muestran las interacciones entre factores con sus respectivos niveles asociados en función de los factores que interactúan en cada interacción, siguiendo la codificación por signos. Sin embargo los subíndices de las respuestas se han mantenido con números al resultar más práctico y legible.

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Respuesta Y
-	-	-	+	+	+	-	Y ₁₁₁
+	-	-	-	-	+	+	Y ₂₁₁
-	+	-	-	+	-	+	Y ₁₂₁
+	+	-	+	-	-	-	Y ₂₂₁
-	-	+	+	-	-	+	Y ₁₁₂
+	-	+	-	+	-	-	Y ₂₁₂
-	+	+	-	-	+	-	Y ₁₂₂
+	+	+	+	+	+	+	Y ₂₂₂

Tabla 9. Codificación experimental

El objetivo de estas codificaciones es hacer más fácil y rápido el cálculo de los efectos pudiendo realizarse manualmente en este caso. Sin embargo, esta codificación únicamente puede ser llevada a cabo en experimentos factoriales a dos niveles. En el caso de que apareciese otro o varios niveles más se necesitaría otro tipo de codificación aumentando la complejidad. Con un aumento de los factores y niveles la posibilidad de realizar los cálculos manualmente o a partir de herramientas informáticas, como Excel, es imposible y es necesario el uso de programas estadísticos especializados como Minitab o Statgraphics.

El hecho de plantear la codificación por signos permite distintas posibilidades para el cálculo de efectos. Estas opciones consisten en seguir los signos asociados a cada factor. Los signos obtenidos en cada columna de efectos o interacciones son atribuidos a las respuestas para esa fila. De tal forma que para la columna del factor A, los símbolos que tengan las respuestas no serán los mismos símbolos que tengan las respuestas para el factor B. Dicho esto, el cálculo tanto de efectos como de interacciones consistirá en el sumatorio de las respuestas en función de los símbolos de cada columna y realizar la media, en este caso con 8 combinaciones dividir entre 4.

También se puede realizar la agrupación de las respuestas con símbolo positivo y negativo y realizar su media por separado para luego restarlas. Se calcula así la diferencia de medias de las respuestas entre los dos niveles para los factores o las interacciones. Se muestra este procedimiento a continuación.

- **Efecto principal A** (se procede igual tanto para B, como C, pero teniendo en cuenta su respectiva codificación de signos)

$$E_A = \overline{Y_{A2}} - \overline{Y_{A1}} \quad \text{siendo} \quad \overline{Y_{A1}} = \frac{Y_{111} + Y_{121} + Y_{112} + Y_{122}}{4} \quad \text{y}$$

$$\overline{Y_{A2}} = \frac{Y_{211} + Y_{221} + Y_{212} + Y_{222}}{4}$$

- **Interacción entre dos factores, AB** (se procede igual tanto para BC, como AC, pero teniendo en cuenta la codificación de signos para cada interacción)

$$E_{AB} = \overline{Y_{AB2}} - \overline{Y_{AB1}} \quad \text{siendo} \quad \overline{Y_{AB1}} = \frac{Y_{211} + Y_{121} + Y_{212} + Y_{122}}{4} \quad \text{y}$$

$$\overline{Y_{AB2}} = \frac{Y_{111} + Y_{221} + Y_{112} + Y_{222}}{4}$$

- **Interacción de tres factores ABC**

$$E_{ABC} = \overline{Y_{ABC2}} - \overline{Y_{ABC1}} \quad \text{siendo} \quad \overline{Y_{ABC1}} = \frac{Y_{111} + Y_{221} + Y_{212} + Y_{122}}{4} \quad \text{y}$$

$$\overline{Y_{ABC2}} = \frac{Y_{211} + Y_{121} + Y_{112} + Y_{222}}{4}$$

La otra opción comentada es realizar el sumatorio de las respuestas en función de la codificación por signos y calcular la media del resultado.

- **Efecto principal A** (se procede igual tanto para B, como C, pero teniendo en cuenta su respectiva codificación de signos)

A	Respuesta Y
-	Y ₁₁₁
+	Y ₂₁₁
-	Y ₁₂₁
+	Y ₂₂₁
-	Y ₁₁₂
+	Y ₂₁₂
-	Y ₁₂₂
+	Y ₂₂₂

$$E_A = \frac{-Y_{111} + Y_{211} - Y_{121} + Y_{221} - Y_{112} + Y_{212} - Y_{122} + Y_{222}}{4}$$

- **Interacción entre dos factores, AB** (se procede igual tanto para BC, como AC, pero teniendo en cuenta sus signos para cada interacción)

AB	Respuesta Y
+	Y_{111}
-	Y_{211}
-	Y_{121}
+	Y_{221}
+	Y_{112}
-	Y_{212}
-	Y_{122}
+	Y_{222}

$$E_{AB} = \frac{+Y_{111} - Y_{211} - Y_{121} + Y_{221} + Y_{112} - Y_{212} - Y_{122} + Y_{222}}{4}$$

- **Interacción de tres factores ABC**

ABC	Respuesta Y
-	Y_{111}
+	Y_{211}
+	Y_{121}
-	Y_{221}
+	Y_{112}
-	Y_{212}
-	Y_{122}
+	Y_{222}

$$E_{ABC} = \frac{-Y_{111} + Y_{211} + Y_{121} - Y_{221} + Y_{112} - Y_{212} - Y_{122} + Y_{222}}{4}$$

Como se puede observar los procedimientos de cálculo para experimentos a dos niveles son muy sencillos e intuitivos gracias a la codificación por signos. A través de la simplificación de variables y niveles realizados en la fase 2 y la selección del diseño factorial completo en la fase 3 se ha podido llegar hasta estos cálculos. He aquí un claro ejemplo de la relación de dependencia entre las fases y la importancia de realizar un buen análisis previo a los cálculos pues, esto conduce a la reducción en los esfuerzos de análisis posteriores y del cálculo de los efectos.

Sin embargo los procedimientos de cálculo desarrollados para la resolución de los efectos han sido otros, basados en la relación entre los niveles de los factores y los cambios en las respuestas. Los cálculos se pueden realizar perfectamente a través de las ecuaciones arriba planteadas, pero la realización de este nuevo método supone la explicación de otro procedimiento más que puede ser usado. El método siguiente es mucho más explicativo y visual que el sistema de codificación ya que a través de éste, se puede ver una relación entre los niveles de los factores y los cambios en las respuestas.

7.5.1 Cálculo de los efectos principales.

Los efectos principales son los efectos de los factores teniendo en cuenta las interacciones entre ellos. A continuación, se explica el desarrollo de la metodología empleada.

Factor A	Factor B	Factor C	Respuesta Y
Tiempo de estab. (ms)	Tiempo de medida (ms)	Longitud cinta (mm)	Productividad (paq/min)
280	60	370	127
330	60	370	125
280	85	370	126
330	85	370	125
280	60	430	126
330	60	430	124
280	85	430	123
330	85	430	124

Tabla 10. Combinaciones experimentales

Considerando en primer lugar el tiempo de establecimiento y tomando como respuestas la columna de la productividad (se procede de la misma manera para cualquier respuesta obtenida). Se puede observar como en los dos primeros ensayos se puede verificar un cambio en la productividad pasando de 127 (paq/min) a 125 (paq/min). En este cambio no ha podido influir el tiempo de medida o la longitud de cinta pues estos factores se han mantenido constantes para los dos primeros experimentos. Por ello este cambio en la productividad, solo puede deberse al cambio en el valor del factor A (tiempo de establecimiento) y por supuesto al error experimental existente.

De esta forma se plantea la siguiente tabla para el análisis de los efectos del factor A sobre las repuestas. A través de la tabla de respuestas se deberá separar las respuestas obtenidas cuando el factor A se ensaye en nivel 1 y las respuestas cuando el factor A se ensaye en nivel 2. Así se procederá para los restantes factores y el cálculo de los efectos principales.

Cambio en el tiempo de establecimiento (Factor A) 280 ms→330 ms				
Condiciones de B y C	Nivel 1 (280mm)			
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
60 ms, 370 mm	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %
85 ms, 370 mm	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %
60 ms, 430 mm	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %
85 ms, 430 mm	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %

Condiciones de B y C	Nivel 2 (330mm)			
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
60 ms, 370 mm	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %
85 ms, 370 mm	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %
60 ms, 430 mm	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %
85 ms, 430 mm	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %

Tabla 11. Cálculo del efecto principal para A

Obtenidas las tablas es hora de calcular los efectos. Se realiza la resta por parejas entre las respuestas del nivel 2 y las respuestas del nivel 1, de forma que los valores a restar corresponden a los resultados en los que únicamente varía el nivel del factor A manteniéndose constante los valores de los otros factores. Se restan entonces por filas y columnas en orden los valores de la tabla nivel 2 a los de la tabla nivel 1.

Condiciones de B y C	Efectos (Nivel 2 - Nivel 1)			
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
60 ms, 370 mm	-2 paq/min	4,31 %	1,04 %	-5,35 %
85 ms, 370 mm	-1 paq/min	4,37 %	3,33 %	-7,70 %
60 ms, 430 mm	-2 paq/min	-1,36 %	-2,87 %	4,23 %
85 ms, 430 mm	1 paq/min	-1,25 %	3,31 %	-2,06 %

Tabla 12. Cálculo del efecto principal para A

Los efectos principales se calculan realizando la media por columna o respuestas de los efectos calculados. De tal forma que los efectos principales del factor A para las distintas respuestas son:

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto principal A	-0,95 paq/min	1,52 %	1,20 %	-2,72 %

Siguiendo los mismos procedimientos que se han seguido para el factor A se obtienen los efectos principales para los factores restantes, factor B y factor C.

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto principal B	-0,95 paq/min	0,40 %	1,07 %	-1,46 %

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto principal C	-1,55 paq/min	2,30 %	-1,63 %	-0,67 %

Tabla 13. Tablas de los efectos principales

Como se puede observar los resultados son negativos o positivos. Estos resultados deben ser interpretados. La forma de leerlos depende de la respuesta que se esté analizando. Los efectos deben ser entendidos como el cambio positivo o negativo de pasar del nivel 1 al nivel 2 del factor, siempre en este orden. Cuanto mayor sea el efecto mayor influencia negativa o positiva tendrá en esa respuesta. Por ello una variación en ese factor afectará más fuertemente a la respuesta provocando un cambio en ella.

Aquellos factores con menor efecto no tendrán tanta influencia y tanto poder de cambio en la respuesta.

- Productividad

Para el efecto sobre la productividad, los resultados en negativo indican una influencia negativa es decir, un descenso en la productividad, mientras que los resultados positivos indican un aumento. En este caso ningún factor posee un efecto positivo en la productividad por lo que provocan un descenso en los paquetes pesados por minuto.

Como es lógico si se aumentan los tiempos que el paquete tiene que estar en la célula para ser pesado (factor A y factor B), como si se aumentase la longitud de la cinta (factor C), el paquete tiene que recorrer una mayor distancia y por lo tanto tiene un mayor procesamiento en la célula que conlleva una disminución en la productividad. En general se puede extraer la siguiente conclusión, un aumento de tiempo en el procesamiento del pesaje ya sea debido al aumento del tiempo total que el paquete debe permanecer en la célula o, al aumento en la distancia que debe recorrer, reducen la productividad. Esto se cumple para los tres factores siendo el de mayor peso el factor C, longitud de cinta.

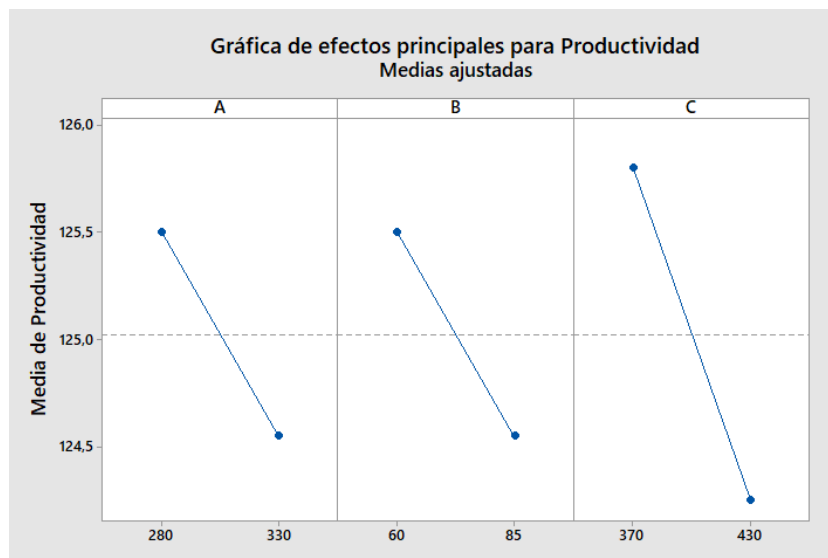


Gráfico 1. Gráfica normal de los efectos principales de la productividad

En el gráfico anterior se ve en el lado de las ordenadas la magnitud de la productividad en paq/min y en abscisas el valor de los niveles de los factores, la línea horizontal representa la media de la productividad de las 8 combinaciones testeadas

Los puntos de izquierda a derecha para cada factor denotan el valor de la productividad para el nivel 1 y seguido, el valor de la productividad para el factor a nivel 2. La diferencia entre la productividad del nivel 2 y la productividad del nivel 1 genera el valor del efecto para ese factor. Como se puede ver en el gráfico ningún factor presenta un efecto positivo.

- Pesos Ok

Para los efectos en los “pesos Ok” un valor positivo en los resultados significa un aumento en el porcentaje de pesos correctos, lo cual es positivo para el proceso y un resultado negativo, supone un descenso en el porcentaje de pesajes Ok, lo cual perjudica al proceso.

Como se puede observar todos los efectos de los factores tienen un efecto positivo en el porcentaje de pesajes correctos. Esto es debido a que un aumento en el tiempo de procesamiento de la pesada es decir, un aumento del tiempo que el paquete está en la célula es beneficioso a la hora de realizar el pesaje, aumentando el número de paquetes pesados correctamente. Se concluye por tanto que un aumento del procesamiento permite una mejor estabilización de la báscula y con ello realizar mejor los pesajes.

Para los tres factores se cumple lo dicho pero el factor C es el que mayor influencia tiene en la respuesta, seguido del factor A y por último el B. Las diferencias entre los efectos de los factores A y B se deben al mayor rango de variación en milisegundos que A tiene frente a B. El factor A varía 50 ms entre sus dos niveles mientras que B sólo 25 ms. Si se ampliase el rango de niveles de B acercándose al de A, estos factores probablemente tendrían efectos muy parecidos.

- Pesos erróneos

Los efectos que los factores tienen sobre el porcentaje de pesos erróneos puede ser también positivo o negativo. Un efecto positivo implica en este caso, una consecuencia negativa para el proceso, puesto que el efecto positivo significa un aumento en el porcentaje de pesajes erróneos realizados. Mientras que un efecto negativo, presenta una consecuencia positiva para el proceso puesto que implica una reducción de los pesajes erróneos realizados por el equipo.

En este caso el factor con un impacto positivo en el proceso es el factor C, longitud de cinta, ya que tiene un efecto negativo de -1.63 disminuyendo en ese valor el porcentaje de pesajes erróneos realizados. Los factores A y B, con valores muy semejantes, tienen una influencia negativa en el proceso a pesar de tener un efecto con signo positivo puesto que estos aumentan el porcentaje de pesajes erróneos en el equipo.

- Paquetes próximos

Al igual que para los efectos en los pesos erróneos se cumple la misma relación entre el proceso y los efectos. Es decir, un efecto con valor negativo es en este caso beneficioso para el proceso pues supone una reducción en el porcentaje de los errores por paquete próximo. Un efecto con valor positivo es sin embargo, un efecto negativo para el proceso pues supone un aumento en el porcentaje de paquetes próximos.

Para este caso todos los efectos de los factores son negativos y por ello beneficiosos para el equipo y el procesamiento. El factor con un mayor peso es el factor A, que para los niveles testeados reduce en un 2.72% el porcentaje de errores por paquetes próximos que comete el CW800, le siguen en importancia el factor B y por último el factor C.

En la parte de anexos se adjuntan el resto de gráficos y tablas, para los efectos principales.

7.5.2 Cálculo de las interacciones dobles.

Como es lógico, los factores también tienen efectos conjuntos. A través de su combinación y de la variación de sus niveles pueden tener unos efectos u otros. Por ello el estudio de las combinaciones entre factores debe ser llevado a cabo. En este apartado se realizará el estudio para las interacciones entre 2 factores.

De igual forma que se ha realizado el cálculo para los efectos principales se lleva a cabo el cálculo de las interacciones aplicando la misma lógica. El procedimiento es igual para todas las interacciones. También pueden ser usadas las ecuaciones anteriormente planteadas pero al igual que para los efectos principales, este método resulta más útil para explicar el mecanismo del diseño experimental. La interacción que se va a explicar de las tres combinaciones de dos factores posibles, es la de BC.

Los cálculos consisten en la separación de respuestas en los niveles 1 y 2 del factor que no interviene en la interacción. De esta forma los cambios en las respuestas para todos los casos en los que el factor A se mantiene en un nivel constante, ya sea 1 o 2, se deben a la interacción de los factores B y C. A partir de aquí y basándose en los signos de la codificación se hace la media para las interacciones en el nivel 1 y en el nivel 2 del factor A y se suman para calcular el efecto de la interacción.

Interacciones BC						
Nivel 1 del factor A			280 ms			
			Resultados			
B	C	BC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
-	-	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %
+	-	-	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %
-	+	-	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %
+	+	+	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %
BC (nivel 1 A)			-1,00 paq/min	2,91 %	-1,35 %	-1,56 %

Nivel 2 del factor A						
330 ms			Resultados			
B	C	BC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
-	-	+	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %
+	-	-	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %
-	+	-	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %
+	+	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %
BC (nivel 2 A)			-0,10 paq/min	2,94 %	0,59 %	-3,53 %

Tabla 14. Cálculo de las interacciones para el factor BC

Como se puede observar se ha realizado una separación por niveles en función el factor A. Para realizar el cálculo de las respuestas primero se calcula el sumatorio de las respuestas siguiendo los signos de la codificación para cada nivel de A. De esta forma se suman los valores con un signo positivo a su izquierda y se restan los que tiene signo

negativo. Y por último se dividen los sumatorios entre dos. El último paso para calcular el efecto de la interacción consiste en la suma de ambos resultados obtenidos para cada nivel y dividirlo de nuevo entre dos. Aunque también se puede realizar la media (dividir entre 4) para los resultados del sumatorio y después sumarlos directamente. Los resultados para la interacción BC y el resto de interacciones son:

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto BC	-0,55 paq/min	2,92 %	-0,38 %	-2,54 %

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto AC	0,45 paq/min	-2,82 %	-0,98 %	3,80 %

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto AB	1,05 paq/min	0,04 %	2,12 %	-2,16 %

Tabla 15. Efectos de las interacciones

Como ya se ha comentado anteriormente en el cálculo de los efectos principales los signos de cada respuesta tienen una influencia positiva o negativa en el proceso. Para el caso de las interacciones estas relaciones se mantienen. Para la productividad y el porcentaje de pesos Ok existe una relación directa entre el signo del efecto y el proceso, si tiene signo positivo será beneficioso para el proceso. Mientras que para los pesos erróneos y los paquetes próximos, tienen una relación inversa puesto que un signo negativo en el efecto implica un resultado positivo para el proceso.

Antes de comenzar con la explicación de los resultados obtenidos hay que señalar que los efectos para las interacciones de dos factores mostrados arriba en las tablas, representan el máximo efecto posible ya sea negativo o positivo, que con los niveles testeados para esos factores puede generar la interacción. Sin embargo, existen combinaciones de esos factores dentro de los niveles testeados que pueden llevar a otros efectos.

Por ejemplo, para la interacción de los niveles BC pueden existir varias combinaciones. En primer lugar manteniendo constante el nivel de C en 370 y cambiando los valores de B de 60 a 85. Se consigue un efecto totalmente distinto al que se consigue manteniendo constante B en 60 y variando C de 370 a 430. Si se observa este caso en el gráfico a continuación, se puede identificar como los efectos son distintos para las combinaciones descritas. Siendo el mayor efecto el de la combinación 85 ms y cambiando la longitud de 370 a 430.

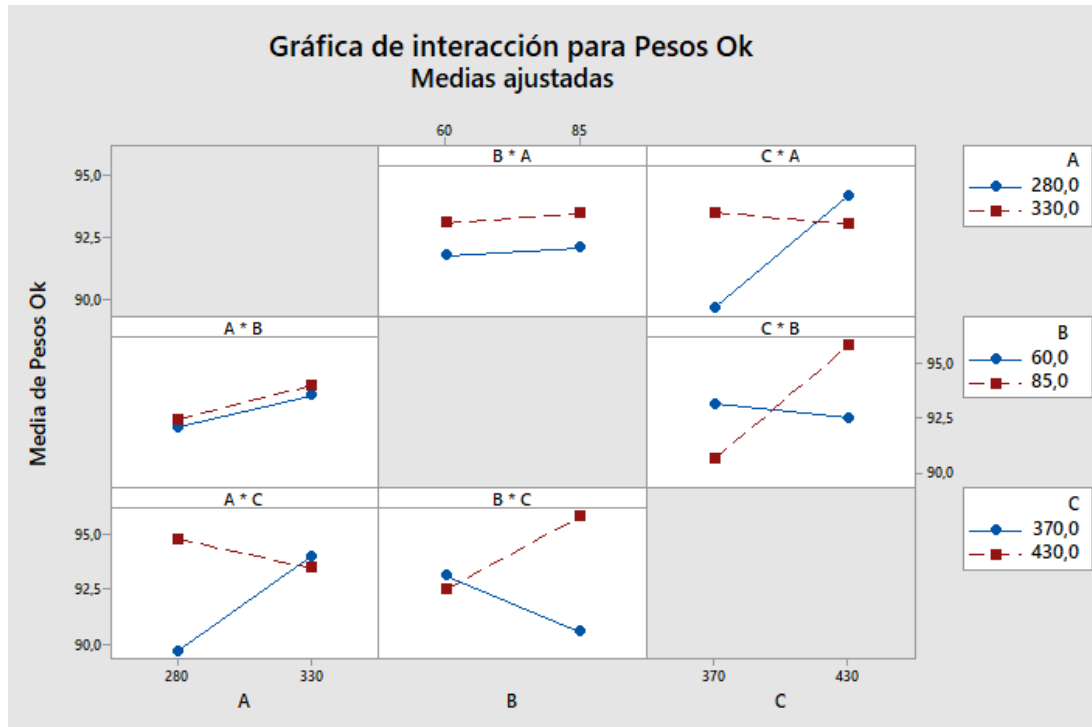


Gráfico 2. Interacciones para los pesos OK

De tal forma, como se ha comentado antes los gráficos de los efectos de las interacciones muestran el máximo valor de variación, que coincide con el efecto comentado en las tablas. Para el ejemplo anterior de la combinación 85 ms de tiempo de medida y el cambio de longitud de 370 a 430, el efecto tiene un valor aproximado de 2.92%.

Los gráficos de estudio de las interacciones tienen una mecánica de lectura similar a los de los efectos principales (se adjuntan los gráficos para las distintas respuestas estudiadas en los anexos). Se continúa ahora comentando los efectos de las tablas.

- Productividad

Para la productividad la interacción que más importancia tiene es el efecto de AB. La combinación de los factores tiempo de establecimiento A y tiempo de medida B parecen ser la mejor interacción para conseguir una buena productividad. La buena combinación de valores entre estos dos factores puede afectar de manera importante y beneficiosa a la productividad general del proceso ya que ambos, suponen el tiempo mínimo que el paquete tiene para ser procesado. Le siguen en importancia las interacciones BC con efecto negativo para el CW800 y el AC positivo.

- Pesos Ok

Dentro de los pesos Ok, se observa como dos interacciones son las que tienen un mayor peso para esta respuesta. El primero con aspecto positivo en el proceso, es la interacción de los factores BC tiempo de medida y longitud de cinta, que parecen combinarse y hacer que se consiga una mayor estabilización del paquete aumentando

el porcentaje de pesajes Ok. El siguiente más positivo para el proceso es la interacción AB. Por último, con una influencia negativa reduciendo el porcentaje de pesajes Ok, es la interacción AC tiempo de establecimiento y longitud de la cinta.

- **Pesos erróneos**

Las interacciones que más afectan al proceso son aquellas con signos positivos. La interacción de los factores AB afecta en gran medida al aumento en el porcentaje de errores de pesaje luego, una variación en los tiempos de establecimiento o de medida conlleva el empeoramiento del proceso. Le siguen con valores negativos pero de aspectos positivo para el proceso de menos a más, el efecto de BC y el de AC.

- **Paquetes próximos**

En el caso de errores por paquete próximo la interacción de los factores BC tiempo de medida y longitud de cinta, presentan signo negativo y con ello un impacto positivo en las respuestas. No muy lejos del efecto provocado por BC se encuentra la combinación AB, cuya interacción de niveles también consigue reducir los errores por paquete próximo. Por último, la interacción AC ejerce un valor poco conveniente para el proceso ya que una combinación adecuada de valores de estos factores puede generar un aumento en el porcentaje de fallos de paquete próximo.

En la parte de anexos se adjuntan el resto de gráficos y tablas, para las interacciones dobles.

7.5.3 Cálculo de la interacción triple

Al igual que cada factor tiene un efecto y que la interacción entre los factores causa cambios en las respuestas, la interacción entre los tres factores en conjunto genera también un efecto. Con el objetivo de calcular la interacción de los tres factores se puede elegir entre varios métodos operacionales. Como se ha visto anteriormente, esta interacción triple puede ser calculada a partir de las ecuaciones y operaciones generadas por la codificación de signos realizada.

En el siguiente caso se procede con el mismo planteamiento que se ha ido siguiendo hasta ahora para el cálculo de los efectos principales e interacciones dobles. El diseño experimental desarrollado se ha organizado de tal forma que para el nivel 1 y nivel 2 del factor C, se comparen la interacción de los factores A y B a esos niveles del factor C. Es decir, las combinaciones de los factores A y B son comparados entre sí.

Cálculo de la interacción de tres factores ABC

Nivel del factor C "Longitud de cinta"	AB	Resultados			
		Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Nivel 1 (-): 370mm	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %
	-	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %
	-	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %
	+	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %
	AB (nivel 1 C)	0,60 paq/min	0,03 %	1,14 %	-1,17 %

Nivel del factor C "Longitud de cinta"	AB	Resultados			
		Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Nivel 2 (+): 430mm	+	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %
	-	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %
	-	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %
	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %
	AB (nivel 2 C)	1,50 paq/min	0,06 %	3,09 %	-3,15 %

Tabla 16. Interacción triple

Como se puede observar en las tablas el procedimiento es similar al cálculo de la interacción doble de los factores A y B. Sin embargo, una vez hecho el sumatorio de las respuestas en función de los signos codificados y dividido el sumatorio de cada nivel del factor C por 2, se procede a restar los resultados del nivel 1 a los resultados del nivel 2 y dividirlo de nuevo entre 2.

	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Efecto ABC	0,45 paq/min	0,01 %	0,97 %	-0,99 %

Tabla 17. Efectos de la interacción triple

El efecto de la interacción AB del segundo nivel del factor C se resta al efecto de la interacción AB del primer nivel del factor C, "longitud de cinta". Es por ello que, las diferencias que existan entre los efectos de AB entre los distintos niveles del Factor C tienen que deberse exclusivamente al cambio de niveles de este último factor, C. De esta forma se logra determinar la interacción entre los tres factores añadiendo a las interacciones dobles del conjunto AB, los efectos producidos por C.

Una vez obtenidos los resultados de la interacción de los tres factores se pasa a su análisis. Si se comparan los efectos de los tres factores en su interacción con el valor del resto de efectos principales y de interacciones dobles, la interacción triple no tiene un peso importante en el proceso. Se sigue de nuevo la relación de signos planteada en la lectura de los efectos principales e interacciones dobles.

Para la productividad la interacción tiene un efecto positivo con un aumento en la producción de 0.45 paq/min. Para el porcentaje de pesajes Ok la interacción apenas tiene un efecto con un aumento de 0.01%, que es prácticamente nulo. En el caso de los pesos erróneos el efecto de signo positivo, tiene unas consecuencias negativas en el proceso ya que aumenta el porcentaje de pesajes erróneos en un 0.97%. Por último, en

cuanto a los errores por paquete próximo la interacción tiene un efecto positivo en el proceso, reduciendo en un 0.99% los errores por paquetes próximo.

7.5.4 Cálculo contribuciones básicas

Como se ha podido ver durante el desarrollo del experimento y más en concreto en el cálculo de los efectos de las interacciones, los factores del CW800 interactúan entre sí. Es por ello que el valor de los efectos principales se ve afectado por estas interacciones. Ante esta situación de influencia entre factores la forma de conocer el verdadero efecto de las variables controlables sin el efecto de las interacciones, es a través de las contribuciones básicas.

La forma de realizar el cálculo de las contribuciones básicas es a partir de restar al valor del efecto principal de un factor el valor de los efectos que tienen las interacciones en las que interviene. Hay que seguir un orden en estas restas. En primer lugar se resta al resto de efectos el resultado obtenido para el efecto de la interacción de grado más alto, en este caso la de tres factores. De tal forma que se obtienen los siguientes resultados:

Pesos Ok	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Restamos el valor de ABC	1,52 %	0,40 %	2,30 %	2,92 %	-2,82 %	0,04 %	0,01 %
Efecto resultante	1,51 %	0,39 %	2,29 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %	0,00 %

El siguiente paso, consiste en ir restando los efectos de las interacciones de grado menor. En este caso las interacciones de dos factores son las siguientes. El efecto de las interacciones dobles es restado a los efectos de los factores que intervienen en la interacción. Por ejemplo al efecto del factor A, se le resta el efecto de las interacciones AB y AC. Las contribuciones básicas para los efectos se encuentran rodeadas en rojo.

	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB
Restar BC a B y a C	1,51 %	-2,52 %	-0,62 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %
Restar AC a A y a C	4,34 %	-2,52 %	2,21 %			
Restar AB a A y a B	4,31 %	-2,56 %	2,21 %			

Tabla 18. Cálculo de las contribuciones básicas

Los resultados de las contribuciones básicas para los factores e interacciones quedan así:

Pesos Ok	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Efectos	1,52 %	0,40 %	2,30 %	2,92 %	-2,82 %	0,04 %	0,01 %
Contribución básica	4,31 %	-2,56 %	2,21 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %	0,01 %

Tabla 19. Contribuciones básicas pesos OK

Para este caso de cálculo de contribuciones básicas se han utilizado los datos del porcentaje de “pesos Ok” pero es el mismo procedimiento para el cálculo de las demás contribuciones.

Como se puede observar existen diferencias claras entre los efectos y las contribuciones básicas. Las diferencias son debidas a lo ya comentando, los efectos tienen en cuenta que los factores interactúan entre ellos mientras que, las contribuciones básicas cambian de valor al no considerar dichas interacciones y únicamente tener en cuenta el efecto individual del factor. Las diferencias pueden ser observadas en el gráfico a continuación.

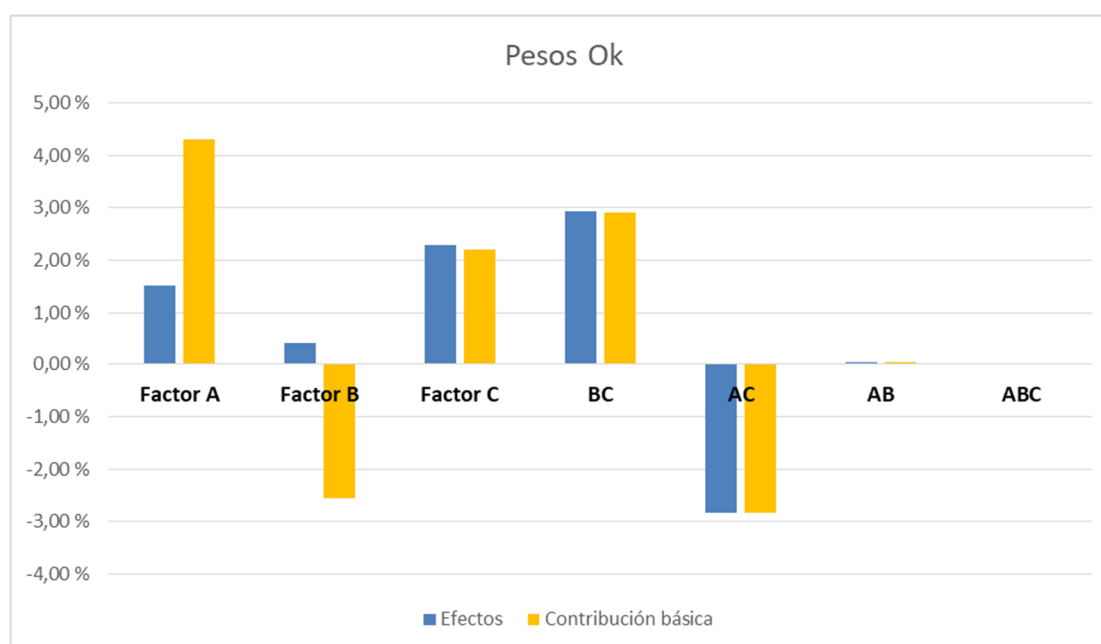


Gráfico 3. Efectos y contribuciones básicas para los pesos Ok

El cambio entre los efectos de las interacciones dobles y su contribución básica apenas cambia. El valor del efecto de la interacción triple es muy pequeño de 0.01, por lo que no ejerce un gran cambio al restárselo a los efectos de las interacciones. Sin embargo, sí que se aprecian cambios significativos entre los efectos de los factores y sus contribuciones básicas, entre otras cosas debido a que los efectos de las interacciones AC y BC son importantes.

Las diferencias entre los efectos y las contribuciones básicas de un factor o interacción dependerán del valor de los efectos de las interacciones en los que se encuentren involucrados. Por lo que si esos efectos que deben ser restados son muy elevados las diferencias serán mayores. Si por el contrario, los efectos a restar son menores las diferencias con las contribuciones básicas serán menores. De esta forma se obtiene la siguiente relación: cuanto menores sean las diferencias entre efectos y contribuciones básicas, menores serán las influencias que los factores tengan entre sí y mayor independencia entre ellos, por lo que sus interacciones tendrán menores efectos.

Sin embargo, el estudio de las contribuciones básicas cuando las interacciones tienen efectos importantes no tiene sentido y no aporta información útil sobre el proceso. Cuando los factores del proceso tienen efectos sobre las respuestas del experimento al interactuar entre sí, los efectos principales se ven influenciados por el conjunto de factores. Por lo que un estudio de las contribuciones se aleja de la realidad experimental y no aporta datos útiles y reales sobre el caso de estudio ya que, en cierto modo “idealiza” los efectos y los factores. Sí que es cierto que las contribuciones básicas aportan una visión y aspectos que con los efectos se pueden escapar y que afianzan y confirman en ocasiones, la importancia de ciertas variables en el proceso.

Para los casos de estudio, se cumple la interacción entre factores en menor o mayor grado pero lo suficiente para tener en cuenta los efectos de las interacciones. Esto conduce a que las contribuciones básicas de los resultados pueden alejarse de la realidad del proceso, resultando poco informativas y aplicables a las conclusiones finales.

Aun así y como se puede ver en el gráfico anterior, pueden servir para afianzar los efectos y la importancia que tienen determinados factores e interacciones. Pero para este caso de estudio no resulta interesante y puede llevar a error considerar las contribuciones básicas antes que los efectos. La existencia de fuertes interacciones entre los factores hace que el estudio de los efectos sea primario.

En la parte de anexos se adjuntan el resto de gráficos y tablas, para las contribuciones básicas.

7.5.5 Gráficos y tablas de decisión

Calculados los efectos y contribuciones básicas, además de haber comentado varios gráficos para los efectos principales e interacciones; existen otros gráficos y herramientas estadísticas que ayudan al entendimiento y definición del proceso. Por ello, es conveniente el estudio de otras gráficas que ofrecen distintas perspectivas de los factores, que se escapan a los anteriormente comentados. Las distintas herramientas informáticas nos ofrecen estos nuevos gráficos y tablas, que ayudan fácilmente al reconocimiento de los factores más importantes.

Las variaciones en las respuestas de los procesos, dependen de los propios cambios en el valor de los factores intervinientes. Sin embargo, existen factores cuyos cambios suponen mayores alteraciones en el proceso, pudiendo generar, ese o esos factores, la alteración por sí solos. Estos factores reciben el nombre de significativos, y su control y estandarización para un determinado valor o valores, permite la mejora del proceso y la estabilización de respuestas. Por ello es interesante, el estudio de aquellos gráficos o métodos, que proporcionan la identificación de los efectos significativos.

Los gráficos con los que se trabaja a continuación son dos, los diagramas de Pareto, y gráficos normales de los efectos. Para estos gráficos, el nivel de significación, denotado por α , está fijado en 0,05. Como se comentó en el apartado de la fase 2, “determinación

de replicaciones”, este valor de α suele ser el usado en procesos industriales, y resulta de la resta de 1 menos el nivel de confianza del análisis.

Todos estos gráficos, cumplen con el propósito de identificar más fácilmente los efectos significativos, que a simple vista puede costar identificar en las gráficas de los efectos, o al analizar directamente los valores de los efectos en las tablas. Además de demostrar también, si los efectos considerados despreciables anteriormente, lo son o no. A continuación, se explica de forma lo más sencilla y breve posible como leer e interpretar estos gráficos.

En la parte de anexos se adjuntan el resto de diagramas de Pareto y gráficas de los efectos normales.

- **Diagramas de Pareto**

El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos calculados representándolos de manera horizontal, empezando de arriba abajo por el más grande hasta el más pequeño. Si previamente no se hubiesen calculado los valores de los efectos el diagrama de Pareto los calcula y representa. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar qué efectos son estadísticamente significativos. Si el efecto cruza la línea de referencia es significativo.

Como ejemplo para el caso del diagrama de Pareto se va a estudiar el diagrama correspondiente de los paquetes próximos. Como se puede observar ningún efecto es significativo para la respuesta de errores por “paquete próximo” estando de hecho muy alejados del límite para serlo. Sin embargo, se puede apreciar de mejor forma como el efecto de la interacción AC es el que más destaca, esta interacción no llega a ser significativo en el proceso pero si el más influyente dentro de los factores estudiados. Por el contrario, el diagrama de Pareto no muestra si este efecto es positivo o negativo para el proceso para lo cual habrá que irse a las tablas del cálculo de efectos e identificar su signo.

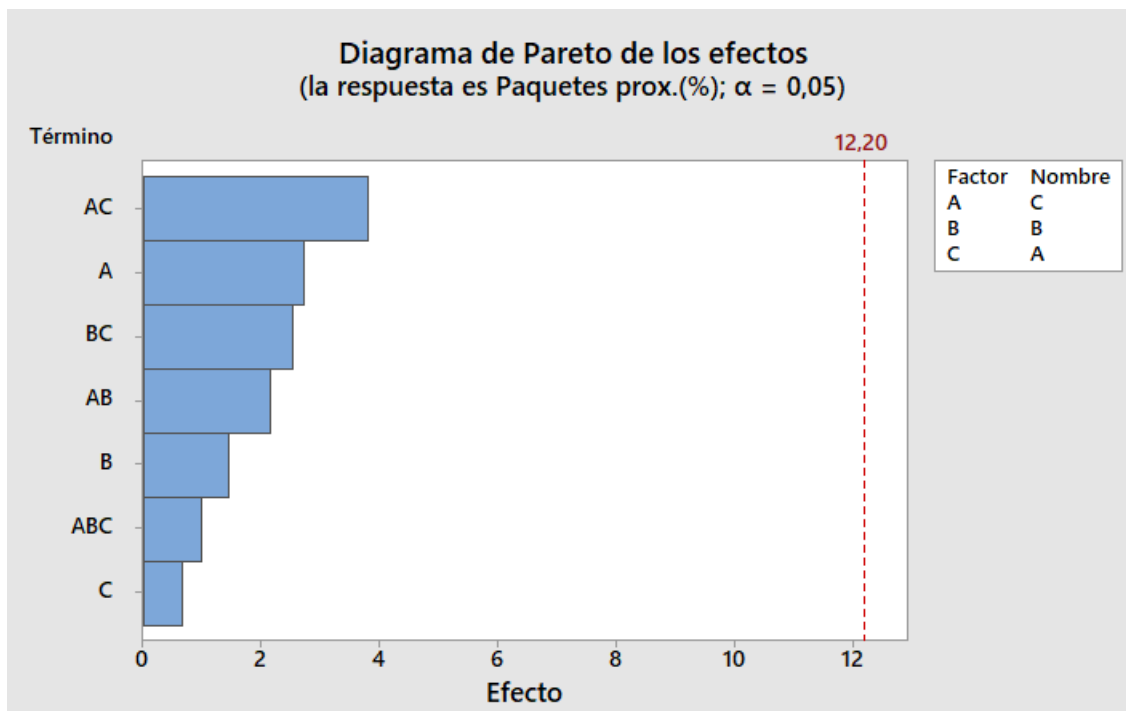


Gráfico 4. Diagrama de Pareto para paquetes próximos

- Gráfica de normales de los efectos

La gráfica de probabilidad de normales de los efectos muestra los valores de los efectos estandarizados desde el efecto más pequeño hasta el efecto más grande, de izquierda a derecha del gráfico. Se supone que el error experimental se distribuye normalmente con media 0 y en consecuencia los efectos también son variables normales. El efecto con valor medio recibe la probabilidad de 50% y se continúa distribuyendo las probabilidades proporcionalmente entre los efectos superiores y los inferiores. Se muestra el ejemplo realizado para los “pesos Ok”.

Pesos Ok	AC	ABC	AB	B	A	C	BC
Efectos	-2,82 %	0,01 %	0,04 %	0,40 %	1,52 %	2,30 %	2,92 %
i	1	2	3	4	5	6	7
Pi (%)	7,14	21,43	35,71	50	64,29	78,57	92,86

Tabla 20. Tabla para representación de la gráfica de efectos normales

A partir de estos valores se realiza la gráfica y se traza la línea que sirve como referencia a los efectos para determinar si son o no significativos. Como es lógico los efectos significativos se verán tanto en un diagrama de Pareto como en un diagrama de efectos normales. Cuanto más alejados de la línea se encuentren los efectos mayor será su importancia en el proceso. Para este caso y el resto de respuestas no hay valores significativos.

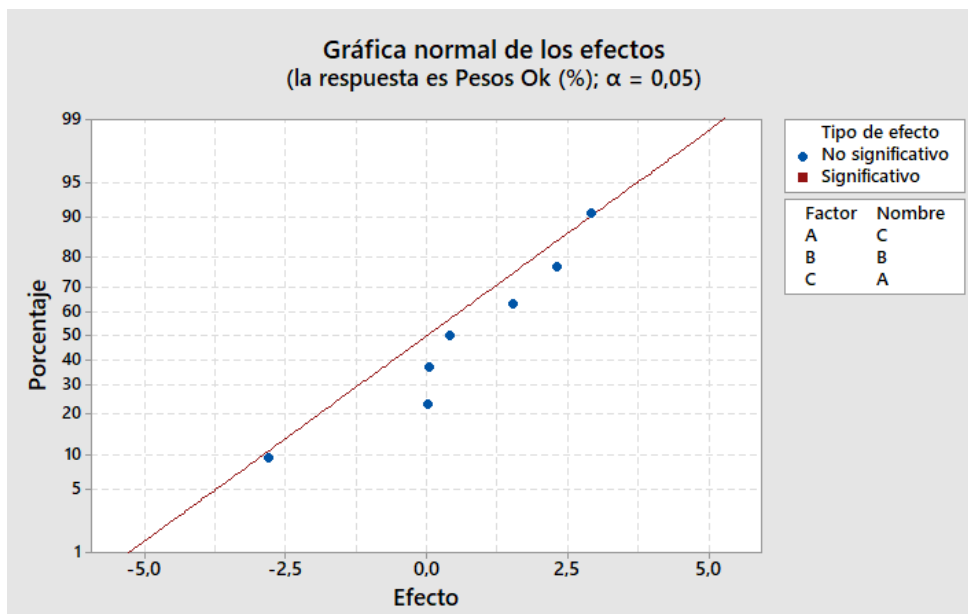


Gráfico 5. Gráfica normal de los efectos de Pesos OK

7.5.6 Modelización

La modelización cumple con la intención de conseguir predecir futuras respuestas para distintos valores de los factores, siempre que estos se encuentren dentro de los niveles testeados. Esto supone una gran ventaja a la hora de conocer cómo responderá la máquina ante ciertos parámetros. No obstante hay que tener en cuenta que la modelización tiene un grado de error por lo que, lo calculado en el modelo puede no ajustarse totalmente a la realidad aunque si se aproxime a ella.

Los modelos de regresión calculados a través del software Minitab son cuatro. Correspondientes a cada respuesta que el CW800 genera. Es decir, un modelo para la productividad, los pesos Ok, los pesos erróneos y los paquetes próximos. Los modelos de regresión siguientes son válidos para valores de tiempo de medidas entre 60 y 85 ms, tiempos de establecimiento de entre 280 a 330 ms y longitudes de cinta de 370 a 430 mm.

$$\begin{aligned} \text{Productividad (paq/min)} &= -16,54 + 0,4375 A + 2,682 B + 0,4681 C - 0,007959 A*B \\ &\quad - 0,001445 A*C - 0,008079 B*C + 0,000024 A*B*C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pesos Ok (\%)} &= -53,79 + 0,7979 A - 1,481 B + 0,3450 C - 0,000202 A*B - 0,001932 A*C \\ &\quad + 0,003688 B*C + 0,000001 A*B*C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pesos Erróneos (\%)} &= -474,6 + 1,544 A + 5,540 B + 1,356 C - 0,01736 A*B - 0,004414 A*C \\ &\quad - 0,01632 B*C + 0,000052 A*B*C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Paquetes prox (\%)} &= 628,4 - 2,342 A - 4,059 B - 1,701 C + 0,01756 A*B + 0,006346 A*C \\ &\quad + 0,01264 B*C - 0,000053 A*B*C \end{aligned}$$

Los valores que deben ser introducidos son los que se asignen a los factores A, B o C, siendo A y B en milisegundos y C en milímetros.

Todo el desarrollo ejecutado hasta ahora, las fases realizadas, el planteamiento de objetivos, el análisis de variables, la selección de modelos, etc. Han servido para llegar a la obtención de los resultados experimentales y a su análisis. La obtención de los resultados y la modelización del proceso resultan las fases más vistosas e importantes dentro del DOE, aunque hay que señalar que estos no tendrían ningún valor si las fases previas son erróneas.

7.6 Sexta fase. Mejora y experimentos de confirmación para el caso de estudio.

La correcta realización del experimento debe ser comprobada por ello se llevan a cabo repeticiones o replicaciones del experimento. El experimento debe ser llevado a cabo de nuevo en su totalidad. Por ello se vuelven a preparar todas las condiciones de los ensayos y se vuelven a recoger los resultados obtenidos.

Esta fase cumple con la función de realizar un estudio del error experimental. Las sucesivas replicaciones confirmarán si las conclusiones y efectos calculados en la fase experimental previa son correctos. De esta forma y a partir del estudio de la varianza a través de la tabla ANOVA se comprobará la hipótesis nula (las replicaciones comparten la media con el primer experimento) o la hipótesis alternativa (las replicaciones no comparten la misma media, y con ello los datos calculados anteriormente no sirven).

Para ello se realizan las replicaciones. En este caso en el que no se disponen de datos reales se han seguido realizando simulaciones de respuestas que, servirán como ejemplo para DIBAL para la realización y obtención de conclusiones cuando realicen esta fase.

Se han realizado dos replicaciones de acuerdo a las definiciones hechas para el proceso en fases previas. Estas son las respuestas estimadas:

Respuesta Y (replicación 1)			
Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erroneos (%)	Paquetes prox.(%)
126	90,85 %	2,68 %	6,47 %
125	95,30 %	3,85 %	0,85 %
126	88,60 %	3,40 %	8,00 %
125	93,00 %	6,53 %	0,47 %
126	93,14 %	3,55 %	3,31 %
124	91,92 %	0,71 %	7,37 %
124	96,46 %	1,10 %	2,44 %
123	95,20 %	4,46 %	0,34 %

Tabla 21. Replicación 1

Respuesta Y (replicación 2)			
Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erroneos (%)	Paquetes prox. (%)
127	91,03 %	2,90 %	6,07 %
126	95,30 %	3,86 %	0,84 %
126	88,53 %	3,23 %	8,24 %
125	92,69 %	6,43 %	0,88 %
126	93,19 %	3,56 %	3,25 %
124	91,79 %	0,72 %	7,49 %
124	96,40 %	1,08 %	2,52 %
124	95,18 %	4,35 %	0,47 %

Tabla 22. Replicación 2

A continuación, se procede a realizar la media de las respuestas para los tres experimentos y calcular las desviaciones que presentan. El siguiente paso es la comparación de la variabilidad de las respuestas y la aceptación de la hipótesis nula o alternativa. A continuación un ejemplo para los pesos Ok.

Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Media	Desviación esandar S^2
91,03 %	90,85 %	90,97 %	90,95 %	0,07512926
95,30 %	95,30 %	95,28 %	95,29 %	0,00821127
88,53 %	88,60 %	88,42 %	88,52 %	0,07568085
92,69 %	93,00 %	92,79 %	92,83 %	0,12918808
93,19 %	93,14 %	93,18 %	93,17 %	0,02234537
91,79 %	91,92 %	91,82 %	91,84 %	0,05533126
96,40 %	96,46 %	96,45 %	96,44 %	0,02580429
95,18 %	95,20 %	95,20 %	95,19 %	0,00959929

Tabla 23. Cálculo de las medias

Análisis de varianza de un factor PESOS OK

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
EXPERIMENTO	8	744,11	93,01375	6,7227125
REPLICACIÓN 1	8	744,470363	93,0587954	6,74914898
REPLICACIÓN 2	8	744,115728	93,014466	6,93108567

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,01065253	2	0,00532627	0,00078316	0,99921717	3,46680011
Dentro de los grupos	142,82063	21	6,80098238			
Total	142,831283	23				

Tabla 24. Análisis de las varianzas entre experimento y replicaciones

Tras realizar las tablas ANOVA para todas las respuestas, la aceptación de la hipótesis nula depende del nivel de significación que se haya establecido. Si el valor de la probabilidad calculada en la tabla ANOVA es mayor que el nivel de significación, la H_0 (hipótesis nula) se acepta. Los valores probabilísticos para la distribución F de Snedecor son mayores que los del nivel de significación α predefinido en 0.05 ($0.999 > 0.05$). Se aceptan entonces las hipótesis nulas para todas las respuestas.

En el caso de no aceptar las hipótesis nulas y aceptar la hipótesis alternativa, habrá que reformular el experimento. En fases anteriores se ha mencionado esta posibilidad de rehacer el modelo experimental. Las respuestas del experimento y sus replicaciones pueden no compartir medias por diversas consecuencias. Las más comunes se deben a errores experimentales en la medición o por variables no controlables que afectan al proceso. Otra causa es la variación de un factor que no ha sido detectado o estudiado y cuyos cambios afecten a las respuestas. Si estas situaciones se producen se deberá retroceder en las fases hasta la número 2, identificar los factores que están afectando a las respuestas y redefinir las variables controlables encontradas. Procediendo de nuevo con el experimento de la forma más controlada posible para no volver a repetir esta situación.

7.7 Séptima fase. Optimización. Elección de los niveles de trabajo

Confirmado el correcto diseño y la realización adecuada del experimento, es necesario encontrar los parámetros a los que debe trabajar el proceso y por ello se deben tener en cuenta cuantos más datos mejor. Las respuestas obtenidas en la primera realización experimental y en las sucesivas replicaciones, deben ser estudiadas para fijar dichos valores de funcionamiento.

De esta forma se vuelven a realizar los cálculos de los efectos para las respuestas medias obtenidas:

Factor A	Factor B	Factor C	Respuesta Y, MEDIA			
			Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erroneos (%)	Paquetes prox.(%)
280	60	370	127	90,95 %	2,81 %	6,24 %
330	60	370	125	95,29 %	3,86 %	0,84 %
280	85	370	126	88,52 %	3,26 %	8,23 %
330	85	370	125	92,83 %	6,47 %	0,70 %
280	60	430	126	93,17 %	3,55 %	3,28 %
330	60	430	124	91,84 %	0,70 %	7,46 %
280	85	430	124	96,44 %	1,11 %	2,46 %
330	85	430	124	95,19 %	4,42 %	0,39 %

Tabla 25. Respuestas medias

PRODUCTIVIDAD

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
-1,04 paq/min	-0,87 paq/min	-1,46 paq/min	-0,46 paq/min	0,04 paq/min	0,63 paq/min	0,37 paq/min
Efectos principales			Interacciones			

PESOS OK

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
1,52 %	0,43 %	2,26 %	2,88 %	-2,81 %	0,01 %	0,03 %
Efectos principales			Interacciones			

PESOS ERRÓNEOS

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
1,18 %	1,08 %	-1,66 %	-0,45 %	-0,95 %	2,08 %	1,00 %
Efectos principales			Interacciones			

PAQUETES PRÓXIMOS

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
-2,71 %	-1,51 %	-0,61 %	-3,46 %	3,76 %	-2,09 %	-1,03 %
Efectos principales			Interacciones			

Tabla 26. Tablas de los efectos e interacciones de los factores

La decisión de qué niveles de trabajo elegir para el proceso depende de los efectos de los factores o interacciones. En esta séptima fase una vez determinados los efectos de los factores e interacciones para cada respuesta, es necesario identificar el efecto de mayor magnitud pues éste va servir para definir los niveles de funcionamiento comentados.

Los parámetros de trabajo se establecen en función del factor o interacción con el mayor efecto. Una vez identificado el efecto mayor se deben analizar las respuestas obtenidas en función de los niveles del factor o factores (en el caso de ser una interacción) al que corresponde ese efecto. De esta forma el nivel del factor, o factores, que genere las mejores respuestas es el que deberá ser fijado para el proceso.

A continuación se procede a la obtención de los parámetros de trabajo para el CW800. En primer lugar se realiza la selección del mayor efecto para cada respuesta. Una vez elegidos el factor o interacción más importante se analiza para que niveles de ese factor se obtienen los mejores resultados experimentales. Los niveles que se seleccionan son aquellos que influyen más positivamente en el proceso.

			Y ₁	Y ₂	Y ₃	
A	B	C	Productividad (paq/min)	Productividad (paq/min)	Productividad (paq/min)	Media
-	-	-	127	126	127	127
+	-	-	126	125	125	125
-	+	-	126	126	126	126
+	+	-	125	125	125	125
-	-	+	126	126	126	126
+	-	+	124	124	124	124
-	+	+	124	124	123	124
+	+	+	124	123	124	124
Mayor EFECTO en la productividad						
Factor C						-1,46 paq/min

			Y ₁	Y ₂	Y ₃	
A	B	C	Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Media
-	-	-	91,03 %	90,85 %	90,97 %	90,95 %
+	-	-	95,30 %	95,30 %	95,28 %	95,29 %
-	+	-	88,53 %	88,60 %	88,42 %	88,52 %
+	+	-	92,69 %	93,00 %	92,79 %	92,83 %
-	-	+	93,19 %	93,14 %	93,18 %	93,17 %
+	-	+	91,79 %	91,92 %	91,82 %	91,84 %
-	+	+	96,40 %	96,46 %	96,45 %	96,44 %
+	+	+	95,18 %	95,20 %	95,20 %	95,19 %
Mayor EFECTO en los pesos OK						
Interacción BC						2,88 paq/min

			Y ₁	Y ₂	Y ₃	
A	B	C	Pesos Erroneos (%)	Pesos Erroneos (%)	Pesos Erroneos (%)	Media
-	-	-	2,90 %	2,68 %	2,84 %	2,81 %
+	-	-	3,86 %	3,85 %	3,88 %	3,86 %
-	+	-	3,23 %	3,40 %	3,14 %	3,26 %
+	+	-	6,43 %	6,53 %	6,46 %	6,47 %
-	-	+	3,56 %	3,55 %	3,54 %	3,55 %
+	-	+	0,72 %	0,71 %	0,67 %	0,70 %
-	+	+	1,08 %	1,10 %	1,14 %	1,11 %
+	+	+	4,35 %	4,46 %	4,45 %	4,42 %
Mayor EFECTO en los pesos erróneos						
Interacción AB						2,08 paq/min

			Y ₁	Y ₂	Y ₃	
			Paquetes prox.(%)	Paquetes prox.(%)	Paquetes prox.(%)	Media
A	B	C				
-	-	-	6,07 %	6,47 %	6,19 %	6,24 %
+	-	-	0,84 %	0,85 %	0,84 %	0,84 %
-	+	-	8,24 %	8,00 %	8,45 %	8,23 %
+	+	-	0,88 %	0,47 %	0,75 %	0,70 %
-	-	+	3,25 %	3,31 %	3,28 %	3,28 %
+	-	+	7,49 %	7,37 %	7,51 %	7,46 %
-	+	+	2,52 %	2,44 %	2,42 %	2,46 %
+	+	+	0,47 %	0,34 %	0,35 %	0,39 %
Mayor EFECTO en los paquetes próximos						
Interacción AC						3,76 paq/min

Tabla 27. Niveles que más afectan positivamente a las respuestas

En las tablas anteriores se han resaltado los niveles de los factores con mayor efecto para cada respuesta que generan mejores resultados.

7.8 Octava fase. Control y estandarización para el caso de estudio

Es en esta fase donde se determina que factores estandarizar y con qué valor teniendo en cuenta los resultados de la anterior fase.

En general los equipos de balanzas industriales que maneja DIBAL dependen en gran medida de las exigencias del cliente y del tipo de paquete que deseen procesar. Por ello las condiciones de trabajo están continuamente cambiando y no es fácil realizar una estandarización óptima del proceso ya que, no todos los paquetes podrán ser procesados con los mismos valores de los factores. En el caso del CW800 los tiempos de establecimiento, los tiempos de medida y la longitud de la cinta, variarán según el producto con el que tengan que trabajar.

Para aquellos procesos en los que se generan distintos tipos de respuesta (productividad, pesos Ok, pesos erróneos, etc.) con factores importantes distintos para cada una (longitud de cinta, tiempo de medida, tiempo de establecimiento, etc.) se debe proceder de la siguiente forma. En primer lugar se debe identificar aquella respuesta que al optimizarla mejore más el proceso. Una vez encontrada y tras haber realizado la fase 7, se deberán fijar los niveles de los factores que afecten y beneficien más a ese resultado.

Aludiendo al caso de estudio del CW800, la combinación de valores deberá responder a la mejor productividad y al aumento del porcentaje de pesajes correctos. Sin embargo, tras realizar los experimentos se puede ver como las diferencias entre las productividades son de 2 a 3 paquetes por minuto sin ser un cambio significativo. Por otro lado, el porcentaje de pesajes Ok sí que cambia de manera importante al experimentar con unos u otros niveles. Por lo que un control de los niveles de los factores involucrados para esta respuesta supone un cambio importante en el proceso.

Para el caso del CW800 la respuesta con un mayor impacto para mejorar el proceso es el porcentaje de pesos Ok. Tras realizar la fase 7 se ha comprobado que la interacción BC es la que tiene un mayor efecto. Se seleccionan los niveles en función de estos factores obteniéndose como resultado que para los niveles de, B 85 ms y C 430 m, se obtienen las mejores respuestas. Por ello, se debería tratar de mantener estos parámetros y variar el resto de factores menos importantes. Aunque, como ya se ha

comentado, los parámetros de trabajo cambian constantemente en los equipos de DIBAL por lo que estos factores no están exentos de cambio en un futuro.

8. CONSIDERACIONES GENERALES DEL DOE Y DEL TRABAJO

El DOE es una herramienta muy potente y extensa que engloba un amplio conjunto de conceptos estadísticos y matemáticos. Por ello, en este trabajo se ha tratado de simplificarlos y resumirlos a aquellas partes suficientes y necesarias para cubrir los requisitos de DIBAL, intentando darse todos los detalles sobre estos conceptos necesarios. En general, después de finalizar la explicación metodológica y el desarrollo del caso de estudio se considera que existen partes en las que se debe hacer especial hincapié.

Como se ha ido comentando a lo largo del proyecto DIBAL posee una gran cantidad de equipos industriales distintos. Además de todos los modelos de balanzas y componentes se añade el factor “necesidades del cliente”, que afecta al tipo de productos y parámetros con los que va a trabajar el equipo, suponiendo cambios continuos en el funcionamiento de las máquinas. Esto como es lógico, supone que el planteamiento de las fases descritas varíe en función de estos factores, dificultando en ocasiones el desarrollo de ciertas fases. Por ello, es importante que previo a la realización del DOE en cualquier equipo o equipos se conozca con certeza las necesidades del cliente. Esto permitirá establecer rápidamente un rango de valores con los que trabajar y realizar el diseño experimental.

Señalar también que todas las fases de la metodología presentan un alto grado de dependencia entre ellas es decir, se encuentran relacionadas. Por esto, es importante ser metódico a la hora de desarrollar el DOE y realizar todas las fases correctamente pues los fallos se irán arrastrando. A continuación, se presentan en función de las fases cuales son los aspectos más importantes a tener en cuenta.

- Fase 1

Durante esta primera fase se realiza la definición de objetivos y la clasificación del tipo de respuestas que genera el proceso. Los objetivos permanecen constantes siendo comunes para todos los equipos, optimización y obtención de las capacidades máximas, por lo que no añaden mayor complejidad a esta fase. Sin embargo las respuestas generadas sí que son importantes y deben ser reconocidas.

Para el caso del CW800 estas respuestas son: productividad, pesajes Ok o erróneos y paquetes próximos. Pero estas variables de salida pueden cambiar en función de la balanza o componente, por lo que es fundamental antes de seguir con las siguientes fases identificar todas las respuestas que genera el equipo. Con la finalidad de realizar un registro correcto de lo ocurrido tras la realización experimental.

- Fase 2

Aunque ya se haya dicho en la metodología y el caso de estudio, esta es probablemente una de las fases más importantes del DOE pues de ella depende la correcta realización posterior del diseño experimental. Es muy importante realizar una correcta identificación de las variables intervinientes en el proceso de cada equipo, analizando de manera exhaustiva el proceso en su conjunto y eligiendo todas las variables o factores, que sean

verdaderamente importantes para el proceso. De esta fase depende la elección del posterior diseño, el esfuerzo experimental y la confirmación de la correcta realización del experimento a partir de las replicaciones.

- **Fase 3, 4 y 5**

Para estas fases es necesario disponer de una herramienta informática que facilite estas etapas, un programa estadístico. Las tareas de selección del diseño, realización de las combinaciones experimentales y cálculo de efectos, interacciones, contribuciones, etc. Se convierten en tareas mucho más sencillas si se dispone de una herramienta de ayuda, como son los programas informáticos Minitab o Statgraphics en este caso.

Para el caso de estudio del CW800 no ha sido muy complejo realizar estas fases. Al tratarse de un experimento simple de dos niveles con tres factores se puede prescindir de un programa para la realización de estas fases. Sin embargo si el número de niveles o factores aumentase, la complejidad crece considerablemente siendo prácticamente imposible determinar el diseño a seguir y las combinaciones experimentales, además del posterior cálculo de magnitudes. Disponer de un programa asegura una mayor rapidez y exactitud reduciendo los fallos procedimentales posibles y garantizando la correcta realización de las fases indicadas.

Finalmente a parte del uso de programas en estas fases, en la etapa 4 en la que se desarrolla el experimento y que obligatoriamente debe ser realizada en el equipo, es necesario mantener el mayor control posible. Se debe establecer un procedimiento experimental que garantice unas condiciones constantes, además de proceder con la máxima rigurosidad y exactitud en la toma de resultados, pues va a ser a partir de los resultados obtenidos de donde se van a sacar las conclusiones.

- **Fase 6**

Al igual que lo comentado para la realización de la fase 4 es necesario realizar las replicaciones experimentales exactamente igual, manteniendo constantes las condiciones del experimento. De esta forma se asegura la fiabilidad del estudio de variabilidad posterior.

- **Fases 7 y 8**

El DOE puede parecer una herramienta compleja, pero es todo lo contrario. El principio fundamental de esta metodología es muy simple y lógico y consiste ni más ni menos que, en elegir los mejores resultados obtenidos y tratar de fijar los valores de los parámetros que generan esos resultados. El DOE se ayuda del cálculo de efectos principales, efectos de interacciones, contribuciones básicas, etc. para determinar para qué valores de los factores intervinientes se obtienen los mejores resultados productivos. Conocidos estos resultados se debe fijar el valor de los factores para mejorar el equipo. Estos principios y conclusiones son básicamente las que se obtienen en estas dos últimas fases, los resultados finales del DOE.

Ante la imposibilidad, debido a la variabilidad de las condiciones, de completar los objetivos de estandarización de estas últimas fases se procede con una mejora de los parámetros de trabajo. Para ello, es necesario conocer el funcionamiento del equipo de estudio en profundidad y las condiciones que el cliente necesita en él, de esta forma se debe identificar que respuestas son las de mayor importancia y que factores son los que las favorecen.

Aunque no se logre una estandarización para el modelo de balanzas testado, sí que se consigue una mejora en el equipo estudiado para las necesidades de ese cliente. Debido a esto, lo fundamental en estas fases es encontrar aquellas respuestas que más mejoren el proceso y tratar de fijar esos valores de trabajo que las generan para el proceso productivo posterior.

III. CONCLUSIONES

Antes de comenzar con la obtención de conclusiones se considera interesante realizar un breve análisis del desarrollo del trabajo. El objetivo principal de este trabajo ha sido la búsqueda de un método que permita mejorar la empresa DIBAL, S.L. Tras un proceso de investigación, en el que se debe encontrar un método que aúne las mejoras requeridas, sencillez en la implantación y flexibilidad a la hora de desarrollarlo en distintos equipos, o bajo condiciones distintas, se encuentra el método DOE. Una vez encontrado el diseño de experimentos es necesario adaptarlo a las propias necesidades de DIBAL.

Frente al elevado número de modelos de balanzas, componentes y condiciones de trabajo, es muy costoso desarrollar un proyecto de estudio para cada uno de los equipos. Se debe buscar una alternativa al estudio individualizado pero que a la vez cubra todas estas máquinas. La opción elegida es la creación de una metodología de implantación por fases que sirva como guía para desarrollar el DOE.

Tras las explicaciones teóricas del método por fases es conveniente desarrollar un caso práctico, que permita relacionar conocimientos y que sirva como base para el estudio del diseño experimental en otros equipos. El CW800 es la balanza industrial elegida para llevar a cabo el caso de estudio. El CW800 reúne las características más importantes y que comparten todas las balanzas por lo que facilitará extrapolar el desarrollo de “su DOE” al resto de equipos.

En conclusión, el desarrollo de este trabajo y, por consiguiente, el “Diseño de Experimentos”, permite a DIBAL innovar y mejorar sus equipos. La aplicación del DOE otorga un mayor conocimiento de las balanzas y sus componentes que se traduce en un aumento de calidad de las máquinas. DIBAL consigue de esta forma una herramienta para mantenerse competitivo y dentro de los líderes del sector de “aparatos de precisión, medida y control”. A partir de la herramienta del diseño de experimentos, DIBAL es capaz de distinguir los factores más importantes que intervienen en la mejora y correcto funcionamiento de sus equipos, bajo unos parámetros de trabajo. También es capaz, de conseguir los niveles de esos factores para que sean fijados o estandarizados y así mantener los estándares de funcionamiento, incluso llegando a mejorarlos, para unas necesidades productivas concretas.

Para conseguirlo uno de los principios presentes ha sido la realización de un proyecto entendible y explicativo, que sirva como guía y manual de consulta para la aplicación del DOE. Persiguiendo continuamente la elaboración de un trabajo, cuyos conceptos sean fácilmente asimilables por técnicos de DIBAL, que dispongan de una base de conocimientos básicos en estadística y matemáticas. Pudiendo estos técnicos, una vez estudiado este documento, aplicar el DOE en las balanzas industriales o componentes que se quieran evaluar.

En definitiva, este trabajo y las herramientas DOE cumplen con los objetivos de flexibilidad, rapidez y facilidad de implantación. A partir del DOE se obtienen las capacidades máximas de los equipos y es posible llevar a cabo su optimización. Por ello, el trabajo se ajusta adecuadamente a los requisitos y necesidades de DIBAL cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados al inicio del trabajo.

Además de esto, el DOE puede aportar otros beneficios asociados como pueden ser:

- Gestión de experimentos. Para testear nuevos prototipos de balanzas o cambios en modelos ya existentes.
- Facilitar la identificación de fallos en el funcionamiento de equipos, una vez se conozcan cuáles son las respuestas habituales de ese equipo.
- Personalización de las balanzas y componentes en función del cliente, suponiendo una mejor atención, mejores ofertas y garantías. El cliente puede saber antes de probar la máquina qué productividades y con qué tasas de fallos funcionará el equipo es decir, las respuestas futuras del producto que esta adquiriendo.

En cuanto a la viabilidad de la realización del DOE en los equipos, la estimación de costes del diseño de experimentos es fácil y rápido de determinar. La fase 4 es la que tiene un mayor peso tanto económico como de tiempo, el resto de fases apenas suponen tiempo y más si se dispone de un programa informático, pudiendo realizarse estas fases en apenas una hora. Para el caso del CW800 con 8 combinaciones y 300 repeticiones por combinación, se trataría de 2400 experimentos, que realizados a un ritmo de 125 rep./min se obtiene aproximadamente un tiempo estimado de trabajo de 20 minutos de experimentación. Sumado con el resto del tiempo de fases apenas llegará a las 2/3 horas de desarrollo, por lo que estos tiempos son más que asumibles por DIBAL para realizar el DOE.

La realización o no del DOE dependerá entonces de los experimentos que deben ser llevados a cabo. Dependiendo del equipo a estudiar, los niveles y factores, se plantearán un mayor o menor número de combinaciones que deberán ser experimentadas, conllevando un mayor o menor número de repeticiones. DIBAL deberá decidir si realizar o no el experimento dependiendo de los casos, y en un futuro evaluar los beneficios reales obtenidos a partir del DOE.

En resumen, el DOE es una herramienta muy interesante que pone la innovación al alcance de la mano de DIBAL y que puede aplicar para mejorar sus balanzas industriales y componentes. El “diseño de experimentos” permite alcanzar los objetivos propuestos, además de ampliarlos y no supone gastos elevados en su realización, sino que permite la reducción de gastos y la gestión de todos los experimentos que se lleven a cabo en DIBAL.

IV. REUNIONES EN DIBAL Y CRONOGRAMA DE TAREAS

Reuniones en DIBAL

Día 14/01/2019	Presentación de la empresa, estructura y producción.
Día 22/01/2019	Reunión con los responsables de ingeniería. Presentación de los equipos a estudiar, estructura y funcionamiento.
Día 12/02/2019	Reunión con los responsables de producción. Análisis de fallos comunes y problemas futuros de los equipos.
Día 13/03/2019	Reunión con los encargados de instalación eléctrica y software de los equipos. Breve explicación de los sistemas electrónicos e informáticos de los equipos.
Día 28/03/2019	Reunión con los encargados de ingeniería. Resolución de dudas y aclaraciones sobre el funcionamiento, y proceso de selección de componentes de los equipos.
Día 01/04/2019	Visita a DIBAL. Acceso a base de datos y recogida de datos.
Día 08/05/2019	Visita a DIBAL. Presentación del trabajo planteado hasta la fecha y corrección de errores.
Día 31/05/2019	Visita a DIBAL. Presentación de la memoria.

Actividad realizada	Fecha inicio	Fecha fin	15/01/2019	30/01/2019	15/02/2019	01/03/2019	15/03/2019	31/03/2019	02/04/2019	15/04/2019	30/04/2019	15/05/2019	31/05/2019	10/06/2019	22/06/2019
Introducción a DIBAL. Toma de contacto con los equipos.	15/01/2019	30/01/2019	█												
Selección de equipos. Análisis en distintos niveles, ingeniería, electrónica, software y producción.	30/01/2019	15/03/2019		█	█	█									
Recopilación de información, informes y estudios previos al trabajo.	01/03/2019	31/03/2019				█	█	█							
Planteamiento de objetivos a conseguir. Finalidad del proyecto.	31/03/2019	02/04/2019						█	█						
Fase de investigación. Estudio de herramientas posibles de mejora.	31/03/2019	15/04/2019						█	█	█					
Comienzo de estudio de herramientas DOE y aplicación al caso de estudio. Memoria.	15/04/2019	31/05/2019								█	█	█	█		
Redacción de Objetivos y Contexto del proyecto.	15/04/2019	30/04/2019								█	█				
Estudio de viabilidad del proyecto y conclusiones finales. Fin del proyecto.	31/05/2019	22/06/2019											█	█	█

V. BIBLIOGRAFÍA

Geoffrey Keppel y Thomas D. Wickens "Design and Analysis, a researcher's handbook" (1991)

Angela Dean, Daniel Voss, Daniel Draguljic, "Design and analysis of experiments", Second edition

Carmen Grafulla, Departamento de organización de empresas "Ampliación de estadística"

Douglas, C. Montgomery. "Diseño y análisis de experimentos" Segunda edición

Gorka Unzueta Aranguren, Aitor Orue Irasuegi, Aritz Esnaola Arruti, Jose Alberto Eguren Egiguren. "DESIGN OF EXPERIMENTS METHODOLOGY. CASE STUDY, LAUNCHER". DYNA 94, no. 1 (2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8687>

PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Statgraphics XVII 64 bits

Minitab 18

PAGINAS WEB

Blog calidad ISO, La calidad en los procesos de producción, <http://blogdecalidadiso.es/la-calidad-en-los-procesos-de-produccion/>, (Consultado 02/02/2018).

Mettle, Design of experiments (DOE), <https://www.mt.com/int/en/home/applications/L1>, (Consultado 02/02/2019)

MoreStream, Design of experiments, <https://www.moresteam.com/toolbox/design-of-experiments.cfm>, (consultado 03/02/2019)

DIBAL, Control y clasificación por peso, <https://www.dibal.com/es/control-y-clasificacion> (Consultado 16/03/2019)

Diseño de experimentos (DOE): Para qué sirve y cómo realizarlo, <https://www.pdcahome.com/2117/disen-de-experimentos-para-que-sirve-y-como-realizarlo/>, (Consultado 22/03/2019)

Minitab, <https://www.minitab.com/es-mx/> (Consultado 22/03/2019)

Minitab, Industria, <https://www.minitab.com/es-mx/industry/data-analysis-in-manufacturing/> (Consultado 22/03/2019)

Minitab, Diseño de experimentos, <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/> (Consultado 25/03/2019)

DIBAL, Quienes somos, <https://www.dibal.com/es/quienes-somos>, (Consultado 13/04/2019)

DIBAL, Soluciones industria, <https://www.dibal.com/es/soluciones-industriales> (Consultado 14/04/2019)

Statgraphics, <https://statgraphics.net/> (consultado 15/04/2019)

Regresión lineal múltiple

<https://www.youtube.com/watch?v=mHIYZJLIUE&list=LL7I8W2j9dzJbrYHxSHiPI6A&index=5&t=0s> (Consultado 26/04/2019)

Diseño factorial 2^k (Minitab & Design Expert)

<https://www.youtube.com/watch?v=F963GoPKwic&list=LL7I8W2j9dzJbrYHxSHiPI6A&index=8&t=471s> (Consultado 26/04/2019)

Diseño factorial completo

<https://www.youtube.com/watch?v=4dJvCIBrWEA&list=LL7I8W2j9dzJbrYHxSHiPI6A&index=9&t=585s> (Consultado 27/04/2019)

Diseños factoriales de experimentos Minitab

<https://www.youtube.com/watch?v=pVDK4qj3P0c&t=2658s> (Consultado 28/04/2019)

Design of Experiments (DOE): A Statgraphics Webinar

<https://www.youtube.com/watch?v=XUUHyftyTE> (Consultado 01/05/2019)

ANEXOS

INDICE DE TABLAS:

Tabla A- 1.Disco de 50 gramos a velocidad 5	83
Tabla A- 2.Disco de 100 gramos a velocidad 5	84
Tabla A- 3.Disco de 500 gramos a velocidad 5	85
Tabla A- 4.Disco de 1 Kilogramo a velocidad 5	86
Tabla A- 5.Disco de 2 Kilogramos a velocidad 2	87
Tabla A- 6.Disco de 2 Kilogramos a velocidad 5	88
Tabla A- 7.Disco de 2,7 Kilogramos en estático	89
Tabla A- 8.Disco de 2.7 Kilogramos a velocidad 3.....	90
Tabla A- 9.Disco de 4 Kilogramos a velocidad 2	91
Tabla A- 10.Disco de 5.4 Kilogramos a velocidad 4.....	92
Tabla A- 11.Pesajes excéntricos para discos de 1 Kilogramo a velocidad 5, con posiciones 1 y 2	94
Tabla A- 12.Resumen de medias y desviaciones de los pesajes, y desviación estándar media y del proceso	95
Tabla A- 13. Diseño experimental	97
Tabla A- 14.Tabla de niveles codificados del diseño experimental	97
Tabla A- 15.Tabla de niveles del diseño experimental.....	97
Tabla A- 16.Codificación por signos de los niveles y tabla resultante	98
Tabla A- 17.Respuestas del experimento para cada combinación de valores	98
Tabla A- 18.Efectos principales	99
Tabla A- 19.Efectos para las combinaciones de dos factores.....	100
Tabla A- 20.Efectos de la interacción de los tres factores	101
Tabla A- 21.Contribuciones básicas productividad (margen interior)	102
Tabla A- 22.Resultados finales, Productividad	102
Tabla A- 23.Cálculo de las contribuciones básicas.....	103
Tabla A- 24.Cálculo de las contribuciones básicas (Margen interior).....	104
Tabla A- 25.Resultados finales, Pesos Ok	104
Tabla A- 26.Cálculo de las contribuciones básicas.....	105
Tabla A- 27.Cálculo de las contribuciones básicas (margen interior).....	106
Tabla A- 28.Resultados finales, pesos err.	106
Tabla A- 29.Cálculo de las contribuciones básicas.....	107
Tabla A- 30.Cálculo de las contribuciones básicas (margen interior).....	108
Tabla A- 31.Resultados finales, paquetes próx.	108
Tabla A- 32.Cálculo de las contribuciones básicas.....	109
Tabla A- 33.Replicación 1 del experimento	110
Tabla A- 34.Replicación 2 del experimento	110
Tabla A- 35.Productividad de los 3 experimentos.....	111
Tabla A- 36.ANOVA Productividad.....	111
Tabla A- 37.Pesos Ok de los 3 experimentos.....	112
Tabla A- 38.ANOVA Pesos OK	112
Tabla A- 39.Pesos erróneos de los 3 experimentos	113
Tabla A- 40.ANOVA Pesos erróneos	113
Tabla A- 41.Paquetes próximos de los 3 experimentos.....	114
Tabla A- 42.ANOVA Paquetes próximos	114

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico A- 1.Representación de los errores de pesaje en cada pesada, con discos de 4 Kg a velocidad 2.....	96
Gráfico A- 2.Representación de los errores de pesaje en cada pesada, con discos de 5,4 Kg a velocidad 4.....	96
Gráfico A- 3.Representación efectos y contribuciones para la productividad.....	103
Gráfico A- 4.Representación efectos y contribuciones para los pesos Ok.....	105
Gráfico A- 5.Representación efectos y contribuciones para los pesos Ok.....	107
Gráfico A- 6.Representación efectos y contribuciones para los paquetes próximos ..	109
Gráfico A- 7.Efectos principales Productividad.....	115
Gráfico A- 8.Efectos principales Pesos Ok.....	115
Gráfico A- 9.Efectos principales Pesos erróneos.....	116
Gráfico A- 10.Efectos principales Paquetes Próximos.....	116
Gráfico A- 11. Interacciones Productividad.....	117
Gráfico A- 12.Interacciones Pesos OK.....	117
Gráfico A- 13.Interacciones Pesos erróneos.....	118
Gráfico A- 14.Interacciones Paquetes próximos.....	118
Gráfico A- 15.Gráfica normal de los efectos, productividad.....	119
Gráfico A- 16.Gráfica normal de los efectos, pesos Ok.....	119
Gráfico A- 17.Gráfica normal de los efectos, pesos erróneos.....	120
Gráfico A- 18.Gráfica normal de los efectos, paquetes próximos.....	120
Gráfico A- 19.Diagrama de Pareto, productividad.....	121
Gráfico A- 20.Diagrama de Pareto, pesos Ok.....	121
Gráfico A- 21.Diagrama de Pareto, pesos erróneos.....	122
Gráfico A- 22.Diagrama de Pareto, paquetes próximos.....	122

V. ANEXOS

1. Comprobación de pesajes de la célula.

Comprobación pesajes de la célula a distintas velocidades y con distintos pesos. Cálculo de medias y desviaciones estándar. Comprobación de criterios exigidos por norma.

Velocidad	5	Masa	50 g
------------------	----------	-------------	------

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	Kg
n			
1	50,6	0,0506	-0,0006
2	50,2	0,0502	-0,0002
3	50,6	0,0506	-0,0006
4	50,5	0,0505	-0,0005
5	50,5	0,0505	-0,0005
6	50,4	0,0504	-0,0004
7	50,0	0,0500	0,0000
8	50,9	0,0509	-0,0009
9	50,8	0,0508	-0,0008
10	50,6	0,0506	-0,0006
11	50,3	0,0503	-0,0003
12	50,2	0,0502	-0,0002
13	50,6	0,0506	-0,0006
14	50,5	0,0505	-0,0005
15	50,5	0,0505	-0,0005
16	50,4	0,0504	-0,0004
17	50,0	0,0500	0,0000
18	50,9	0,0509	-0,0009
19	50,8	0,0508	-0,0008
20	50,6	0,0506	-0,0006
21	50,3	0,0503	-0,0003
22	50,2	0,0502	-0,0002
23	50,6	0,0506	-0,0006
24	50,5	0,0505	-0,0005
25	50,5	0,0505	-0,0005
26	50,4	0,0504	-0,0004
27	50,0	0,0500	0,0000
28	50,9	0,0509	-0,0009
29	50,8	0,0508	-0,0008
30	50,6	0,0506	-0,0006
31	50,3	0,0503	-0,0003
32	50,5	0,0505	-0,0005

33	50,2	0,0502	-0,0002
34	50,2	0,0502	-0,0002
35	50,6	0,0506	-0,0006
36	50,5	0,0505	-0,0005
37	50,5	0,0505	-0,0005
38	50,4	0,0504	-0,0004
39	50,0	0,0500	0,0000
40	50,9	0,0509	-0,0009
41	50,8	0,0508	-0,0008
42	50,6	0,0506	-0,0006
43	50,3	0,0503	-0,0003
44	50,2	0,0502	-0,0002
45	50,6	0,0506	-0,0006
46	50,5	0,0505	-0,0005
47	50,5	0,0505	-0,0005
48	50,4	0,0504	-0,0004
49	50,0	0,0500	0,0000
50	50,9	0,0509	-0,0009
51	50,8	0,0508	-0,0008
52	50,6	0,0506	-0,0006
53	50,3	0,0503	-0,0003
54	50,6	0,0506	-0,0006
55	50,1	0,0501	-0,0001
56	50,3	0,0503	-0,0003
57	50,6	0,0506	-0,0006
58	50,1	0,0501	-0,0001
59	50,3	0,0503	-0,0003
60	50,3	0,0503	-0,0003

Promedio (g)	0,0505
Error medio(Kg)	-0,000460
Desviación estándar (Kg)	0,000250

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0002
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 1. Disco de 50 gramos a velocidad 5

Velocidad	5	Masa	100 g
------------------	----------	-------------	-------

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	Kg
n			
1	100,6	0,1006	-0,0006
2	100,0	0,1000	0,0000
3	101,0	0,1010	-0,0010
4	100,0	0,1000	0,0000
5	100,0	0,1000	0,0000
6	100,4	0,1004	-0,0004
7	100,4	0,1004	-0,0004
8	99,8	0,0998	0,0002
9	100,8	0,1008	-0,0008
10	99,8	0,0998	0,0002
11	100,0	0,1000	0,0000
12	100,6	0,1006	-0,0006
13	99,8	0,0998	0,0002
14	100,4	0,1004	-0,0004
15	100,6	0,1006	-0,0006
16	100,0	0,1000	0,0000
17	99,8	0,0998	0,0002
18	99,6	0,0996	0,0004
19	100,6	0,1006	-0,0006
20	100,4	0,1004	-0,0004
21	100,2	0,1002	-0,0002
22	100,0	0,1000	0,0000
23	100,6	0,1006	-0,0006
24	99,8	0,0998	0,0002
25	100,4	0,1004	-0,0004
26	99,8	0,0998	0,0002
27	100,0	0,1000	0,0000
28	100,0	0,1000	0,0000
29	101,0	0,1010	-0,0010
30	100,8	0,1008	-0,0008
31	100,6	0,1006	-0,0006
32	100,0	0,1000	0,0000

33	100,2	0,1002	-0,0002
34	100,8	0,1008	-0,0008
35	100,0	0,1000	0,0000
36	100,8	0,1008	-0,0008
37	100,2	0,1002	-0,0002
38	100,6	0,1006	-0,0006
39	100,0	0,1000	0,0000
40	100,0	0,1000	0,0000
41	100,0	0,1000	0,0000
42	102,0	0,1020	-0,0020
43	100,2	0,1002	-0,0002
44	100,4	0,1004	-0,0004
45	100,0	0,1000	0,0000
46	100,2	0,1002	-0,0002
47	100,4	0,1004	-0,0004
48	100,2	0,1002	-0,0002
49	100,2	0,1002	-0,0002
50	100,0	0,1000	0,0000
51	100,2	0,1002	-0,0002
52	100,4	0,1004	-0,0004
53	100,4	0,1004	-0,0004
54	99,8	0,0998	0,0002
55	100,6	0,1006	-0,0006
56	100,6	0,1006	-0,0006
57	100,2	0,1002	-0,0002
58	100,2	0,1002	-0,0002
59	100,2	0,1002	-0,0002
60	100,2	0,1002	-0,0002

Promedio (g)	0,1002
Error medio(Kg)	-0,000280
Desviación estándar (Kg)	0,000397

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0002
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 2.Disco de 100 gramos a velocidad 5

Velocidad	5	Masa	500 g
------------------	----------	-------------	-------

Repetición	Masa		Error
	n	g	Kg
1	500,1	0,5001	-0,0001
2	500,4	0,5004	-0,0004
3	499,8	0,4998	0,0002
4	500,2	0,5002	-0,0002
5	500,0	0,5000	0,0000
6	499,8	0,4998	0,0002
7	500,0	0,5000	0,0000
8	500,4	0,5004	-0,0004
9	500,1	0,5001	-0,0001
10	500,4	0,5004	-0,0004
11	499,8	0,4998	0,0002
12	500,2	0,5002	-0,0002
13	500,0	0,5000	0,0000
14	499,8	0,4998	0,0002
15	500,0	0,5000	0,0000
16	500,4	0,5004	-0,0004
17	500,1	0,5001	-0,0001
18	500,4	0,5004	-0,0004
19	499,8	0,4998	0,0002
20	500,2	0,5002	-0,0002
21	500,0	0,5000	0,0000
22	499,8	0,4998	0,0002
23	500,0	0,5000	0,0000
24	500,4	0,5004	-0,0004
25	500,1	0,5001	-0,0001
26	500,4	0,5004	-0,0004
27	499,8	0,4998	0,0002
28	500,2	0,5002	-0,0002
29	500,0	0,5000	0,0000
30	499,8	0,4998	0,0002
31	500,0	0,5000	0,0000
32	500,4	0,5004	-0,0004

33	500,1	0,5001	-0,0001
34	500,4	0,5004	-0,0004
35	499,8	0,4998	0,0002
36	500,2	0,5002	-0,0002
37	500,0	0,5000	0,0000
38	499,8	0,4998	0,0002
39	500,0	0,5000	0,0000
40	499,4	0,4994	0,0006
41	500,1	0,5001	-0,0001
42	500,4	0,5004	-0,0004
43	499,8	0,4998	0,0002
44	500,2	0,5002	-0,0002
45	500,0	0,5000	0,0000
46	499,8	0,4998	0,0002
47	500,0	0,5000	0,0000
48	499,4	0,4994	0,0006
49	500,1	0,5001	-0,0001
50	500,4	0,5004	-0,0004
51	499,8	0,4998	0,0002
52	500,2	0,5002	-0,0002
53	500,0	0,5000	0,0000
54	499,8	0,4998	0,0002
55	500,0	0,5000	0,0000
56	499,4	0,4994	0,0006
57	500,0	0,5000	0,0000
58	499,8	0,4998	0,0002
59	500,0	0,5000	0,0000
60	499,4	0,4994	0,0006

Promedio (g)	0,5001
Error medio(Kg)	-0,000018
Desviación estándar (Kg)	0,000262

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0008
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 3.Disco de 500 gramos a velocidad 5

Velocidad	5	Masa	1 Kg
------------------	----------	-------------	------

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	Kg
n			
1	1000,6	1,0006	-0,0006
2	1000,8	1,0008	-0,0008
3	1000,4	1,0004	-0,0004
4	1000,6	1,0006	-0,0006
5	1000,4	1,0004	-0,0004
6	1000,6	1,0006	-0,0006
7	1000,2	1,0002	-0,0002
8	1000,0	1,0000	0,0000
9	1000,4	1,0004	-0,0004
10	999,6	0,9996	0,0004
11	1001,2	1,0012	-0,0012
12	999,6	0,9996	0,0004
13	999,8	0,9998	0,0002
14	1000,8	1,0008	-0,0008
15	1000,6	1,0006	-0,0006
16	1000,0	1,0000	0,0000
17	999,8	0,9998	0,0002
18	1000,6	1,0006	-0,0006
19	1001,0	1,0010	-0,0010
20	1000,4	1,0004	-0,0004
21	999,8	0,9998	0,0002
22	1000,0	1,0000	0,0000
23	1000,4	1,0004	-0,0004
24	1000,2	1,0002	-0,0002
25	1000,4	1,0004	-0,0004
26	1000,6	1,0006	-0,0006
27	1001,0	1,0010	-0,0010
28	1000,2	1,0002	-0,0002
29	1001,2	1,0012	-0,0012
30	1000,0	1,0000	0,0000
31	1000,8	1,0008	-0,0008
32	1000,0	1,0000	0,0000

33	1000,4	1,0004	-0,0004
34	999,6	0,9996	0,0004
35	1000,0	1,0000	0,0000
36	999,2	0,9992	0,0008
37	999,8	0,9998	0,0002
38	1000,0	1,0000	0,0000
39	999,6	0,9996	0,0004
40	1000,4	1,0004	-0,0004
41	1000,0	1,0000	0,0000
42	1000,8	1,0008	-0,0008
43	1000,0	1,0000	0,0000
44	1000,2	1,0002	-0,0002
45	1000,8	1,0008	-0,0008
46	999,2	0,9992	0,0008
47	1000,2	1,0002	-0,0002
48	1000,8	1,0008	-0,0008
49	1000,4	1,0004	-0,0004
50	999,4	0,9994	0,0006
51	1000,0	1,0000	0,0000
52	1000,2	1,0002	-0,0002
53	999,6	0,9996	0,0004
54	1000,2	1,0002	-0,0002
55	1001,0	1,0010	-0,0010
56	999,8	0,9998	0,0002
57	999,6	0,9996	0,0004
58	999,8	0,9998	0,0002
59	1000,4	1,0004	-0,0004
60	1000,8	1,0008	-0,0008

Promedio (g)	1,0004
Error medio(Kg)	-0,000237
Desviación estándar (Kg)	0,000481

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0008
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 4. Disco de 1 Kilogramo a velocidad 5

Velocidad	2	Masa	2 Kg
------------------	----------	-------------	------

Repetición	Masa		Error
	n	g	Kg
1	1999,6	1,9996	0,0004
2	1999,3	1,9993	0,0007
3	1998,9	1,9989	0,0011
4	1999,5	1,9995	0,0005
5	1999,7	1,9997	0,0003
6	2000,2	2,0002	-0,0002
7	2000,0	2,0000	0,0000
8	2000,0	2,0000	0,0000
9	1999,6	1,9996	0,0004
10	1999,3	1,9993	0,0007
11	1998,9	1,9989	0,0011
12	1999,5	1,9995	0,0005
13	1999,7	1,9997	0,0003
14	2000,2	2,0002	-0,0002
15	2000,0	2,0000	0,0000
16	2000,0	2,0000	0,0000
17	1999,6	1,9996	0,0004
18	1999,3	1,9993	0,0007
19	1998,9	1,9989	0,0011
20	1999,5	1,9995	0,0005
21	1999,7	1,9997	0,0003
22	2000,2	2,0002	-0,0002
23	2000,0	2,0000	0,0000
24	2000,0	2,0000	0,0000
25	1999,6	1,9996	0,0004
26	1999,3	1,9993	0,0007
27	1998,9	1,9989	0,0011
28	1999,5	1,9995	0,0005
29	1999,7	1,9997	0,0003
30	2000,2	2,0002	-0,0002
31	2000,0	2,0000	0,0000
32	2000,0	2,0000	0,0000

33	1999,6	1,9996	0,0004
34	1999,3	1,9993	0,0007
35	1998,9	1,9989	0,0011
36	1999,5	1,9995	0,0005
37	1999,7	1,9997	0,0003
38	2000,2	2,0002	-0,0002
39	2000,0	2,0000	0,0000
40	2000,0	2,0000	0,0000
41	1999,6	1,9996	0,0004
42	1999,3	1,9993	0,0007
43	1998,9	1,9989	0,0011
44	1999,5	1,9995	0,0005
45	1999,7	1,9997	0,0003
46	2000,2	2,0002	-0,0002
47	2000,0	2,0000	0,0000
48	2000,0	2,0000	0,0000
49	1999,6	1,9996	0,0004
50	1999,3	1,9993	0,0007
51	1998,9	1,9989	0,0011
52	1999,5	1,9995	0,0005
53	1999,7	1,9997	0,0003
54	2000,2	2,0002	-0,0002
55	2000,0	2,0000	0,0000
56	2000,0	2,0000	0,0000
57	1999,7	1,9997	0,0003
58	2000,2	2,0002	-0,0002
59	2000,0	2,0000	0,0000
60	2000,0	2,0000	0,0000

Promedio (g)	1,9997
Error medio(Kg)	0,000328
Desviación estándar (Kg)	0,000395

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0016
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 5.Disco de 2 Kilogramos a velocidad 2

Velocidad	5	Masa	2 Kg
------------------	----------	-------------	------

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	
n	g	Kg	Kg
1	2001,6	2,0016	-0,0016
2	2001,0	2,0010	-0,0010
3	1999,8	1,9998	0,0002
4	2000,2	2,0002	-0,0002
5	1999,0	1,9990	0,0010
6	1999,8	1,9998	0,0002
7	1999,4	1,9994	0,0006
8	2000,8	2,0008	-0,0008
9	1999,2	1,9992	0,0008
10	2000,4	2,0004	-0,0004
11	1999,6	1,9996	0,0004
12	1999,6	1,9996	0,0004
13	2000,0	2,0000	0,0000
14	1999,6	1,9996	0,0004
15	2000,4	2,0004	-0,0004
16	1999,8	1,9998	0,0002
17	2000,4	2,0004	-0,0004
18	1999,8	1,9998	0,0002
19	2000,2	2,0002	-0,0002
20	2000,2	2,0002	-0,0002
21	1999,2	1,9992	0,0008
22	2000,6	2,0006	-0,0006
23	2000,2	2,0002	-0,0002
24	1999,4	1,9994	0,0006
25	2000,0	2,0000	0,0000
26	2001,2	2,0012	-0,0012
27	1999,6	1,9996	0,0004
28	2000,0	2,0000	0,0000
29	1999,4	1,9994	0,0006
30	2000,4	2,0004	-0,0004
31	1999,6	1,9996	0,0004
32	2000,8	2,0008	-0,0008

33	2001,0	2,0010	-0,0010
34	2000,8	2,0008	-0,0008
35	1999,8	1,9998	0,0002
36	1999,8	1,9998	0,0002
37	1999,8	1,9998	0,0002
38	1999,8	1,9998	0,0002
39	1999,8	1,9998	0,0002
40	2000,6	2,0006	-0,0006
41	2000,8	2,0008	-0,0008
42	2000,0	2,0000	0,0000
43	2000,4	2,0004	-0,0004
44	2000,4	2,0004	-0,0004
45	2000,6	2,0006	-0,0006
46	2000,6	2,0006	-0,0006
47	2000,6	2,0006	-0,0006
48	2001,0	2,0010	-0,0010
49	2000,2	2,0002	-0,0002
50	2000,4	2,0004	-0,0004
51	2000,0	2,0000	0,0000
52	2000,2	2,0002	-0,0002
53	2000,2	2,0002	-0,0002
54	2000,2	2,0002	-0,0002
55	2000,4	2,0004	-0,0004
56	2000,0	2,0000	0,0000
57	2000,8	2,0008	-0,0008
58	1999,6	1,9996	0,0004
59	2000,4	2,0004	-0,0004
60	2000,6	2,0006	-0,0006

Promedio (g)	2,0000
Error medio(Kg)	-0,000167
Desviación estándar (Kg)	0,000534

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0016
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 6. Disco de 2 Kilogramos a velocidad 5

Velocidad	0	Masa	2,7 Kg
------------------	---	-------------	--------

Repetición	Masa		Error
	n	g	Kg
1	2699,1	2,6991	0,0009
2	2698,9	2,6989	0,0011
3	2699,5	2,6995	0,0005
4	2699,4	2,6994	0,0006
5	2700,0	2,7000	0,0000
6	2698,8	2,6988	0,0012
7	2699,5	2,6995	0,0005
8	2699,4	2,6994	0,0006
9	2699,1	2,6991	0,0009
10	2698,9	2,6989	0,0011
11	2699,5	2,6995	0,0005
12	2699,4	2,6994	0,0006
13	2700,0	2,7000	0,0000
14	2698,8	2,6988	0,0012
15	2699,5	2,6995	0,0005
16	2699,4	2,6994	0,0006
17	2699,1	2,6991	0,0009
18	2698,9	2,6989	0,0011
19	2699,5	2,6995	0,0005
20	2699,4	2,6994	0,0006
21	2700,0	2,7000	0,0000
22	2698,8	2,6988	0,0012
23	2699,5	2,6995	0,0005
24	2699,4	2,6994	0,0006
25	2699,1	2,6991	0,0009
26	2698,9	2,6989	0,0011
27	2699,5	2,6995	0,0005
28	2699,4	2,6994	0,0006
29	2700,0	2,7000	0,0000
30	2698,8	2,6988	0,0012
31	2699,5	2,6995	0,0005
32	2699,4	2,6994	0,0006

33	2699,1	2,6991	0,0009
34	2698,9	2,6989	0,0011
35	2699,5	2,6995	0,0005
36	2699,4	2,6994	0,0006
37	2700,0	2,7000	0,0000
38	2698,8	2,6988	0,0012
39	2699,5	2,6995	0,0005
40	2699,4	2,6994	0,0006
41	2699,1	2,6991	0,0009
42	2698,9	2,6989	0,0011
43	2699,5	2,6995	0,0005
44	2699,4	2,6994	0,0006
45	2700,0	2,7000	0,0000
46	2698,8	2,6988	0,0012
47	2699,5	2,6995	0,0005
48	2699,4	2,6994	0,0006
49	2699,1	2,6991	0,0009
50	2698,9	2,6989	0,0011
51	2699,5	2,6995	0,0005
52	2699,4	2,6994	0,0006
53	2700,0	2,7000	0,0000
54	2698,8	2,6988	0,0012
55	2699,5	2,6995	0,0005
56	2699,4	2,6994	0,0006
57	2700,0	2,7000	0,0000
58	2698,8	2,6988	0,0012
59	2699,5	2,6995	0,0005
60	2699,4	2,6994	0,0006

Promedio (g)	2,6993
Error medio(Kg)	0,000668
Desviación estándar (Kg)	0,000365

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0022
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 7. Disco de 2,7 Kilogramos en estático

Velocidad	3	Masa	2,7 Kg
------------------	----------	-------------	--------

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	
n	g	Kg	Kg
1	2701,0	2,7010	-0,0010
2	2699,9	2,6999	0,0001
3	2699,8	2,6998	0,0002
4	2699,1	2,6991	0,0009
5	2701,0	2,7010	-0,0010
6	2699,4	2,6994	0,0006
7	2698,9	2,6989	0,0011
8	2700,3	2,7003	-0,0003
9	2699,2	2,6992	0,0008
10	2700,7	2,7007	-0,0007
11	2698,9	2,6989	0,0011
12	2699,5	2,6995	0,0005
13	2699,2	2,6992	0,0008
14	2700,1	2,7001	-0,0001
15	2700,8	2,7008	-0,0008
16	2701,4	2,7014	-0,0014
17	2700,4	2,7004	-0,0004
18	2700,6	2,7006	-0,0006
19	2700,6	2,7006	-0,0006
20	2699,2	2,6992	0,0008
21	2699,1	2,6991	0,0009
22	2699,3	2,6993	0,0007
23	2699,4	2,6994	0,0006
24	2699,8	2,6998	0,0002
25	2700,2	2,7002	-0,0002
26	2701,5	2,7015	-0,0015
27	2700,4	2,7004	-0,0004
28	2699,0	2,6990	0,0010
29	2700,4	2,7004	-0,0004
30	2699,5	2,6995	0,0005
31	2699,6	2,6996	0,0004
32	2700,2	2,7002	-0,0002

33	2699,5	2,6995	0,0005
34	2700,1	2,7001	-0,0001
35	2700,2	2,7002	-0,0002
36	2701,1	2,7011	-0,0011
37	2700,2	2,7002	-0,0002
38	2699,9	2,6999	0,0001
39	2700,6	2,7006	-0,0006
40	2700,6	2,7006	-0,0006
41	2700,6	2,7006	-0,0006
42	2700,3	2,7003	-0,0003
43	2699,6	2,6996	0,0004
44	2699,5	2,6995	0,0005
45	2700,1	2,7001	-0,0001
46	2700,2	2,7002	-0,0002
47	2699,7	2,6997	0,0003
48	2700,9	2,7009	-0,0009
49	2700,1	2,7001	-0,0001
50	2699,6	2,6996	0,0004
51	2699,9	2,6999	0,0001
52	2700,0	2,7000	0,0000
53	2699,7	2,6997	0,0003
54	2699,8	2,6998	0,0002
55	2700,4	2,7004	-0,0004
56	2700,8	2,7008	-0,0008
57	2699,5	2,6995	0,0005
58	2700,9	2,7009	-0,0009
59	2698,7	2,6987	0,0013
60	2700,5	2,7005	-0,0005

Promedio (g)	2,6999
Error medio(Kg)	-0,000016
Desviación estándar (Kg)	0,000652

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0022
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 8. Disco de 2.7 Kilogramos a velocidad 3

Velocidad	2	Masa	4 Kg
------------------	----------	-------------	------

Repetición	Masa		Error
	n	g	Kg
1	3998,4	3,9984	0,0016
2	3999,2	3,9992	0,0008
3	3998,0	3,9980	0,0020
4	3998,2	3,9982	0,0018
5	3999,8	3,9998	0,0002
6	3999,6	3,9996	0,0004
7	3998,0	3,9980	0,0020
8	3998,8	3,9988	0,0012
9	3998,8	3,9988	0,0012
10	3998,4	3,9984	0,0016
11	3998,6	3,9986	0,0014
12	3998,2	3,9982	0,0018
13	3998,6	3,9986	0,0014
14	3999,2	3,9992	0,0008
15	3998,4	3,9984	0,0016
16	3999,2	3,9992	0,0008
17	3998,8	3,9988	0,0012
18	3999,2	3,9992	0,0008
19	3998,2	3,9982	0,0018
20	3998,8	3,9988	0,0012
21	3998,6	3,9986	0,0014
22	3998,8	3,9988	0,0012
23	3999,4	3,9994	0,0006
24	3998,0	3,9980	0,0020
25	3998,2	3,9982	0,0018
26	3998,4	3,9984	0,0016
27	3998,8	3,9988	0,0012
28	3998,6	3,9986	0,0014
29	3998,6	3,9986	0,0014
30	3998,4	3,9984	0,0016
31	3998,6	3,9986	0,0014
32	4000,2	4,0002	-0,0002

33	3998,8	3,9988	0,0012
34	3998,6	3,9986	0,0014
35	3999,0	3,9990	0,0010
36	3999,4	3,9994	0,0006
37	3999,6	3,9996	0,0004
38	3998,4	3,9984	0,0016
39	3999,6	3,9996	0,0004
40	3998,4	3,9984	0,0016
41	3998,8	3,9988	0,0012
42	3999,4	3,9994	0,0006
43	3998,8	3,9988	0,0012
44	3998,8	3,9988	0,0012
45	3998,2	3,9982	0,0018
46	3999,0	3,9990	0,0010
47	3998,4	3,9984	0,0016
48	3998,4	3,9984	0,0016
49	3999,2	3,9992	0,0008
50	3998,6	3,9986	0,0014
51	3998,2	3,9982	0,0018
52	3998,6	3,9986	0,0014
53	3998,6	3,9986	0,0014
54	3998,2	3,9982	0,0018
55	3998,8	3,9988	0,0012
56	3998,0	3,9980	0,0020
57	3999,8	3,9998	0,0002
58	3998,4	3,9984	0,0016
59	3999,4	3,9994	0,0006
60	3999,8	3,9998	0,0002

Promedio (g)	3,9987
Error medio(Kg)	0,001230
Desviación estándar (Kg)	0,000520

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0032
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,002
	0,002

Tabla A- 9. Disco de 4 Kilogramos a velocidad 2

Velocidad	4	Masa	5,4 Kg
------------------	----------	-------------	--------

Repetición	Masa		Error
	n	g	Kg
1	5399,4	5,3994	0,0006
2	5399,4	5,3994	0,0006
3	5399,4	5,3994	0,0006
4	5399,2	5,3992	0,0008
5	5399,6	5,3996	0,0004
6	5399,8	5,3998	0,0002
7	5399,6	5,3996	0,0004
8	5400,0	5,4000	0,0000
9	5399,4	5,3994	0,0006
10	5399,2	5,3992	0,0008
11	5400,4	5,4004	-0,0004
12	5399,8	5,3998	0,0002
13	5398,4	5,3984	0,0016
14	5399,4	5,3994	0,0006
15	5400,4	5,4004	-0,0004
16	5400,0	5,4000	0,0000
17	5399,0	5,3990	0,0010
18	5398,8	5,3988	0,0012
19	5400,2	5,4002	-0,0002
20	5399,8	5,3998	0,0002
21	5400,4	5,4004	-0,0004
22	5399,6	5,3996	0,0004
23	5399,6	5,3996	0,0004
24	5400,0	5,4000	0,0000
25	5399,2	5,3992	0,0008
26	5399,4	5,3994	0,0006
27	5400,2	5,4002	-0,0002
28	5400,0	5,4000	0,0000
29	5399,8	5,3998	0,0002
30	5399,0	5,3990	0,0010
31	5400,4	5,4004	-0,0004
32	5400,2	5,4002	-0,0002

33	5399,8	5,3998	0,0002
34	5400,0	5,4000	0,0000
35	5398,8	5,3988	0,0012
36	5398,6	5,3986	0,0014
37	5401,2	5,4012	-0,0012
38	5399,8	5,3998	0,0002
39	5400,0	5,4000	0,0000
40	5400,4	5,4004	-0,0004
41	5398,8	5,3988	0,0012
42	5399,4	5,3994	0,0006
43	5399,4	5,3994	0,0006
44	5398,6	5,3986	0,0014
45	5399,2	5,3992	0,0008
46	5399,4	5,3994	0,0006
47	5399,4	5,3994	0,0006
48	5399,8	5,3998	0,0002
49	5399,6	5,3996	0,0004
50	5399,2	5,3992	0,0008
51	5399,2	5,3992	0,0008
52	5400,2	5,4002	-0,0002
53	5400,0	5,4000	0,0000
54	5399,0	5,3990	0,0010
55	5399,2	5,3992	0,0008
56	5399,0	5,3990	0,0010
57	5400,2	5,4002	-0,0002
58	5399,6	5,3996	0,0004
59	5400,0	5,4000	0,0000
60	5400,2	5,4002	-0,0002

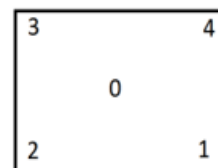
Promedio (g)	5,3997
Error medio(Kg)	0,000383
Desviación estándar (Kg)	0,000544

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0043
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,003
	0,003

Tabla A- 10.Disco de 5.4 Kilogramos a velocidad 4

1.1. Pesajes excéntricos

Distintas posiciones del paquete dentro de la célula de pesaje



Velocidad	5	Masa	1 Kg
------------------	---	-------------	------

Posición	1
-----------------	---

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	Kg
n			
1	1000,3	1,0003	-0,0003
2	1000,3	1,0003	-0,0003
3	1000,6	1,0006	-0,0006
4	1000,5	1,0005	-0,0005
5	1000,4	1,0004	-0,0004
6	1000,0	1,0000	0,0000
7	1000,2	1,0002	-0,0002
8	1000,2	1,0002	-0,0002
9	1000,6	1,0006	-0,0006
10	1000,4	1,0004	-0,0004
11	1000,3	1,0003	-0,0003
12	1000,3	1,0003	-0,0003
13	1000,6	1,0006	-0,0006
14	1000,5	1,0005	-0,0005
15	1000,4	1,0004	-0,0004
16	1000,0	1,0000	0,0000
17	1000,2	1,0002	-0,0002
18	1000,2	1,0002	-0,0002
19	1000,6	1,0006	-0,0006
20	1000,4	1,0004	-0,0004
21	1000,3	1,0003	-0,0003
22	1000,3	1,0003	-0,0003
23	1000,6	1,0006	-0,0006
24	1000,5	1,0005	-0,0005
25	1000,4	1,0004	-0,0004
26	1000,0	1,0000	0,0000
27	1000,2	1,0002	-0,0002
28	1000,2	1,0002	-0,0002
29	1000,6	1,0006	-0,0006
30	1000,4	1,0004	-0,0004
31	1000,6	1,0006	-0,0006
32	1000,6	1,0006	-0,0006

33	1000,3	1,0003	-0,0003
34	1000,3	1,0003	-0,0003
35	1000,6	1,0006	-0,0006
36	1000,5	1,0005	-0,0005
37	1000,4	1,0004	-0,0004
38	1000,0	1,0000	0,0000
39	1000,2	1,0002	-0,0002
40	1000,2	1,0002	-0,0002
41	1000,6	1,0006	-0,0006
42	1000,4	1,0004	-0,0004
43	1000,3	1,0003	-0,0003
44	1000,3	1,0003	-0,0003
45	1000,6	1,0006	-0,0006
46	1000,5	1,0005	-0,0005
47	1000,4	1,0004	-0,0004
48	1000,0	1,0000	0,0000
49	1000,2	1,0002	-0,0002
50	1000,2	1,0002	-0,0002
51	1000,6	1,0006	-0,0006
52	1000,4	1,0004	-0,0004
53	1000,3	1,0003	-0,0003
54	1000,3	1,0003	-0,0003
55	1000,6	1,0006	-0,0006
56	1000,5	1,0005	-0,0005
57	1000,4	1,0004	-0,0004
58	1000,0	1,0000	0,0000
59	1000,2	1,0002	-0,0002
60	1000,2	1,0002	-0,0002

Promedio (g)	1,0004
Error medio(Kg)	-0,0004
Desviación estándar (Kg)	0,000183

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0008
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Posición	2
-----------------	---

Repetición	Masa		Error
	g	Kg	
n	g	Kg	Kg
1	1000,3	1,0003	-0,0003
2	1000,3	1,0003	-0,0003
3	1000,6	1,0006	-0,0006
4	1000,5	1,0005	-0,0005
5	1000,4	1,0004	-0,0004
6	1000,0	1,0000	0,0000
7	1000,2	1,0002	-0,0002
8	1000,2	1,0002	-0,0002
9	1000,6	1,0006	-0,0006
10	1000,4	1,0004	-0,0004
11	1000,3	1,0003	-0,0003
12	1000,3	1,0003	-0,0003
13	1000,6	1,0006	-0,0006
14	1000,5	1,0005	-0,0005
15	1000,4	1,0004	-0,0004
16	1000,0	1,0000	0,0000
17	1000,2	1,0002	-0,0002
18	1000,2	1,0002	-0,0002
19	1000,6	1,0006	-0,0006
20	1000,4	1,0004	-0,0004
21	1000,3	1,0003	-0,0003
22	1000,3	1,0003	-0,0003
23	1000,6	1,0006	-0,0006
24	1000,5	1,0005	-0,0005
25	1000,4	1,0004	-0,0004
26	1000,0	1,0000	0,0000
27	1000,2	1,0002	-0,0002
28	1000,2	1,0002	-0,0002
29	1000,6	1,0006	-0,0006
30	1000,4	1,0004	-0,0004
31	1000,6	1,0006	-0,0006
32	1000,6	1,0006	-0,0006

33	1000,3	1,0003	-0,0003
34	1000,3	1,0003	-0,0003
35	1000,6	1,0006	-0,0006
36	1000,5	1,0005	-0,0005
37	1000,4	1,0004	-0,0004
38	1000,0	1,0000	0,0000
39	1000,2	1,0002	-0,0002
40	1000,2	1,0002	-0,0002
41	1000,6	1,0006	-0,0006
42	1000,4	1,0004	-0,0004
43	1000,3	1,0003	-0,0003
44	1000,3	1,0003	-0,0003
45	1000,6	1,0006	-0,0006
46	1000,5	1,0005	-0,0005
47	1000,4	1,0004	-0,0004
48	1000,0	1,0000	0,0000
49	1000,2	1,0002	-0,0002
50	1000,2	1,0002	-0,0002
51	1000,6	1,0006	-0,0006
52	1000,4	1,0004	-0,0004
53	1000,5	1,0005	-0,0005
54	1000,4	1,0004	-0,0004
55	1000,0	1,0000	0,0000
56	1000,2	1,0002	-0,0002
57	1000,2	1,0002	-0,0002
58	1000,6	1,0006	-0,0006
59	1000,4	1,0004	-0,0004
60	1000,6	1,0006	-0,0006

Promedio (g)	1,0004
Error medio(Kg)	-0,0004
Desviación estándar (Kg)	0,000185

Desviación estándar (Kg) máx. permitida	0,0008
Error medio (Kg) máx. permitido	-0,001
	0,001

Tabla A- 11. Pesajes excéntricos para discos de 1 Kilogramo a velocidad 5, con posiciones 1 y 2

1.2. Tabla resumen de todos los pesajes.

Tabla resumen de los pesajes y desviación general del proceso de pesaje

50 gr	Error medio(g)	-0,00046
V = 5	Desviación estándar (g)	0,000250
100 gr	Error medio(g)	-0,00028
V = 5	Desviación estándar (g)	0,000397
500 gr	Error medio(g)	-0,00002
V = 5	Desviación estándar (g)	0,000262
1 Kg	Error medio(g)	-0,00024
V = 5	Desviación estándar (g)	0,000481
2 Kg	Error medio(g)	0,00033
V = 0	Desviación estándar (g)	0,000395
2 Kg	Error medio(g)	-0,00017
V = 5	Desviación estándar (g)	0,000534
2,7 Kg	Error medio(g)	0,00067
V = 0	Desviación estándar (g)	0,000365
4 Kg	Error medio(g)	0,00123
V = 2	Desviación estándar (g)	0,000520
5,4 Kg	Error medio(g)	0,00038
V = 4	Desviación estándar (g)	0,000544
Excéntricos		
Posición 1	Error medio(g)	-0,00035
	Desviación estándar (g)	0,000183
Posición 2	Error medio(g)	-0,00036
	Desviación estándar (g)	0,000185
	Promedio de la desviación estándar	0,000374
	Desviación de la desviación estándar	0,000137
	Promedio del error medio	0,000067
	Desviación del error medio	0,000529

Tabla A- 12. Resumen de medias y desviaciones de los pesajes, y desviación estándar media y del proceso

1.3. Gráficos errores en los pesajes.



Gráfico A- 1. Representación de los errores de pesaje en cada pesada, con discos de 4 Kg a velocidad 2

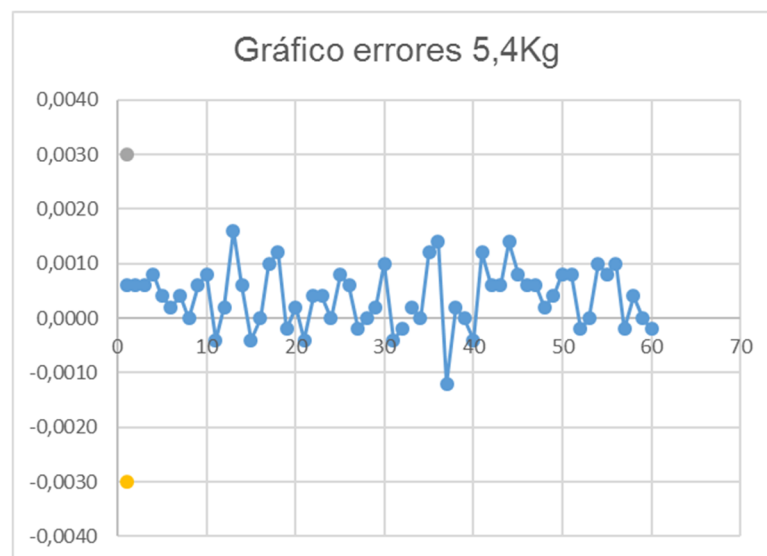


Gráfico A- 2. Representación de los errores de pesaje en cada pesada, con discos de 5,4 Kg a velocidad 4

2. Diseño del experimento. Diseño factorial de tres factores a dos niveles.

Diseño de experimento

<i>Factor A</i>	Tiempo de establecimiento	Nivel 1 (-)	280
		Nivel 2 (+)	330
<i>Factor B</i>	Tiempo de medida	Nivel 1 (-)	60
		Nivel 2 (+)	85
<i>Factor C</i>	Longitud cinta de pesaje	Nivel 1 (-)	370
		Nivel 2 (+)	430

Tabla A- 13. Diseño experimental

Tres factores dos niveles

Nivel Factor A	Nivel Factor B	Nivel Factor C	Respuesta Y
1	1	1	Y ₁₁₁
2	1	1	Y ₂₁₁
1	2	1	Y ₁₂₁
2	2	1	Y ₂₂₁
1	1	2	Y ₁₁₂
2	1	2	Y ₂₁₂
1	2	2	Y ₁₂₂
2	2	2	Y ₂₂₂

Tabla A- 14. Tabla de niveles codificados del diseño experimental

Nivel Factor A	Nivel Factor B	Nivel Factor C	Respuesta Y
280	60	370	Y ₁₁₁
330	60	370	Y ₂₁₁
280	85	370	Y ₁₂₁
330	85	370	Y ₂₂₁
280	60	430	Y ₁₁₂
330	60	430	Y ₂₁₂
280	85	430	Y ₁₂₂
330	85	430	Y ₂₂₂

Tabla A- 15. Tabla de niveles del diseño experimental

Codificación de niveles, para el posterior cálculo de efectos.

A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Respuesta Y
-	-	-	+	+	+	-	Y ₁₁₁
+	-	-	-	-	+	+	Y ₂₁₁
-	+	-	-	+	-	+	Y ₁₂₁
+	+	-	+	-	-	-	Y ₂₂₁
-	-	+	+	-	-	+	Y ₁₁₂
+	-	+	-	+	-	-	Y ₂₁₂
-	+	+	-	-	+	-	Y ₁₂₂
+	+	+	+	+	+	+	Y ₂₂₂

Tabla A- 16.Codificación por signos de los niveles y tabla resultante

Factor A	Factor B	Factor C	Respuesta Y			
			Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erróneos (%)	Paquetes prox.(%)
280	60	370	127	90,97 %	2,84 %	6,19 %
330	60	370	125	95,28 %	3,88 %	0,84 %
280	85	370	126	88,42 %	3,14 %	8,45 %
330	85	370	125	92,79 %	6,46 %	0,75 %
280	60	430	126	93,18 %	3,54 %	3,28 %
330	60	430	124	91,82 %	0,67 %	7,51 %
280	85	430	123	96,45 %	1,14 %	2,42 %
330	85	430	124	95,20 %	4,45 %	0,35 %

Tabla A- 17.Respuestas del experimento para cada combinación de valores

2.1. Cálculo efectos principales

Cálculo de los efectos principales

Cambio en el tiempo de establecimiento (Factor A) 280 ms→330 ms													
Condiciones de B y C	Nivel 1 (280mm)				Nivel 2 (330mm)				Efectos (Nivel 2 - Nivel 1)				
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
60 ms, 370 mm	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	-2 paq/min	4,31 %	1,04 %	-5,35 %	
85 ms, 370 mm	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	-1 paq/min	4,37 %	3,33 %	-7,70 %	
60 ms, 430 mm	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	-2 paq/min	-1,36 %	-2,87 %	4,23 %	
85 ms, 430 mm	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	1 paq/min	-1,25 %	3,31 %	-2,06 %	
Efecto prinipal A									-0,95 paq/min	1,52 %	1,20 %	-2,72 %	

Cambio en el tiempo de medida (Factor B) 60 ms→85 ms													
Condiciones de A y C	Nivel 1 (60mm)				Nivel 2 (85mm)				Efectos (Nivel 2 - Nivel 1)				
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
280 ms, 370 mm	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	-1 paq/min	-2,56 %	0,30 %	2,26 %	
330 ms, 370 mm	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	0 paq/min	-2,49 %	2,59 %	-0,09 %	
280 ms, 430 mm	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	-3 paq/min	3,26 %	-2,40 %	-0,86 %	
330 ms, 430 mm	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	0 paq/min	3,38 %	3,77 %	-7,15 %	
Efecto prinipal B									-0,95 paq/min	0,40 %	1,07 %	-1,46 %	

Cambio en la lomgitud de la cinta (Factor C) 370 mm→430 mm													
Condiciones de A y B	Nivel 1 (370mm)				Nivel 2 (430mm)				Efectos (Nivel 2 - Nivel 1)				
	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
280 ms, 60 mm	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	-1 paq/min	2,21 %	0,70 %	-2,91 %	
330 ms, 85 mm	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	-1 paq/min	-3,46 %	-3,21 %	6,67 %	
280 ms, 60 mm	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	-3 paq/min	8,03 %	-2,00 %	-6,03 %	
330 ms, 85 mm	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	-1 paq/min	2,41 %	-2,02 %	-0,39 %	
Efecto prinipal C									-1,55 paq/min	2,30 %	-1,63 %	-0,67 %	

Tabla A- 18.Efectos principales

2.2. Cálculo de las interacciones de dos factores

Cálculo de las interacciones de segundo grado

Interacciones BC

Nivel 1 del factor A		280 ms		Resultados			
B	C	BC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	
+	-	-	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	
-	+	-	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	
+	+	+	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	
		BC	-1,00 paq/min	2,91 %	-1,35 %	-1,56 %	

Interacciones AC

Nivel 1 del factor B		60 ms		Resultados			
A	C	AC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	
+	-	-	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	
-	+	-	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	
+	+	+	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	
		AC	0,00 paq/min	-2,84 %	-1,95 %	4,79 %	

Interacciones AB

Nivel 1 del factor C		370 ms		Resultados			
A	B	AB	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %	
+	-	-	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	
-	+	-	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	
+	+	+	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	
		AB	0,60 paq/min	0,03 %	1,14 %	-1,17 %	

Nivel 2 del factor A		330 ms		Resultados			
B	C	BC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %	
+	-	-	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	
-	+	-	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	
+	+	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	
		BC	-0,10 paq/min	2,94 %	0,59 %	-3,53 %	
		Efecto BC	-0,55 paq/min	2,92 %	-0,38 %	-2,54 %	

Nivel 2 del factor B		85 ms		Resultados			
A	C	AC	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %	
+	-	-	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %	
-	+	-	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	
+	+	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	
		AC	0,90 paq/min	-2,81 %	-0,01 %	2,82 %	
		Efecto AC	0,45 paq/min	-2,82 %	-0,98 %	3,80 %	

Nivel 2 del factor C		430 ms		Resultados			
A	B	AB	Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox	
-	-	+	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %	
+	-	-	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %	
-	+	-	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %	
+	+	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %	
		AB	1,50 paq/min	0,06 %	3,09 %	-3,15 %	
		Efecto AB	1,05 paq/min	0,04 %	2,12 %	-2,16 %	

Tabla A-19. Efectos para las combinaciones de dos factores

100

2.3. Cálculo de la interacción de tres factores

Cálculo de la interacción de tres factores ABC

Nivel del factor C "Longitud de cinta"	AB	Resultados			
		Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Nivel 1 (-): 370mm	+	127 paq/min	90,97 %	2,84 %	6,19 %
	-	125 paq/min	95,28 %	3,88 %	0,84 %
	-	126 paq/min	88,42 %	3,14 %	8,45 %
	+	125 paq/min	92,79 %	6,46 %	0,75 %
	AB (nivel 1 C)	0,60 paq/min	0,03 %	1,14 %	-1,17 %

Nivel del factor C "Longitud de cinta"	AB	Resultados			
		Product.	Pesos Ok	Pesos error	Paq. Prox
Nivel 2 (+): 430mm	+	126 paq/min	93,18 %	3,54 %	3,28 %
	-	124 paq/min	91,82 %	0,67 %	7,51 %
	-	123 paq/min	96,45 %	1,14 %	2,42 %
	+	124 paq/min	95,20 %	4,45 %	0,35 %
	AB (nivel 2 C)	1,50 paq/min	0,06 %	3,09 %	-3,15 %
	Efecto ABC	0,45 paq/min	0,01 %	0,97 %	-0,99 %

Tabla A- 20.Efectos de la interacción de los tres factores

2.4. Efectos “Productividad”

Resultados finales

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC	Product.	
-	-	-	+	+	+	-	126 paq/min	
+	-	-	-	-	+	+	127 paq/min	
-	+	-	-	+	-	+	125 paq/min	
+	+	-	+	-	-	-	125 paq/min	
-	-	+	+	-	-	+	124 paq/min	
+	-	+	-	+	-	-	127 paq/min	
-	+	+	-	-	+	-	125 paq/min	
+	+	+	+	+	+	+	126 paq/min	
-0,95 paq/min	-0,95 paq/min	-1,55 paq/min	-0,55 paq/min	0,45 paq/min	1,05 paq/min	0,45 paq/min	126 paq/min	Promedio
Efectos principales			Interacciones					

Productividad	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Restamos el valor de ABC	-0,95 paq/min	-0,95 paq/min	-1,55 paq/min	-0,55 paq/min	0,45 paq/min	1,05 paq/min	0,45 paq/min
Efecto resultante	-1,40 paq/min	-1,40 paq/min	-2,00 paq/min	-1,00 paq/min	0,00 paq/min	0,60 paq/min	0,00 paq/min

	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB
Restar BC a B y a C	-1,40 paq/min	-0,40 paq/min	-1,00 paq/min	-1,00 paq/min	0,00 paq/min	0,60 paq/min
Restar AC a A y a C	-1,40 paq/min	-0,40 paq/min	-1,00 paq/min			
Restar AB a A y a B	-2,00 paq/min	-1,00 paq/min	-1,00 paq/min			

Tabla A- 21. Contribuciones básicas productividad (margen interior)

Tabla A- 22. Resultados finales, Productividad

Productividad	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Efectos paq/min	-0,95	-0,95	-1,55	-0,55	0,45	1,05	0,45
Contribución básica paq/min	-2,00	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	0,60	0,45

Tabla A- 23.Cálculo de las contribuciones básicas

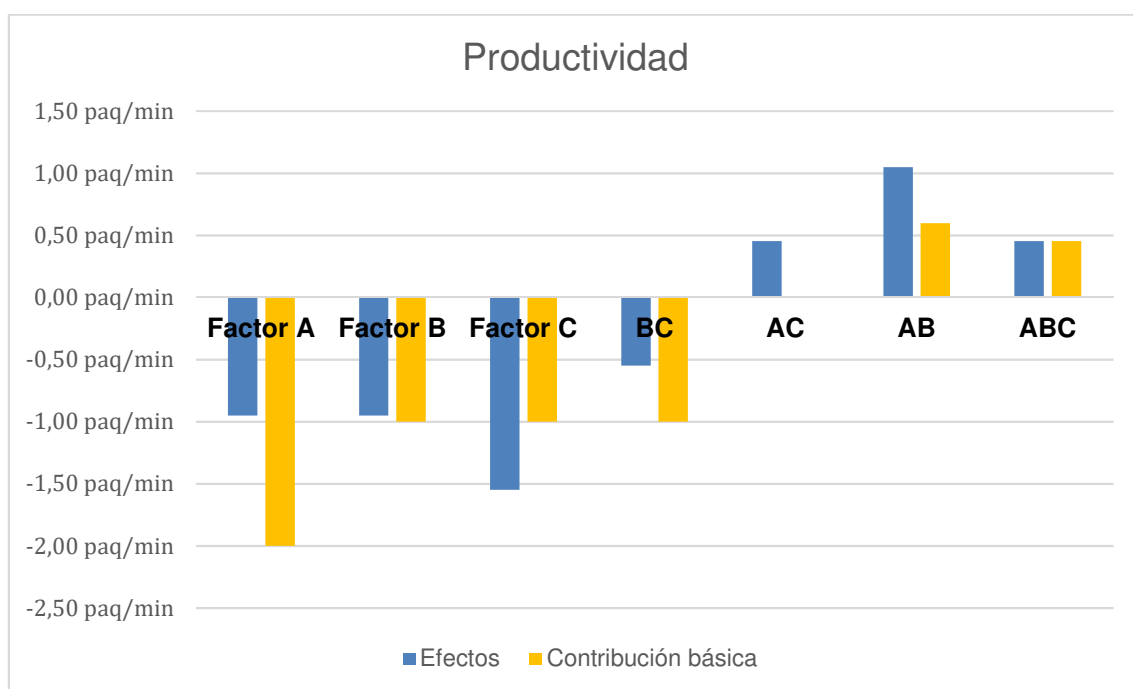


Gráfico A- 3.Representación efectos y contribuciones para la productividad

2.5. Efectos "Pesos Ok"

Resultados finales							Pesos Ok		
Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC			
-	-	-	+	+	+	-	90,97 %		
+	-	-	-	-	+	+	89,28 %		
-	+	-	-	+	-	+	88,42 %		
+	+	-	+	-	-	-	92,79 %		
-	-	+	+	-	-	+	96,18 %		
+	-	+	-	+	-	-	91,82 %		
-	+	+	-	-	+	-	96,45 %		
+	+	+	+	+	+	+	95,20 %		
1,52 %	0,40 %	2,30 %	2,92 %	-2,82 %	0,04 %	0,01 %	92,64 %	Promedio	
Efectos principales			Interacciones						

Pesos Ok	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Restamos el valor de ABC	1,52 %	0,40 %	2,30 %	2,92 %	-2,82 %	0,04 %	0,01 %
Efecto resultante	1,51 %	0,39 %	2,29 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %	0,00 %

	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB
Restar BC a B y a C	1,51 %	-2,52 %	-0,62 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %
Restar AC a A y a C	4,34 %	-2,52 %	2,21 %			
Restar AB a A y a B	4,31 %	-2,56 %	2,21 %			

Tabla A- 24. Cálculo de las contribuciones básicas (Margen interior)

Tabla A- 25. Resultados finales, Pesos Ok

Pesos Ok	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Efectos	1,52 %	0,40 %	2,30 %	2,92 %	-2,82 %	0,04 %	0,01 %
Contribución básica	4,31 %	-2,56 %	2,21 %	2,91 %	-2,84 %	0,03 %	0,01 %

Tabla A- 26.Cálculo de las contribuciones básicas

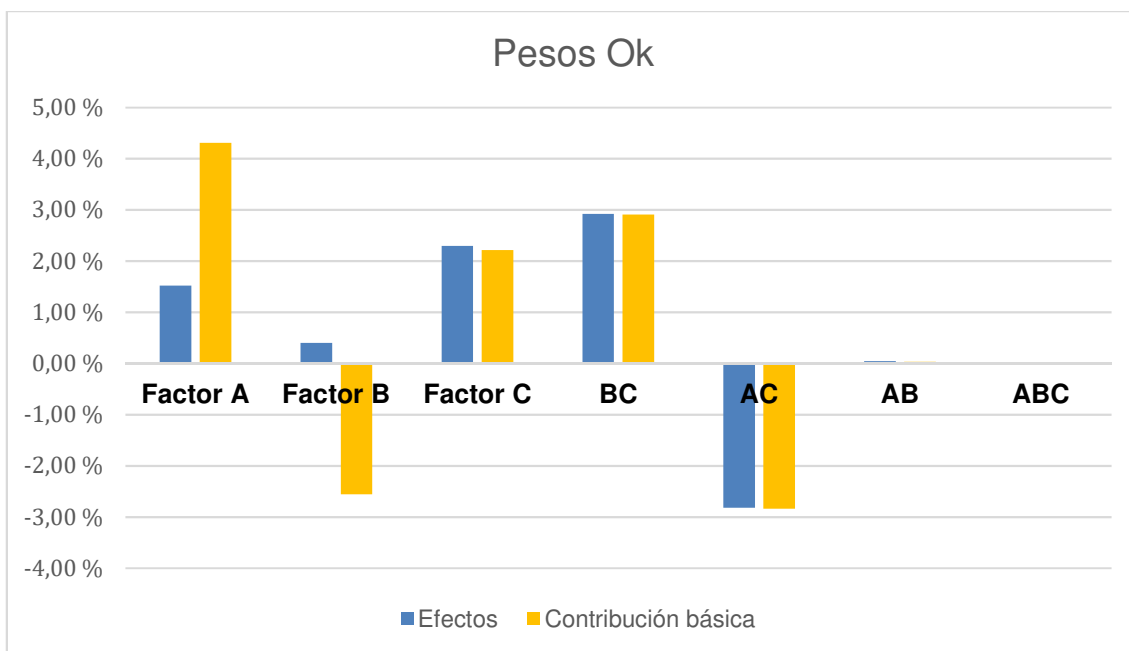


Gráfico A- 4.Representación efectos y contribuciones para los pesos Ok

2.6. Efectos “Pesos erróneos”

Resultados finales

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC	Pesos err.
-	-	-	+	+	+	-	2,84 %
+	-	-	-	-	+	+	3,88 %
-	+	-	-	+	-	+	3,14 %
+	+	-	+	-	-	-	6,46 %
-	-	+	+	-	-	+	3,54 %
+	-	+	-	+	-	-	0,67 %
-	+	+	-	-	+	-	1,14 %
+	+	+	+	+	+	+	4,45 %
1,20 %	1,07 %	-1,63 %	-0,38 %	-0,98 %	2,12 %	0,97 %	3,26 %
Efectos principales			Interacciones				Promedios

Pesos err.	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Restamos el valor de ABC	1,20 %	1,07 %	-1,63 %	-0,38 %	-0,98 %	2,12 %	0,97 %
Efecto resultante	0,23 %	0,09 %	-2,60 %	-1,35 %	-1,95 %	1,14 %	0,00 %

	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB
Restar BC a B y a C	0,23 %	1,44 %	-1,25 %	-1,35 %	-1,95 %	1,14 %
Restar AC a A y a C	2,18 %	1,44 %	0,70 %			
Restar AB a A y a B	1,04 %	0,30 %	0,70 %			

Tabla A-27. Cálculo de las contribuciones básicas (margen interior)

Tabla A-28. Resultados finales, pesos err.

Pesos Err.	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Efectos	1,20 %	1,07 %	-1,63 %	-0,38 %	-0,98 %	2,12 %	0,97 %
Contribución básica	1,04 %	0,30 %	0,70 %	-1,35 %	-1,95 %	1,14 %	0,97 %

Tabla A- 29.Cálculo de las contribuciones básicas

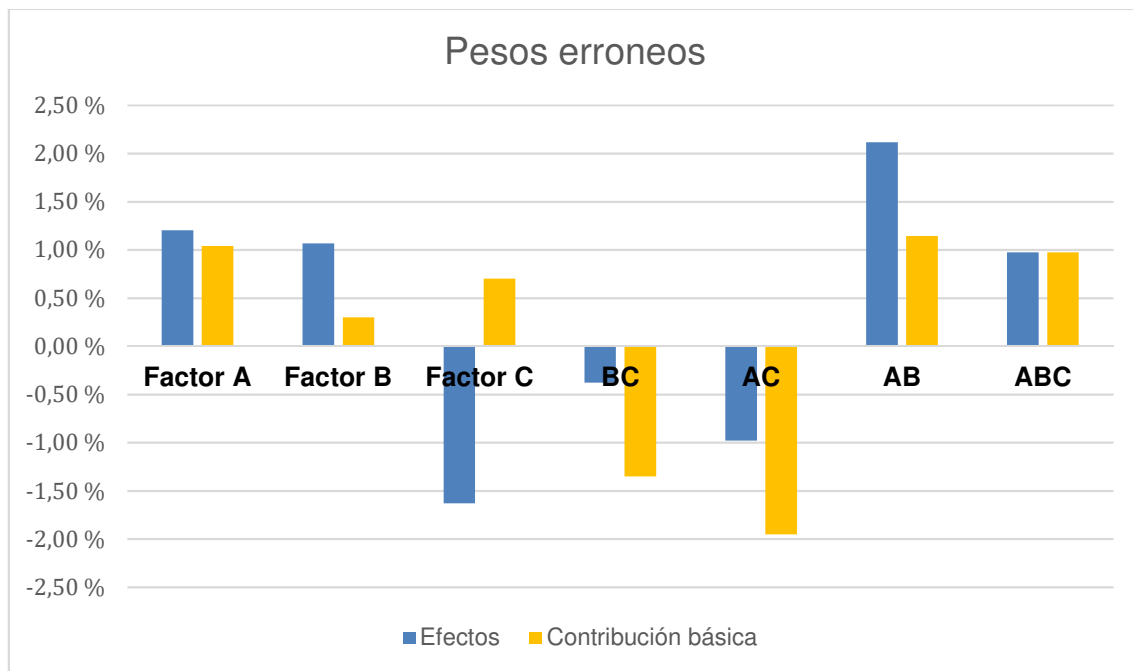


Gráfico A- 5.Representación efectos y contribuciones para los pesos Ok

2.7. Efectos “Paquetes próximos”

Resultados finales

Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC	Paquetes prox.		
-	-	-	+	+	+	-	6,19 %		
+	-	-	-	-	+	+	0,84 %		
-	+	-	-	+	-	+	8,45 %		
+	+	-	+	-	-	-	0,75 %		
-	-	+	+	-	-	+	3,28 %		
+	-	+	-	+	-	-	7,51 %		
-	+	+	-	-	+	-	2,42 %		
+	+	+	+	+	+	+	0,35 %		
-2,72 %	-1,46 %	-0,67 %	-3,53 %	3,80 %	-2,16 %	-0,99 %	3,72 %	Promedios	
Efectos principales			Interacciones						

Paq. Prox.	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Restamos el valor de ABC	-2,72 %	-1,46 %	-0,67 %	-3,53 %	3,80 %	-2,16 %	-0,99 %
Efecto resultante	-1,74 %	-0,48 %	0,32 %	-2,54 %	4,79 %	-1,17 %	0,00 %

	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB
Restar BC a B y a C	-1,74 %	2,07 %	2,86 %	-2,54 %	4,79 %	-1,17 %
Restar AC a A y a C	-6,52 %	2,07 %	-1,93 %			
Restar AB a A y a B	-5,35 %	3,24 %	-1,93 %			

Tabla A-30. Cálculo de las contribuciones básicas (margen interior)

Tabla A-31. Resultados finales, paquetes próx.

Paquetes prox.	Factor A	Factor B	Factor C	BC	AC	AB	ABC
Efectos	-2,72 %	-1,46 %	-0,67 %	-3,53 %	3,80 %	-2,16 %	-0,99 %
Contribución básica	-5,35 %	3,24 %	-1,93 %	-2,54 %	4,79 %	-1,17 %	-0,99 %

Tabla A- 32.Cálculo de las contribuciones básicas

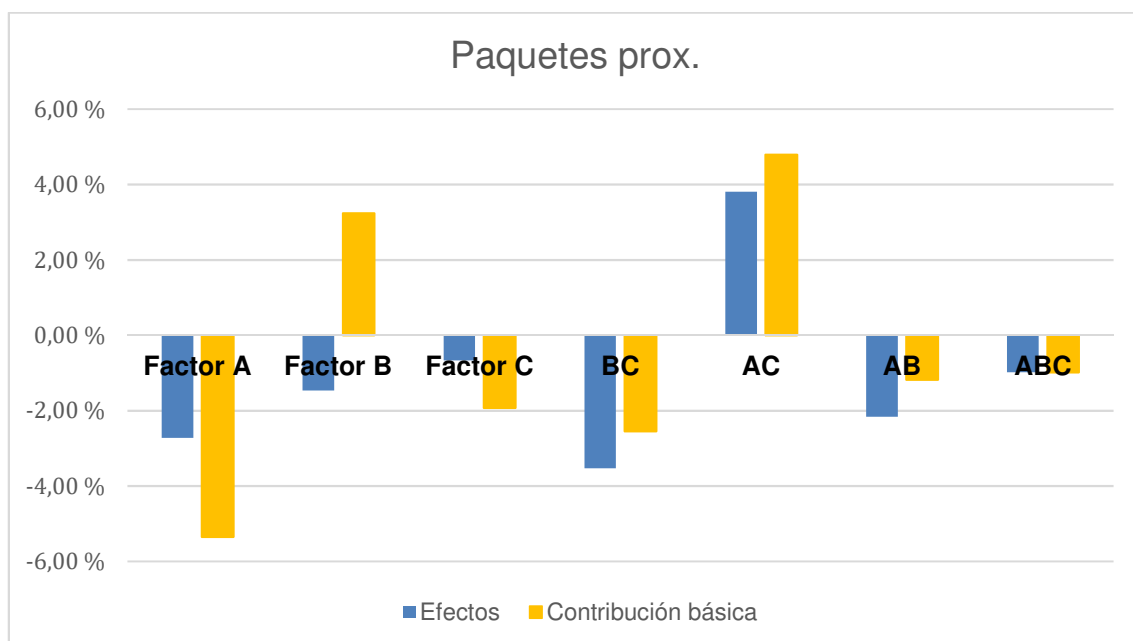


Gráfico A- 6.Representación efectos y contribuciones para los paquetes próximos

3. Replicaciones experimentales

Diseño del experimento. Replicaciones experimentales, estudio de la varianza de las respuestas.

Respuesta Y (replicación 1)			
Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erróneos (%)	Paquetes prox. (%)
126	90,85 %	2,68 %	6,47 %
125	95,30 %	3,85 %	0,85 %
126	88,60 %	3,40 %	8,00 %
125	93,00 %	6,53 %	0,47 %
126	93,14 %	3,55 %	3,31 %
124	91,92 %	0,71 %	7,37 %
124	96,46 %	1,10 %	2,44 %
123	95,20 %	4,46 %	0,34 %

Tabla A- 33.Replicación 1 del experimento

Respuesta Y (replicación 2)			
Productividad (paq/min)	Pesos Ok (%)	Pesos Erróneos (%)	Paquetes prox. (%)
127	91,03 %	2,90 %	6,07 %
126	95,30 %	3,86 %	0,84 %
126	88,53 %	3,23 %	8,24 %
125	92,69 %	6,43 %	0,88 %
126	93,19 %	3,56 %	3,25 %
124	91,79 %	0,72 %	7,49 %
124	96,40 %	1,08 %	2,52 %
124	95,18 %	4,35 %	0,47 %

Tabla A- 34.Replicación 2 del experimento

3.1. Análisis “Productividad”

Productividad (paq/min)	Productividad (paq/min)	Productividad (paq/min)	Media	Desviación estándar S ²
127	126	127	127	0,47140452
126	125	125	125	0,47140452
126	126	126	126	0
125	125	125	125	0
126	126	126	126	0
124	124	124	124	0
124	124	123	124	0,47140452
124	123	124	124	0,47140452

Tabla A- 35.Productividad de los 3 experimentos

Análisis de varianza de un factor PRODUCTIVIDAD

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
EXPERIMENTO	8	1002,19323	125,274153	1,34800804
REPLICACIÓN 1	8	999,193226	124,899153	1,2794251
REPLICACIÓN 2	8	1000,19323	125,024153	1,71895275

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,58333333	2	0,29166667	0,20131669	0,81921306	3,46680011
Dentro de los grupos	30,4247012	21	1,44879529			
Total	31,0080345	23				

Tabla A- 36.ANOVA Productividad

3.2. Análisis “Pesos OK”

Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Pesos Ok (%)	Media	Desviación estándar S ²
91,03 %	90,85 %	90,97 %	90,95 %	0,07512926
95,30 %	95,30 %	95,28 %	95,29 %	0,00821127
88,53 %	88,60 %	88,42 %	88,52 %	0,07568085
92,69 %	93,00 %	92,79 %	92,83 %	0,12918808
93,19 %	93,14 %	93,18 %	93,17 %	0,02234537
91,79 %	91,92 %	91,82 %	91,84 %	0,05533126
96,40 %	96,46 %	96,45 %	96,44 %	0,02580429
95,18 %	95,20 %	95,20 %	95,19 %	0,00959929

Tabla A- 37. Pesos Ok de los 3 experimentos

Análisis de varianza de un factor PESOS OK

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
EXPERIMENTO	8	744,11	93,01375	6,7227125
REPLICACIÓN 1	8	744,470363	93,0587954	6,74914898
REPLICACIÓN 2	8	744,115728	93,014466	6,93108567

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,01065253	2	0,00532627	0,00078316	0,99921717	3,46680011
Dentro de los grupos	142,82063	21	6,80098238			
Total	142,831283	23				

Tabla A- 38. ANOVA Pesos OK

3.3. Análisis “Pesos erróneos”

Pesos Erróneos (%)	Pesos Erróneos (%)	Pesos Erróneos (%)	Media	Desviación estándar S ²
2,90 %	2,68 %	2,84 %	2,81 %	0,09245488
3,86 %	3,85 %	3,88 %	3,86 %	0,01080521
3,23 %	3,40 %	3,14 %	3,26 %	0,10859583
6,43 %	6,53 %	6,46 %	6,47 %	0,04160868
3,56 %	3,55 %	3,54 %	3,55 %	0,00961399
0,72 %	0,71 %	0,67 %	0,70 %	0,02142831
1,08 %	1,10 %	1,14 %	1,11 %	0,02304705
4,35 %	4,46 %	4,45 %	4,42 %	0,04870641

Tabla A- 39.Pesos erróneos de los 3 experimentos

Análisis de varianza de un factor PESOS ERRONEOS

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
EXPERIMENTO	8	26,13	3,26625	3,28874107
REPLICACIÓN 1	8	26,28	3,285	3,4406
REPLICACIÓN 2	8	26,1011597	3,26264496	3,36174711

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00230482	2	0,00115241	0,0003426	0,99965746	3,46680011
Dentro de los grupos	70,6376173	21	3,36369606			
Total	70,6399221	23				

Tabla A- 40.ANOVA Pesos erróneos

3.4. Análisis “Paquetes próximos”

Paquetes prox. (%)	Paquetes prox. (%)	Paquetes prox. (%)	Media	Desviación estándar S ²
6,07 %	6,47 %	6,19 %	6,24 %	0,16756557
0,84 %	0,85 %	0,84 %	0,84 %	0,00445888
8,24 %	8,00 %	8,45 %	8,23 %	0,18219167
0,88 %	0,47 %	0,75 %	0,70 %	0,17079581
3,25 %	3,31 %	3,28 %	3,28 %	0,02449795
7,49 %	7,37 %	7,51 %	7,46 %	0,06120257
2,52 %	2,44 %	2,42 %	2,46 %	0,04412304
0,47 %	0,34 %	0,35 %	0,39 %	0,05824208

Tabla A- 41. Paquetes próximos de los 3 experimentos

Análisis de varianza de un factor PESOS PRÓXIMOS

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
EXPERIMENTO	8	29,76	3,72	9,82131429
REPLICACIÓN 1	8	29,2496368	3,6562046	10,1719423
REPLICACIÓN 2	8	29,7831126	3,72288907	10,4466999

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,02273338	2	0,01136669	0,00112024	0,99888045	3,46680011
Dentro de los grupos	213,079695	21	10,1466522			
Total	213,102429	23				

Tabla A- 42. ANOVA Paquetes próximos

4. Gráficos diseño del experimento.

4.1. Gráficos efectos principales

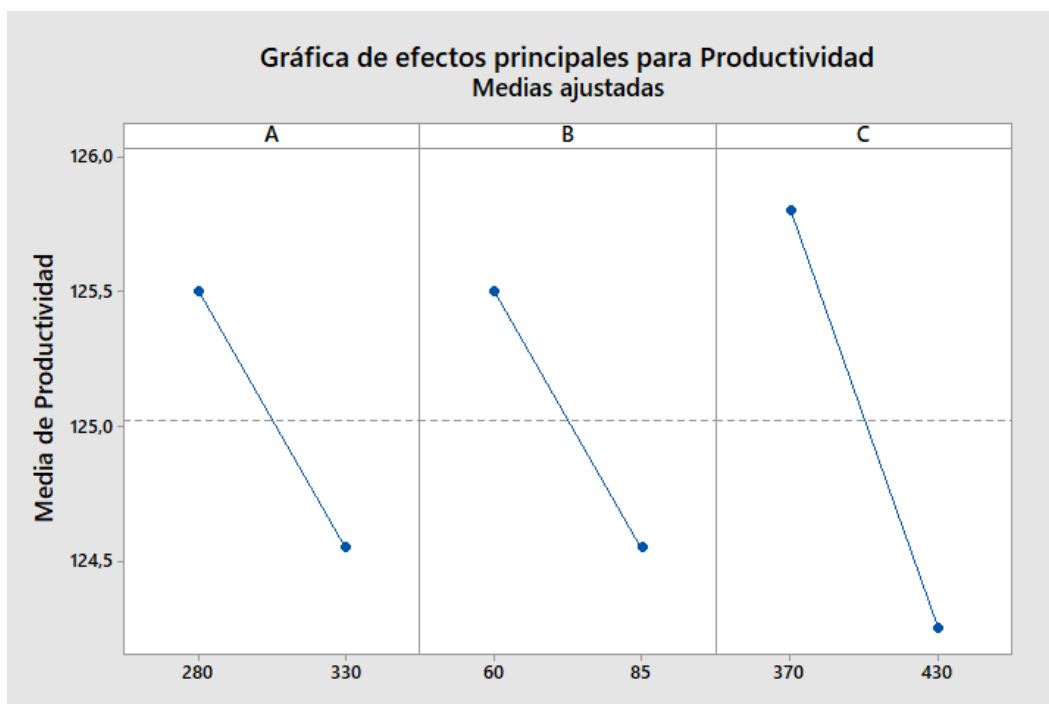


Gráfico A- 7.Efectos principales Productividad

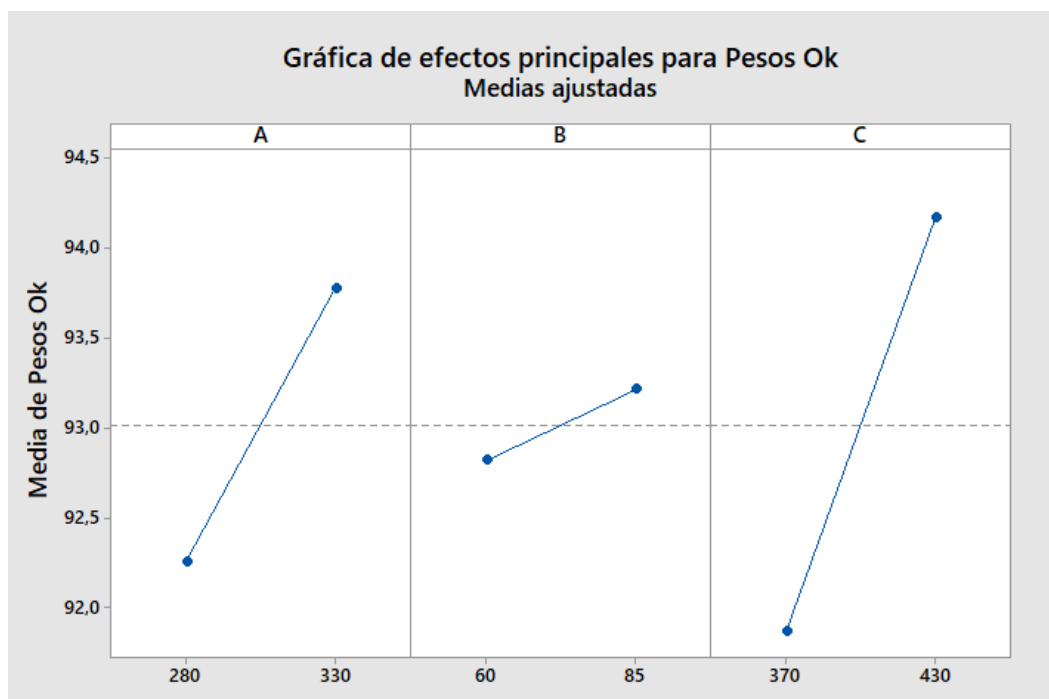


Gráfico A- 8.Efectos principales Pesos Ok

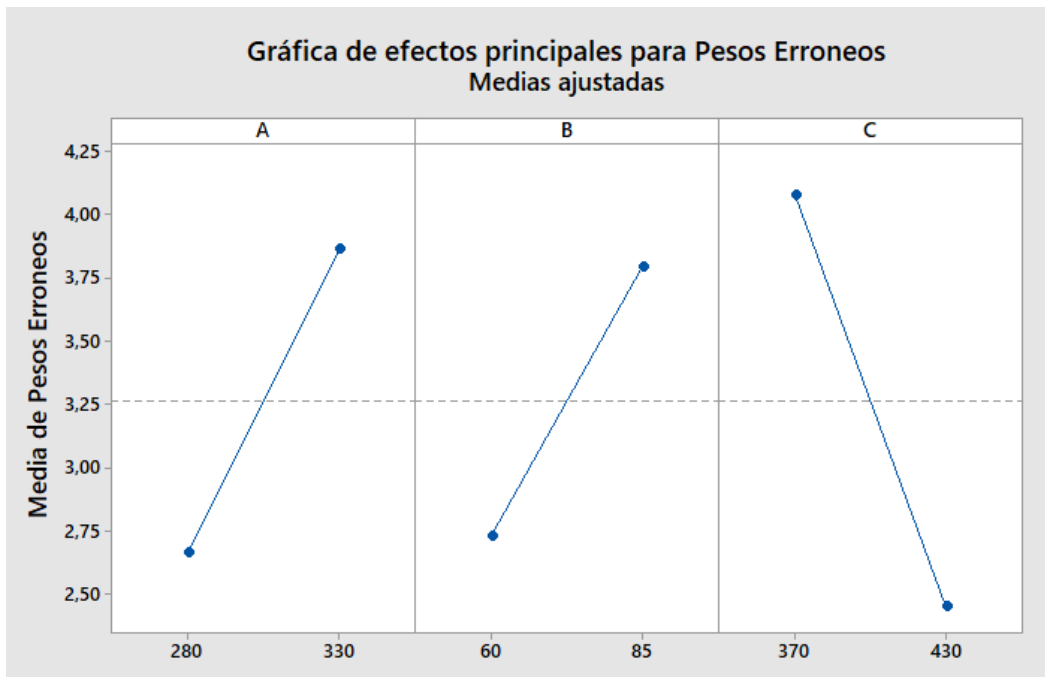


Gráfico A- 9.Efectos principales Pesos erróneos

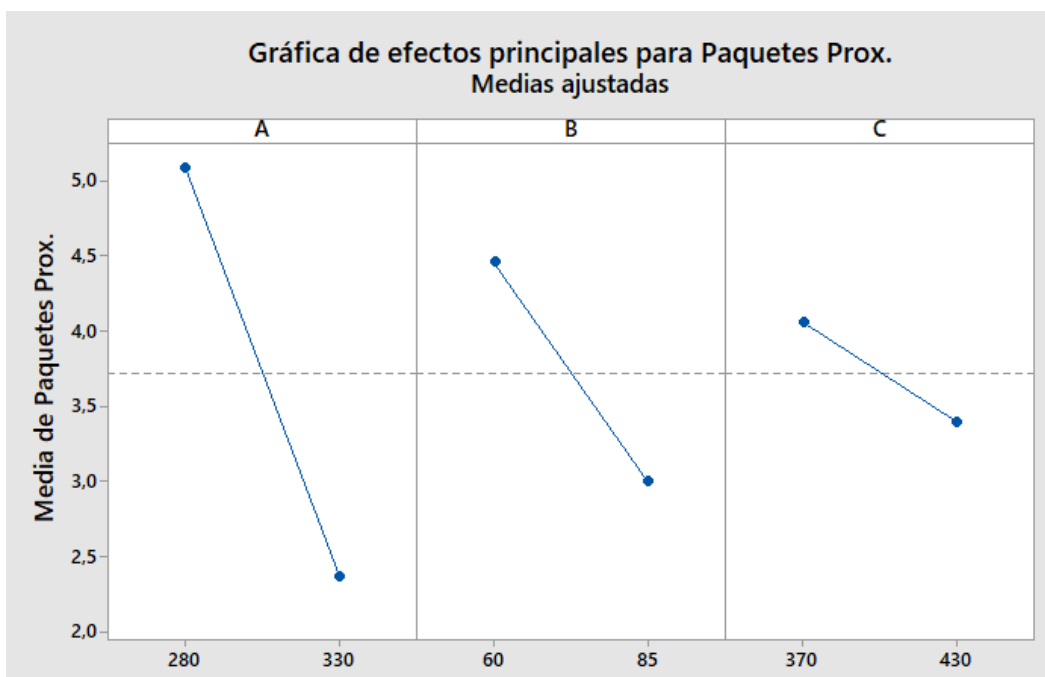


Gráfico A- 10.Efectos principales Paquetes Próximos

4.2. Gráficos interacciones de los factores

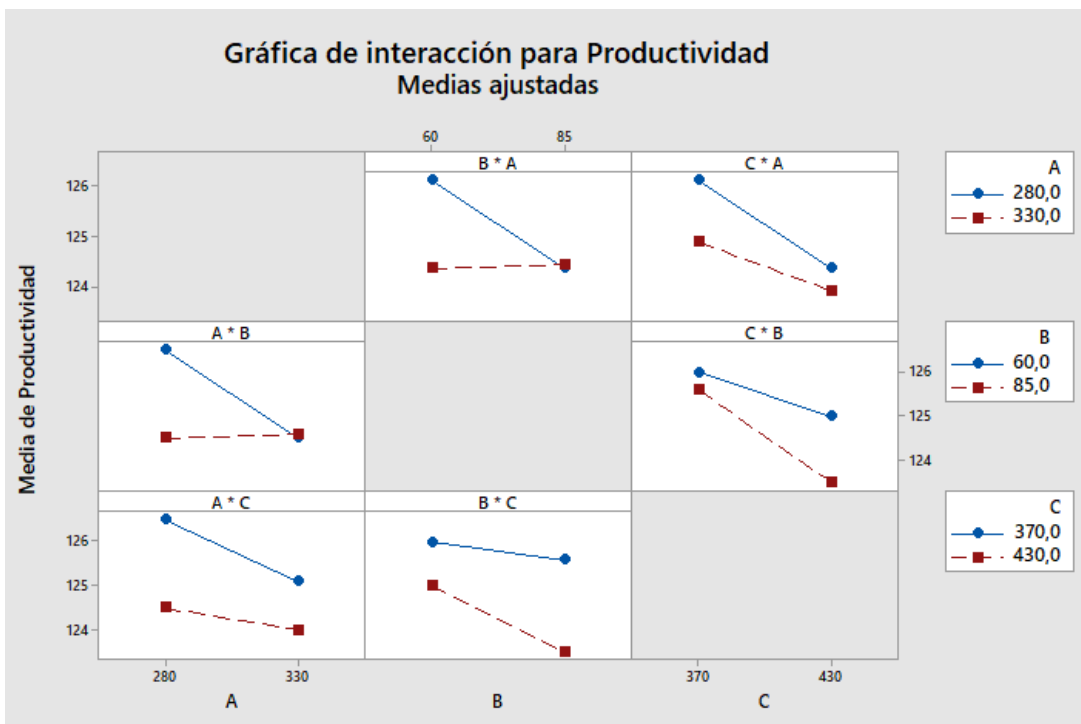


Gráfico A- 11. Interacciones Productividad

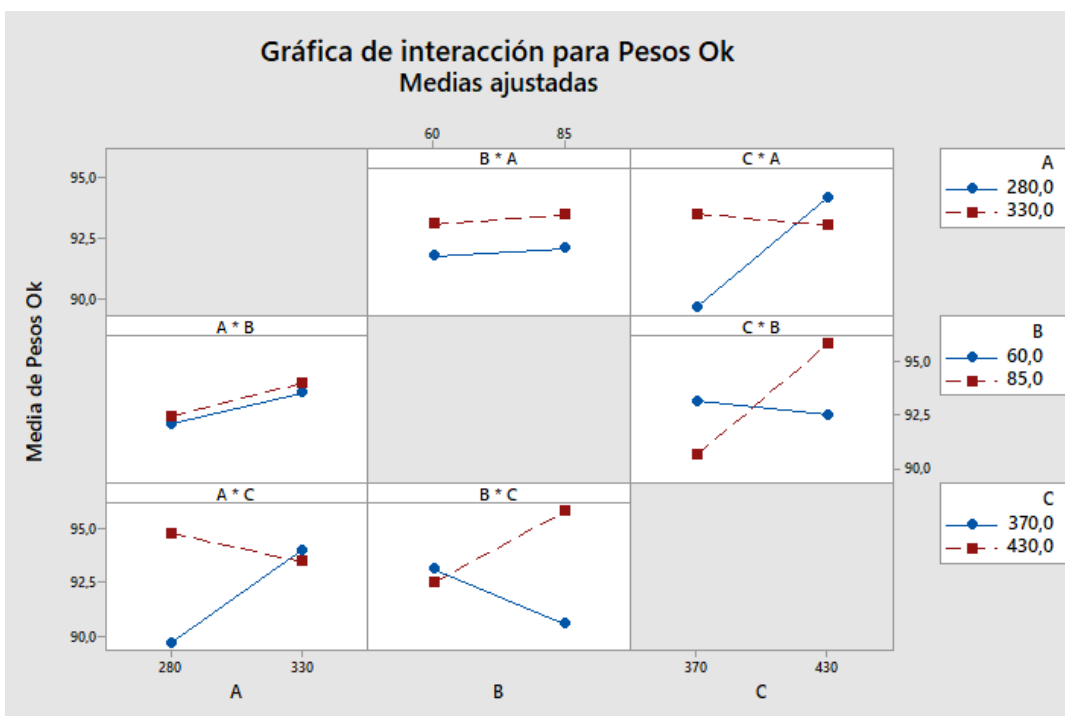


Gráfico A- 12. Interacciones Pesos OK

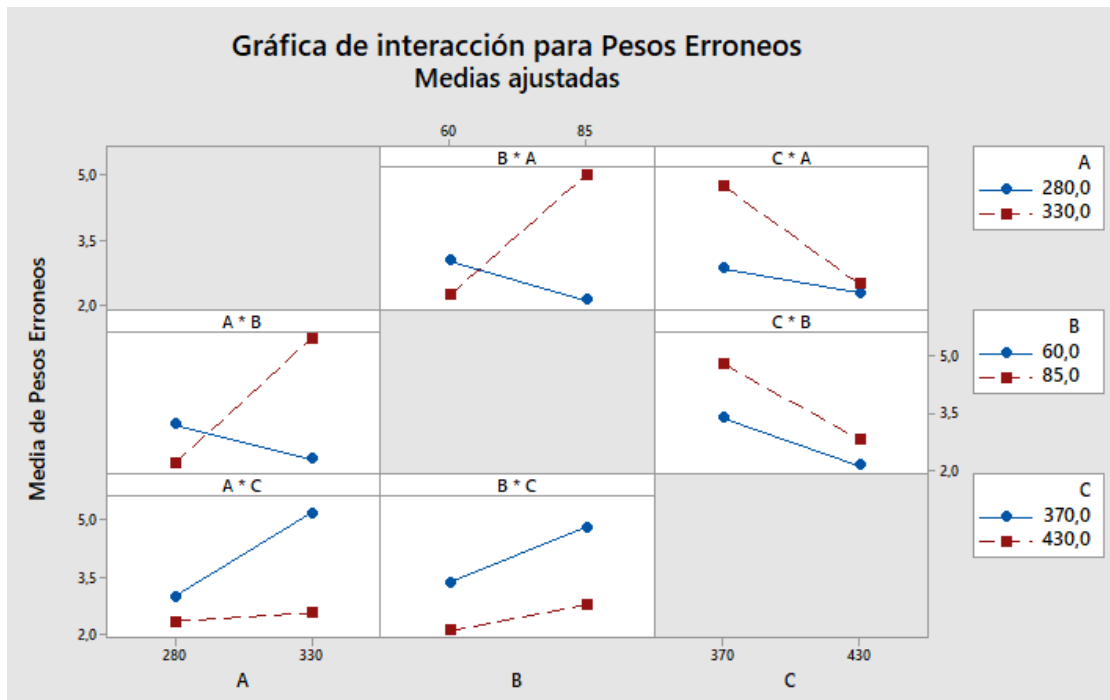


Gráfico A- 13. Interacciones Pesos erróneos

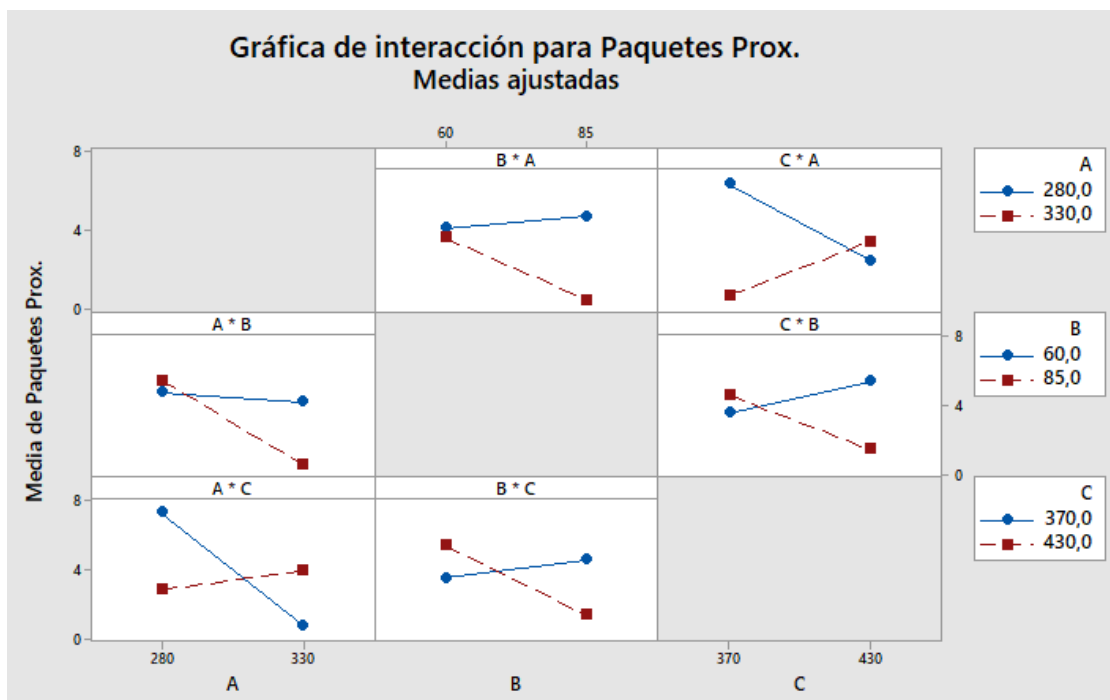


Gráfico A- 14. Interacciones Paquetes próximos

4.3. Gráfica normal de los efectos

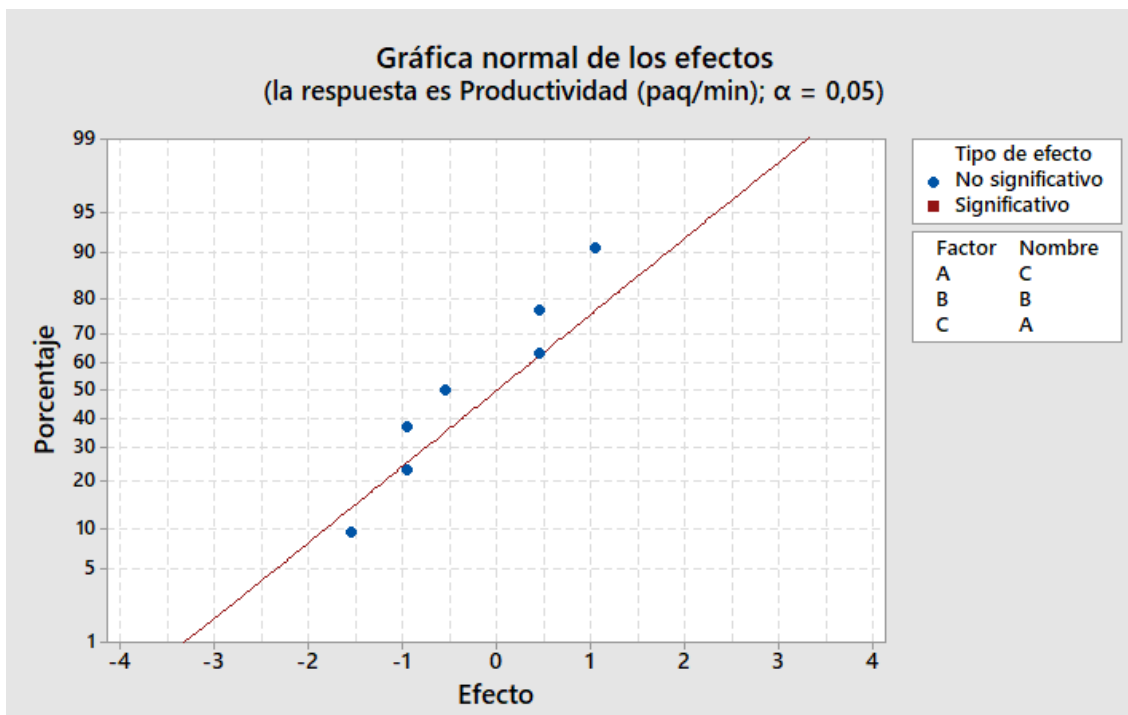


Gráfico A- 15. Gráfica normal de los efectos, productividad

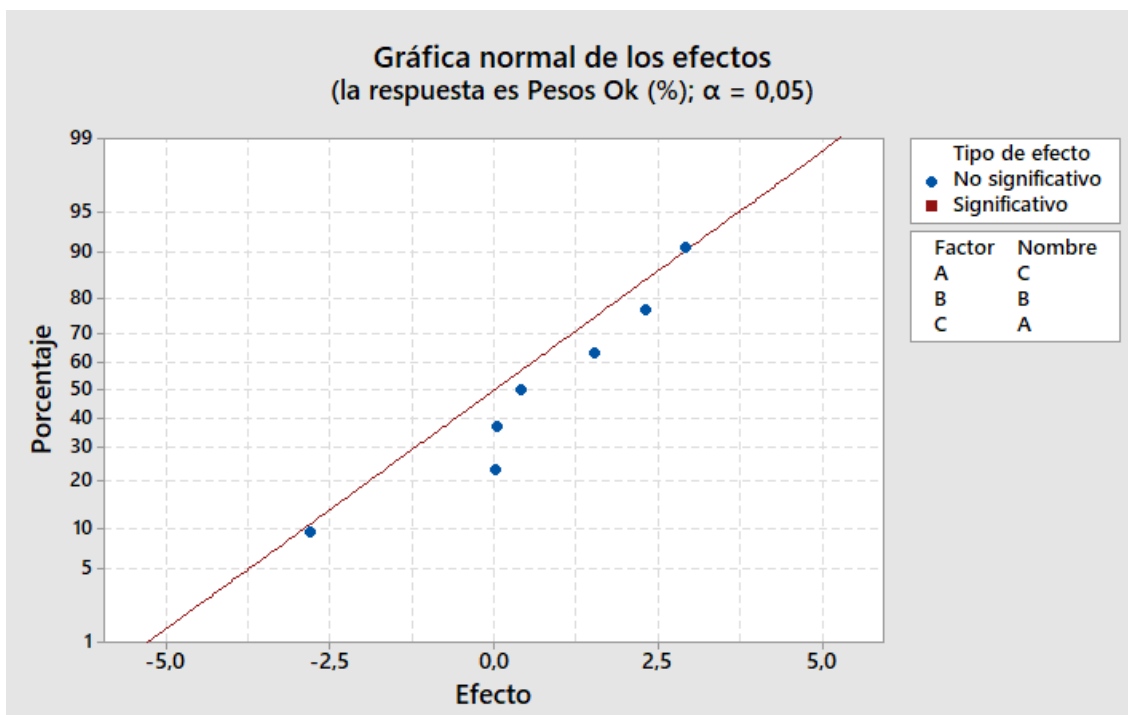


Gráfico A- 16. Gráfica normal de los efectos, pesos Ok

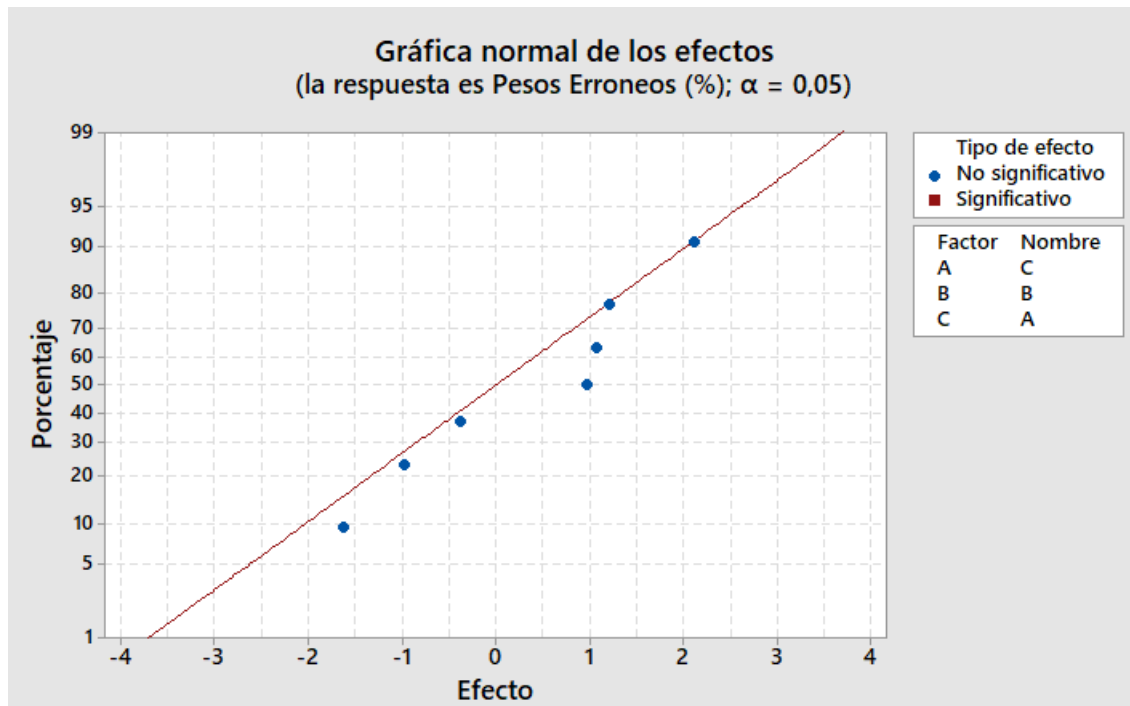


Gráfico A- 17. Gráfica normal de los efectos, pesos erróneos

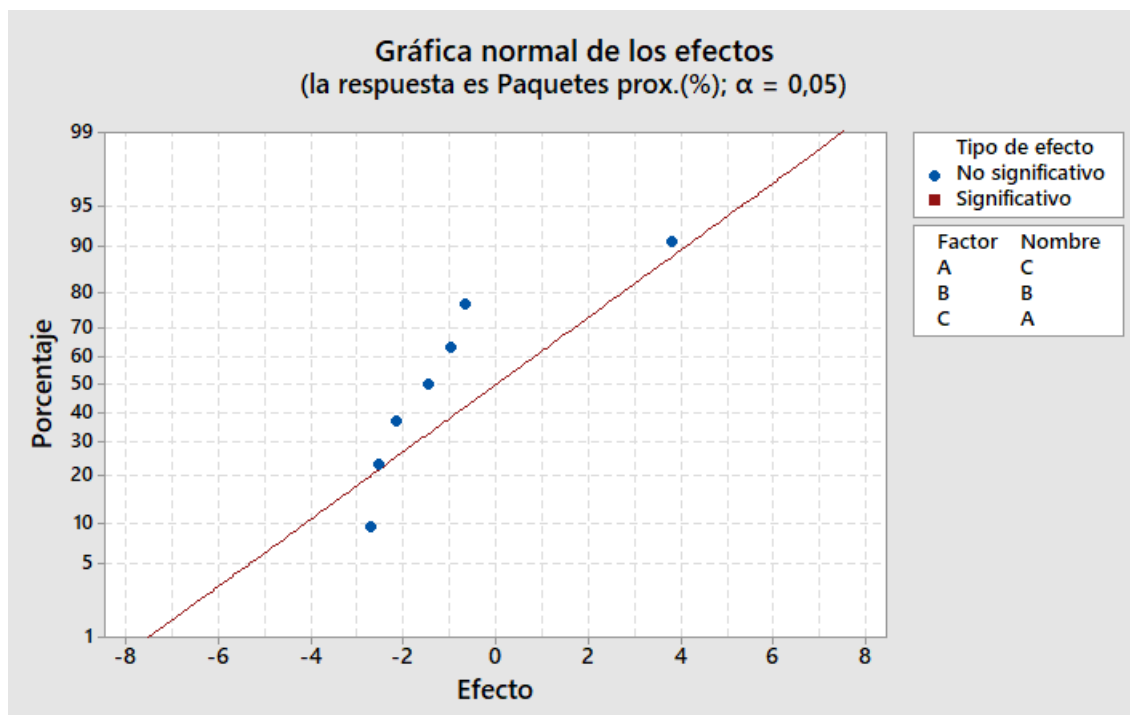


Gráfico A- 18. Gráfica normal de los efectos, paquetes próximos

4.4. Diagramas de Pareto para los efectos

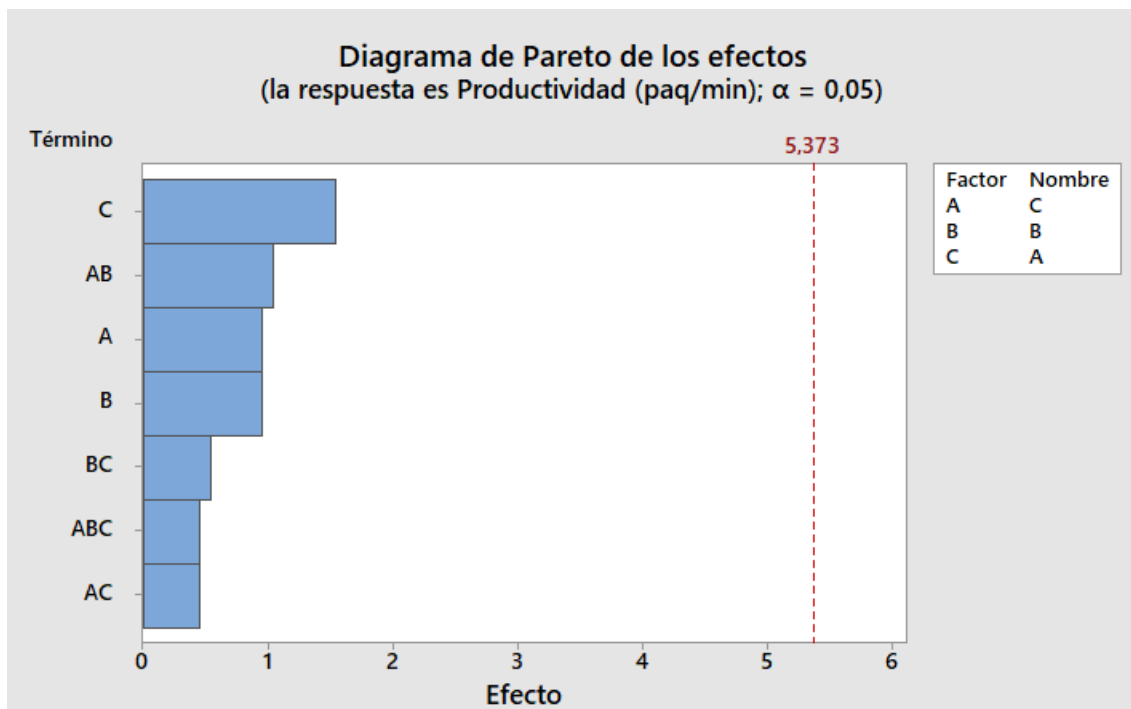


Gráfico A- 19.Diagrama de Pareto, productividad

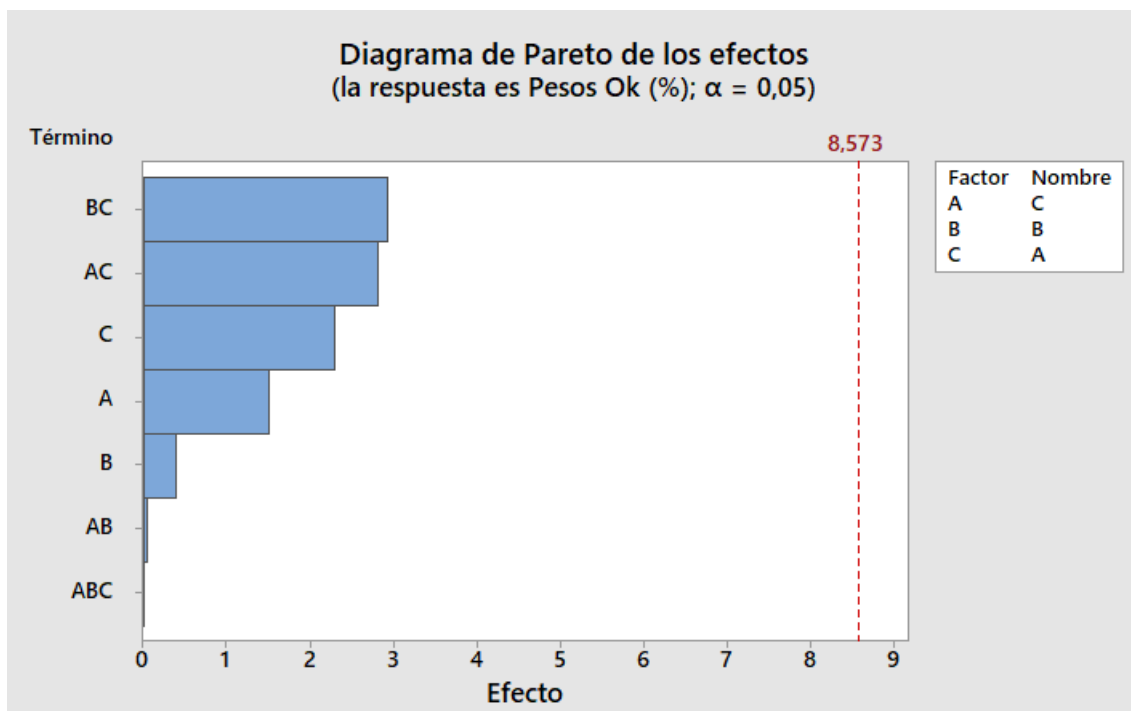


Gráfico A- 20.Diagrama de Pareto, pesos Ok

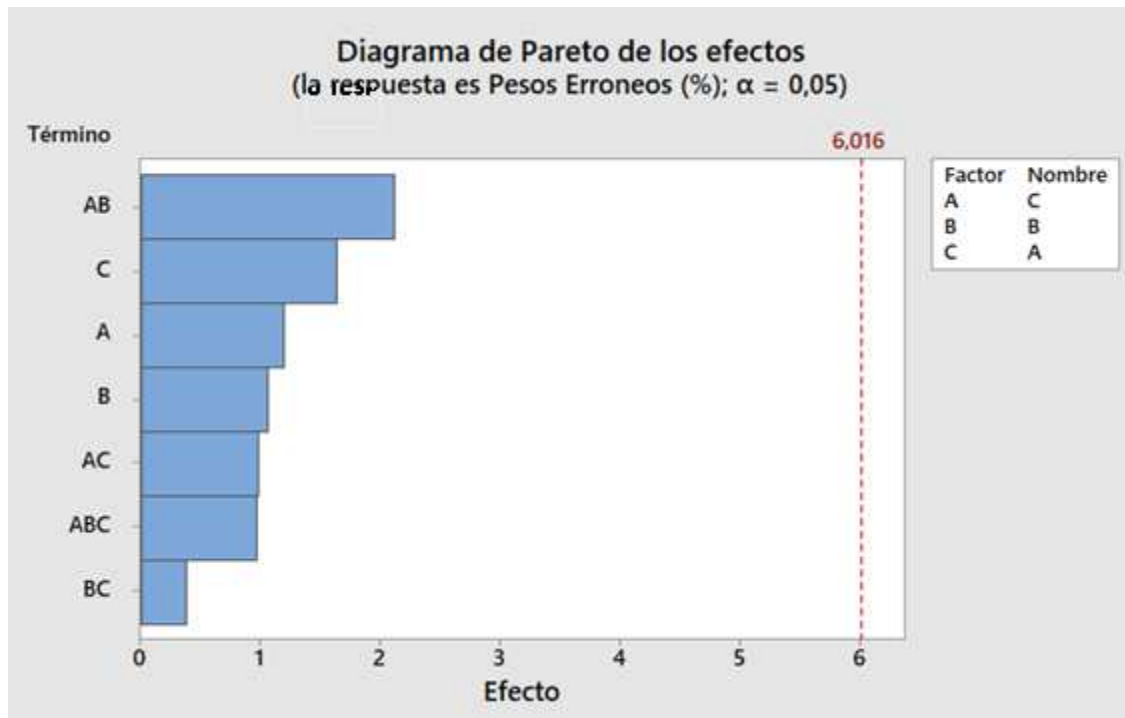


Gráfico A- 21. Diagrama de Pareto, pesos erróneos

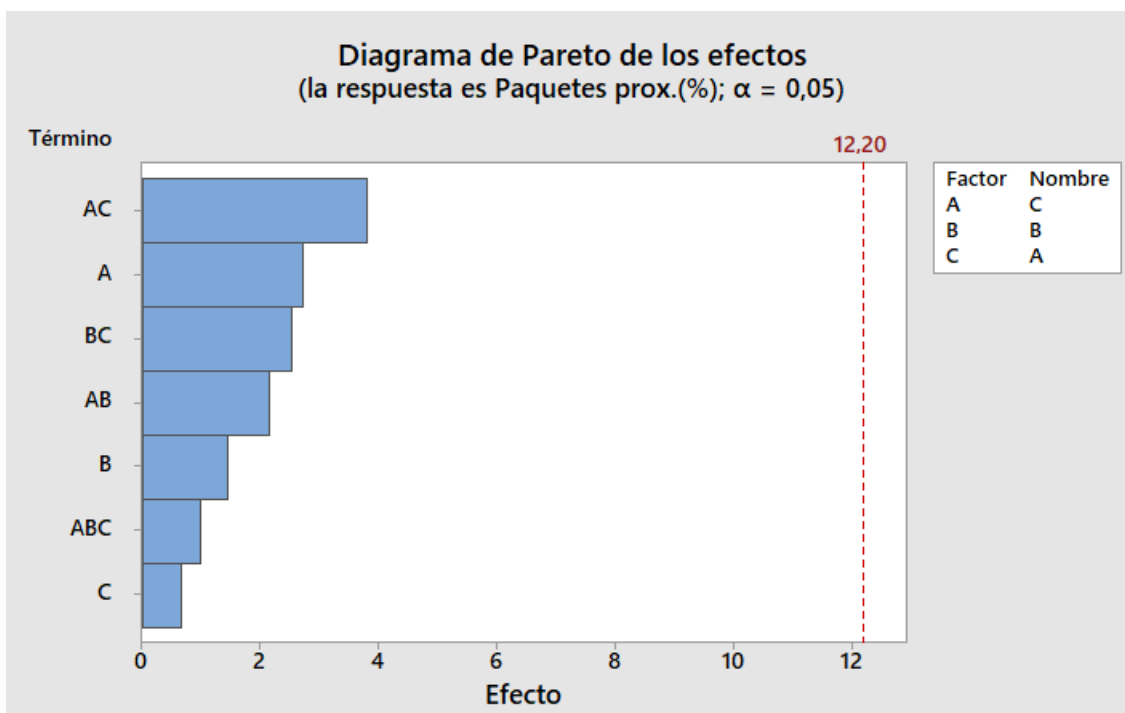


Gráfico A- 22. Diagrama de Pareto, paquetes próximos

