



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3498>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Parameterization of the extrusion process for balanced feed through factorial experimental designs

Parametrização do processo de extrusão para alimentação balanceada através de planejamentos experimentais fatoriais

Jaime Iván Acosta-Velarde ^I

ji_acosta@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5295-8531>

Lucia Monserrath Silva-Déley ^{II}

lucia.silva@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6660-8102>

Juan Diego Erazo-Rodríguez ^{III}

juan.erazo@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0152-5645>

Yeliber Alfredo Aguirre-Manzaba ^{IV}

yeliber.aguirre@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-8914-3925>

Marco Leonardo Vega-Arguello ^V

marco.vega@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-7610-3310>

Correspondencia: ji_acosta@epoch.edu.ec

***Recibido:** 04 de junio de 2023 ***Aceptado:** 12 de julio de 2023 * **Publicado:** 10 de agosto de 2023

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- II. Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- IV. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
- V. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

Resumen

El objetivo de la investigación fue generar un modelo paramétrico del proceso de extrusión en la producción de alimento balanceado para perros por medio de diseños experimentales considerando inicialmente cuatro factores de tal manera que se obtenga condiciones de operación óptimas con el propósito de reducir el porcentaje de producto reprocesado por causa de un exceso de humedad en el producto final. Se aplicó un diseño factorial 24 que dio lugar a un diseño factorial 23 colapsado para determinar el efecto significativo de los factores bajo estudio en el proceso de extrusión, posteriormente se aplicó un diseño factorial 23 en el proceso de secado para lograr productos con el porcentaje de humedad especificada entre 8,7 y 9,3 %.

Los factores que se consideraron para el diseño experimental 24 en el proceso de extrusión fueron: cantidad de agua en el acondicionador (%), temperatura del acondicionador (°C), carga de la mezcla (%) y velocidad de cuchilla, con dos niveles en cada factor. En cuanto al proceso de secado se aplicó un diseño experimental 23 con dos replicas. La humedad del producto extruido, la velocidad de la banda del secador y temperatura del secador fueron los factores de interés con dos niveles por factor, se determinó como variable respuesta la humedad del producto, que en condiciones iniciales generaba 2% de reproceso por encontrarse fuera de especificaciones. Con la experimentación se determinó la parametrización óptima de operación alcanzando una reducción a 0,27% de producto reprocesado por lote, con un aumento de la productividad del 2% y una reducción de costos por reproceso del 87% aproximadamente.

Palabras Claves: Proceso de extrusión; Diseño factorial 2k; Productividad.

Abstract

The objective of the research was to generate a parametric model of the extrusion process in the production of balanced food for dogs through experimental designs initially considering four factors in such a way that optimal operating conditions are obtained with the purpose of reducing the percentage of product. reprocessed due to excess moisture in the final product. A 24 factorial design was applied that gave rise to a collapsed 23 factorial design to determine the significant effect of the factors under study in the extrusion process, later a 23 factorial design was applied in the drying process to achieve products with the percentage of Specified humidity between 8.7 and 9.3%.

The factors that were considered for the experimental design 24 in the extrusion process were: amount of water in the conditioner (%), conditioner temperature (°C), mix load (%) and blade speed, with

two levels on each factor. Regarding the drying process, an experimental design 2³ with two replicates was applied. The humidity of the extruded product, the speed of the dryer band and the temperature of the dryer were the factors of interest with two levels per factor, the humidity of the product was determined as a response variable, which in initial conditions generated 2% reprocessing due to being outside of specifications. With the experimentation, the optimal parameterization of the operation was determined, reaching a reduction of 0.27% of reprocessed product per batch, with an increase in productivity of 2% and a reduction in costs per reprocessing of approximately 87%.

Keywords: extrusion process; 2k factorial design; Productivity.

Resumo

O objetivo da pesquisa foi gerar um modelo paramétrico do processo de extrusão na produção de ração balanceada para cães através de delineamentos experimentais considerando inicialmente quatro fatores de forma que sejam obtidas condições ótimas de operação com a finalidade de reduzir o percentual de produto reprocessado devido ao excesso de umidade no produto final. Foi aplicado um planejamento fatorial 2⁴ que deu origem a um planejamento fatorial 2³ colapsado para determinar o efeito significativo dos fatores em estudo no processo de extrusão, posteriormente foi aplicado um planejamento fatorial 2³ no processo de secagem para obter produtos com a porcentagem de umidade especificada entre 8,7 e 9,3%.

Os fatores que foram considerados para o planejamento experimental 2⁴ no processo de extrusão foram: quantidade de água no condicionador (%), temperatura do condicionador (°C), carga de mistura (%) e velocidade da lâmina, com dois níveis em cada fator. Quanto ao processo de secagem, foi aplicado um delineamento experimental 2³ com duas repetições. A umidade do produto extrusado, a velocidade da banda do secador e a temperatura do secador foram os fatores de interesse com dois níveis por fator, a umidade do produto foi determinada como variável de resposta, que nas condições iniciais gerou 2% de reprocessamento por estar fora das especificações. Com a experimentação, determinou-se a parametrização ótima da operação, chegando a uma redução de 0,27% de produto reprocessado por lote, com aumento de produtividade de 2% e redução de custos por reprocessamento de aproximadamente 87%.

Palavras-chave: processo de extrusão; planejamento fatorial 2k; Produtividade.

Introducción

La producción de alimentos balanceados para animales ya sea en forma de pellets o en polvo, está orientada a mejorar el crecimiento y cuidado de animales de producción y de compañía por tanto contribuyen con el desarrollo y bienestar animal. Las empresas de este ramo buscan fomentar el consumo de alimentos balanceados limpios y con calidad a través de la mejora continua de sus procesos utilizando una variedad de estrategias entre las cuales destaca el uso de técnicas estadísticas como una alternativa para el control y disminución de desperdicios y reprocesos que causan pérdidas económicas para el productor e insatisfacción del cliente. Los cereales, harinas de carne, pescado, restos de viseras de animales de granja y otros, constituyen la base de estos alimentos.

En la provincia de Chimborazo, empresas dedicadas a la producción de alimento balanceado para animales intentan reducir los costos de producción para mantenerse en el mercado y competir con productos de marcas importadas. Se ha determinado que una de las causas que afectan los costos de producción son los reprocesos y la variabilidad en la calidad del producto final. Ante tal situación, existe la necesidad de aplicar e implementar técnicas y herramientas que permitan, de forma sistemática, reducir y controlar la variabilidad de las características inherentes a la calidad requeridas por el cliente y el productor que pretende reducir los costos de producción y consecuentemente aumentar la productividad y competitividad.

El proceso de extrusión es la operación de moldear una masa, forzándola a través de una matriz para lograr el producto final principalmente en forma de pellet, este proceso responde a un sistema primario de cocción continua en la producción comercial de la mayoría de los alimentos extrusados (Mathias, 2019). El aumento de la temperatura de extrusión y el contenido de aceite permite aumentar la dureza de los extruidos, así como aumentar el contenido de humedad (Alvarado-González, et al. 2021)

El alimento balanceado para animales es un compuesto que se obtiene mediante la cocción, formado, mezclado, texturizado y moldeo que incluyen materias primas de origen animal y vegetal mediante el uso de máquinas extrusoras. Estos balanceados contienen concentraciones de todos los requerimientos nutricionales que las mascotas requieren en cada una de sus etapas fisiológicas y reproductivas lo que garantiza el crecimiento y mantenimiento saludable de los mismos. Su importancia económica, social y ambiental es evidente cuando los procesos que los producen son capaces de reducir la variabilidad, así como la cantidad de material reprocesado con la consecuente

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

reducción de los costos de producción, asegurando productos uniformes y de buena calidad para la población y mitigando la contaminación de los recursos naturales en general.

Según Anton y Luciano (2007), para hacer productos que sean aceptables en un mercado muy competitivo, la extrusión de alimentos exige el control de muchos parámetros que directa o indirectamente influyen en la aceptabilidad del consumidor. Las características del producto se derivan en parte de los parámetros críticos inducidos en las materias primas. Los parámetros que afectan la humedad, la expansión, solubilidad, absorción, color, sabor y textura del producto final son (Huber, 2001):

1. Humedad: humedad real del producto o extruido.
2. Entrada de energía térmica: calor de fluidos térmicos, vapor o electricidad que se transfiere a los ejes de la extrusoras, o inyección directa de vapor o cualquier otro tipo de aditivo líquido.
3. Entrada de energía mecánica: calor disipado en el extrudido causada por la acción de corte y bombeo en el barril de extrusión.
4. Tiempo de retención: tiempo total del producto en cualquier región del proceso de extrusión.

Diferentes investigaciones han demostrado que la variación de estos factores afecta a la eficiencia del proceso lo cual puede alterar el valor nutricional, la productividad y costos de producción. Mediante la parametrización y control de las condiciones de operación de los equipos que se consiguen utilizando técnicas de mejora como son los diseños factoriales experimentales consideradas técnicas estadísticas efectivas de gran aplicación en la industria e investigación se pretende lograr un alto desempeño de los procesos (Moyano et al. 2018).

A través del estudio con técnicas de diseño experimental se plantea un modelo para determinar los factores que influyen significativamente en el porcentaje de humedad en el producto extruido y secado, y posteriormente parametrizar el proceso con variabilidad reducida y que cumpla con los requerimientos establecidos, de tal forma que los programas de control de calidad garanticen la producción de productos que satisfacen a los clientes (Orrea et al., 2011)

Las técnicas de diseño de experimentos se aplican con frecuencia para la solución de problemas tales como la optimización, factores determinantes y diseño de mezclas. El diseño experimental es el método más efectivo y económico para la determinación de las variables que se relacionan entre sí, la determinación de sus niveles críticos para su aplicación en diferentes procesos industriales (Álvarez et al., 2018)

En el sentido más estricto el diseño experimental como herramienta estadística para el mejoramiento de la productividad, va más allá del simple monitoreo impuesto por las técnicas de control estadístico para el análisis de los factores involucrados en la producción de alimentos para animales. (Cruz, et al. 2008)

La aplicación de determinados principios y técnicas sobre datos experimentales que varían según los diferentes métodos de diseño de experimentos es posible obtener conclusiones acertadas del proceso en estudio con un elevado grado de validez y consistencia. Un diseño de experimentos representa la planificación detallada de un programa de ensayos, y la elección acertada del mismo permite obtener una mayor cantidad de información a partir del trabajo experimental realizado. (Menéndez et al. 2008))

Según Cruz, et al (2008) los arreglos ortogonales balanceados son una de las características importante de los experimentos factoriales sobre los que se sustentan los modelos 2^k , lo que facilita su análisis y permite que cada uno de los efectos pueda ser calculado de manera independiente. El diseño factorial, muy útil en el mejoramiento de procesos y producto, es el llamado experimento con “k” factores cada uno a dos niveles. El arreglo es llamado diseño factorial 2^k . Estos diseños tienen un análisis muy simple y son la base de muchos otros diseños útiles (Medina&López, 2011)

Metodología

Previo a la preparación del estudio experimental, los principales ingredientes fueron caracterizados para establecer una correcta proporción de cada uno y un equilibrio de nutrientes a través de la formulación determinada por el fabricante basada en los requerimientos nutricionales que el alimento balanceado debe proporcionar al animal de compañía

Para la realización de un diagnóstico inicial de las variables de interés, se utilizaron fuentes documentales como fichas de liberación, control de humedad y densidad. De acuerdo con Medina y López, (2011) el diseño experimental, como una metodología basada en herramientas matemáticas y estadísticas, permitirá:

- Seleccionar la estrategia experimental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo costo.
- Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Por lo tanto, se identifican factores que tienen mayor impacto en la calidad del producto, la variable de respuesta, así como el diseño experimental factorial que, de acuerdo con el objetivo planteado corresponde a un diseño experimental 2^4 completo replicado que consiste en el estudio de cuatro factores con dos niveles en cada factor.

Los principios fundamentales para obtener resultados con un alto grado de confiabilidad son la aleatoriedad y repetibilidad los cuales se lograron utilizando técnicas de números aleatorios para sistematizar el orden de las corridas experimentales, de tal forma que después de obtener los datos, estos cumplan con los supuestos que establecen los diseños experimentales como son: supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia. El cumplimiento de los supuestos determina que las corridas experimentales se llevaron a cabo de manera correcta y que los demás factores que intervienen en el proceso estuvieron bajo control y su influencia no fue significativa al momento de realizar las pruebas.

La humedad es una de las variables de interés debido a que el proceso arrojaba productos con una humedad entre 10% y 11%, incumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas entre 8,9% y 9,3% generando altos costos de producción por reprocesos, retrasos en la producción y aumento de material en cuarentena. La humedad es determinada utilizando una termobalanza Mettler Toledo HE53/03 en un tiempo promedio de entre 8 minutos y 10 segundos por muestra.

Para la determinación de los factores críticos a ser estudiados por medio de la experimentación, se aplicó un diagrama de Pareto (Gráfico 1) con el propósito de priorizar los problemas que afectan a la productividad y calidad del producto, Se observa que el exceso de humedad, así como la selección errónea de parámetros de operación corresponden a un 39% de los problemas más recurrentes en el proceso de extrusión.

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

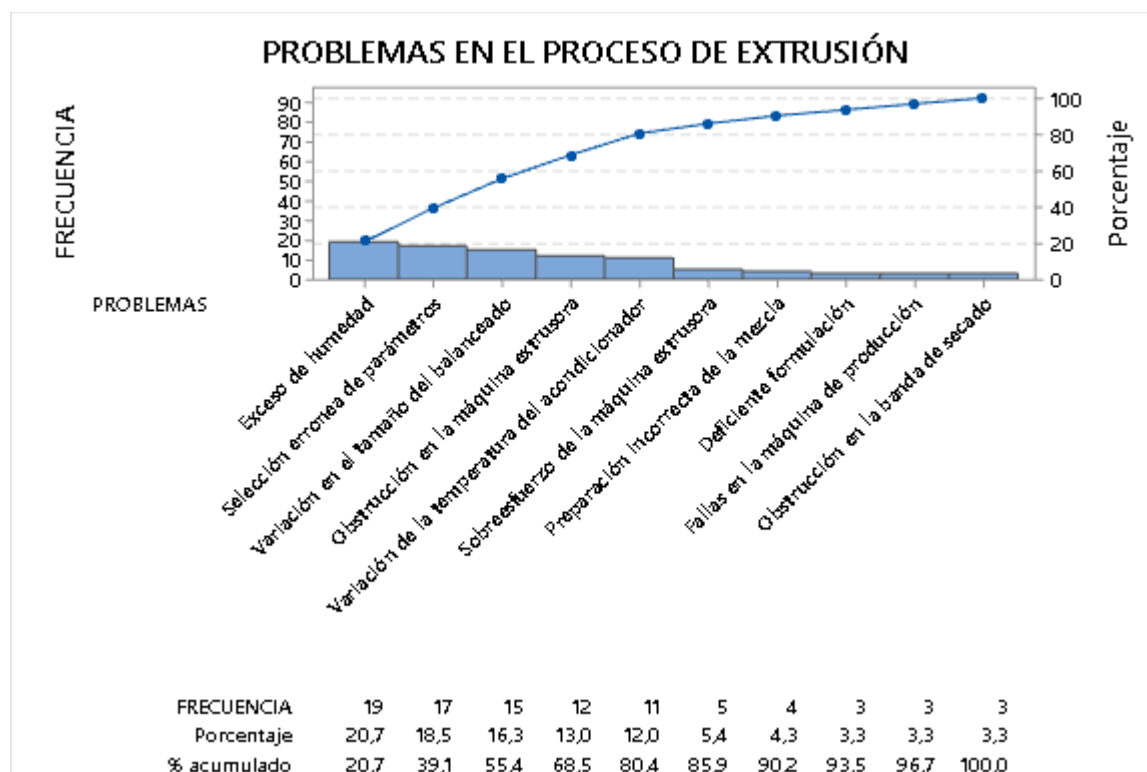


Gráfico 1. Diagrama de Pareto. Problemas en el proceso de extrusión

Factores como el porcentaje de agua, temperatura del acondicionador, carga de mezcla y velocidad de las cuchillas son considerados críticos por cuanto se sabe por experiencia que influyen tanto en la humedad y el tamaño de pellet del producto final (balanceado). Por lo tanto, la selección del diseño factorial esta en función de los cuatro factores.

Cada factor se estudia en dos niveles. Por razones de confidencialidad se omite el nombre de la empresa y los valores específicos de los niveles en los cuales se realizaron los experimentos (Tabla 1)

Tabla 1. Factores críticos con niveles codificados

FACTOR	CÓDIGO	NIVELES	
		BAJO	ALTO
Agua del acondicionador (%)	A	-	+
Temperatura del acondicionador	B	-	+
Carga de la mezcla (%)	C	-	+
Velocidad de cuchilla	D	-	+

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Identificados los factores con sus respectivos niveles, se establece como la variable respuesta la humedad del producto extruido y la humedad del producto después del proceso de secado. Se plantean las hipótesis alternativas que se desean comprobar con respecto a los factores, así como sus interacciones influyen en la humedad del producto terminado.

La estrategia experimental es aplicar el diseño factorial 2^4 completo que consiste en realizar 16 tratamientos con dos replicas por cada uno, las cuales son ejecutadas de forma aleatoria dando como resultado los datos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Humedad del producto extruido (%) partir del diseño experimental 2^4

TRATAMIENTOS	FACTORES				HUMEDAD DEL PRODUCTO EXTRUIDO (%)	
	A	B	C	D	I	II
1	-	-	-	-	17,92	17,52
2	-	-	-	+	16,49	17,28
3	-	-	+	-	17,64	18,2
4	-	-	+	+	18,02	18,71
5	-	+	-	-	18,78	18,02
6	-	+	-	+	19,01	18,54
7	-	+	+	-	18,23	19,04
8	-	+	+	+	18,9	19,3
9	+	-	-	-	19,73	20,75
10	+	-	-	+	19,79	20,22
11	+	-	+	-	18,61	19,2
12	+	-	+	+	18,92	18
13	+	+	-	-	22,37	20,21
14	+	+	-	+	20,26	19,69
15	+	+	+	-	22,16	23,42
16	+	+	+	+	21,97	22,14

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Se emplea el software Minitab v9 para el análisis estadístico, se determina el cumplimiento del supuesto de normalidad del diseño experimental, la información procesada muestra el cumplimiento de este supuesto (Gráfico 2) dado que los residuos evidencian una tendencia lineal correspondiente a la normalidad. Esto significa que la ejecución de las pruebas experimentales se llevó a cabo controlando los factores de manera efectiva.

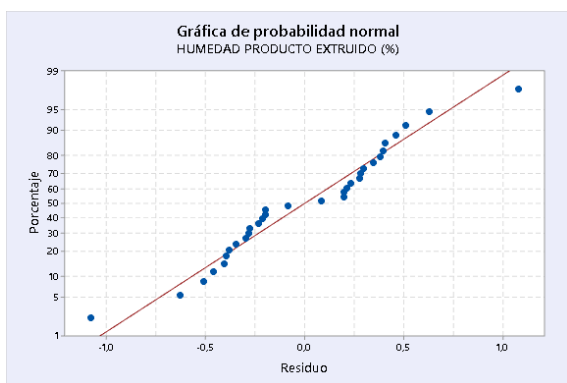


Gráfico 2. Gráfica de normalidad de residuos

Se realiza un análisis de normalidad de efectos estandarizados (Gráfico 3) con el propósito de identificar los efectos significativos y no significativos sobre la humedad del producto extruido. La gráfica de normalidad de efectos estandarizados muestra los efectos significativos con color rojo, es decir, aquellos que no se ajustan al modelo lineal de normalidad y se observa que el factor D (Velocidad de Cuchilla) tanto como factor principal o con las interacciones, no influye en la humedad del producto extruido lo cual sugiere aplicar la técnica de colapsación del diseño factorial 2^4 a un 2^3 cuyo principio establece que el factor debe ser eliminado del estudio dando como ventaja un aumento de grados de libertad en el error aleatorio y un incremento de replicas en los ocho tratamientos, resultado de la colapsación.

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

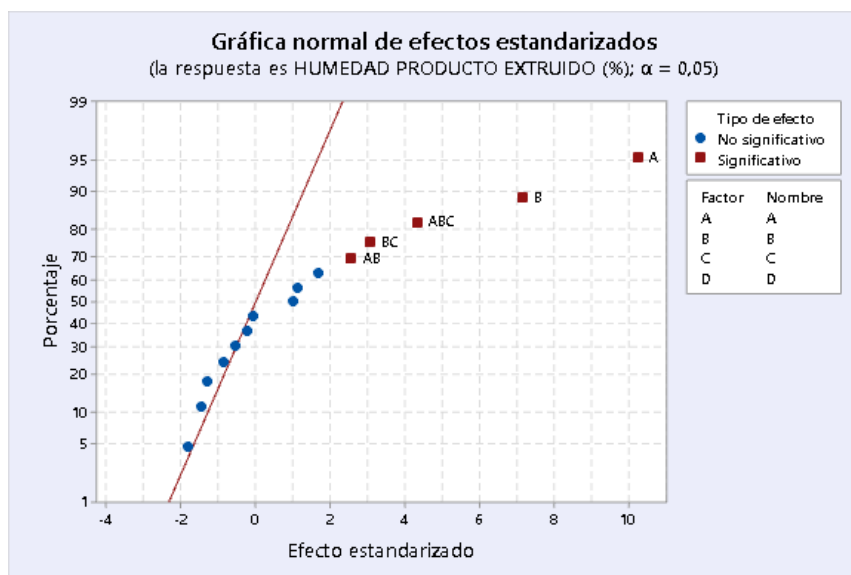


Gráfico 3. Gráfica de normalidad de efectos estandarizados para humedad

Se calcula el coeficiente de determinación ajustado R^2 el cual es un indicador clave que representa el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo, es decir, por los factores bajo estudio representando el 85,95%, valor que le da validez al estudio tomado en cuenta que lo mínimo en los estudios experimentales debe ser del 70%.

Resumen del modelo

R-	R-cuad.
S	cuad. (ajustado)
0,617839	92,75% 85,95%

El método de colapsación del diseño factorial permite modificar la tabla de resultados incrementando las replicas por tratamiento y reduciendo los tratamientos a ocho, es decir ajusta el diseño factorial 2^4 con dos replicas a un diseño factorial 2^3 con cuatro réplicas tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Humedad del producto extruido con un diseño factorial colapsado a 2^3

TRATAMIENTOS	FACTORES			HUMEDAD DEL PRODUCTO EXTRUIDO (%)			
	A	B	C	I	II	III	IV
1	-	-	-	17,92	17,52	16,49	17,28
2	-	-	+	17,64	18,2	18,02	18,71

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

3	-	+	-	18,78	18,02	19,01	18,54
4	-	+	+	18,23	19,04	18,9	19,3
5	+	-	-	19,73	20,75	19,79	20,22
6	+	-	+	18,61	19,2	18,92	18
7	+	+	-	22,37	20,21	20,26	19,69
8	+	+	+	22,16	23,42	21,97	22,14

Al procesar la información se obtiene estadísticamente el coeficiente de determinación ajustado cuyo valor no ha variado significativamente siendo este del 84,85% en comparación al diseño factorial inicial

Resumen del modelo

S	R- cuad.	R-cuad. (ajustado)
0,641690	88,27%	84,85%

Se aplica la técnica ANOVA (Análisis of Variance) con un nivel de confianza del 95% para determinar los efectos significativos que influyen en la humedad del producto extruido. Posteriormente se realiza el método gráfico de diferencias mínimas significativas (DMS) para la interacción triple. A partir de esta gráfica se puede determinar las condiciones paramétricas que debe mantener el proceso de extrusión para lograr productos con la humedad requerida.

Para la parametrización del proceso de secado se considera tres factores con dos niveles, lo cual sugiere un diseño factorial 2^3 con dos replicas. (Tabla 4)

Tabla 4. Factores para el proceso de secado

FACTOR	CÓDIGO	NIVELES	
		BAJO	ALTO
Humedad de producto extruido	A	-	+
Velocidad de la banda del secador	B	-	+
Temperatura del secador	C	-	+

Con la selección de los factores y siguiendo un plan de muestreo aleatorio se realizan las corridas experimentales dando como resultado valores que se encuentran en la tabla 5

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Tabla 5. Humedad del alimento balanceado después del proceso de secado

TRATAMIENTOS	FACTORES			HUMEDAD DEL PRODUCTO	
	A	B	C	I	II
1	-	-	-	8,7	8,76
2	-	-	+	9,15	9,1
3	-	+	-	9,21	9,19
4	-	+	+	9,3	9,27
5	+	-	-	9,42	9,45
6	+	-	+	9,51	9,57
7	+	+	-	9,6	9,64
8	+	+	+	9,8	9,83

Resultados y discusión

El cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza es indispensable para garantizar la validez del diseño experimental. Los resultados después de aplicar el método de colapsación que ajustó el diseño factorial a un 2^3 con cuatro replicas por tratamiento muestran que los residuos se distribuyen de forma normal según la gráfica de normalidad mientras que la gráfica de homocedasticidad muestra una variación mayor en el séptimo tratamiento ($A^+B^+C^-$).

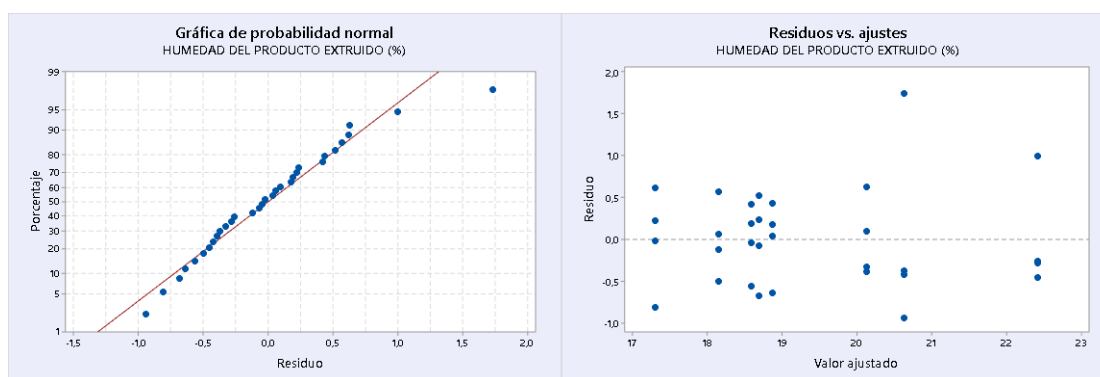


Gráfico 4. Normalidad y Homocedasticidad de residuos

A través de la técnica ANOVA, técnica utilizada ampliamente en estadística paramétrica para determinar diferencias significativas de los efectos presentes en la experimentación se muestran los resultados correspondientes al estudio de los tres factores. (Tabla 6)

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Tabla 6. Análisis de Varianza para humedad del producto extrusado

Fuente	GL	SC	CM	F calculado	F crítico	Criterio de decisión
A	1	40,140	40,140	97,48	4,26	S
B	1	19,593	19,593	47,58		S
C	1	1,080	1,080	2,62		NS
A*B	1	2,508	2,508	6,09		S
A*C	1	0,296	0,296	0,72		NS
B*C	1	3,564	3,564	8,66		S
A*B*C	1	7,182	7,182	17,44		S
Error	24	9,882	0,411			
Total	31	84,249				

EL ANOVA con un nivel de confianza del 95% muestra que la cantidad de agua incorporada en el acondicionador (%) y la Temperatura del acondicionador (°C) y su interacción son altamente significativas es decir influyen en la variación de la humedad del producto extruido, así como la interacción entre la temperatura del acondicionador (°C), la carga de mezcla (%) y la interacción entre los tres factores. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta la relación que existe en la interacción triple. Esto se consigue con la gráfica de intervalos LSD (Gráfico 5)

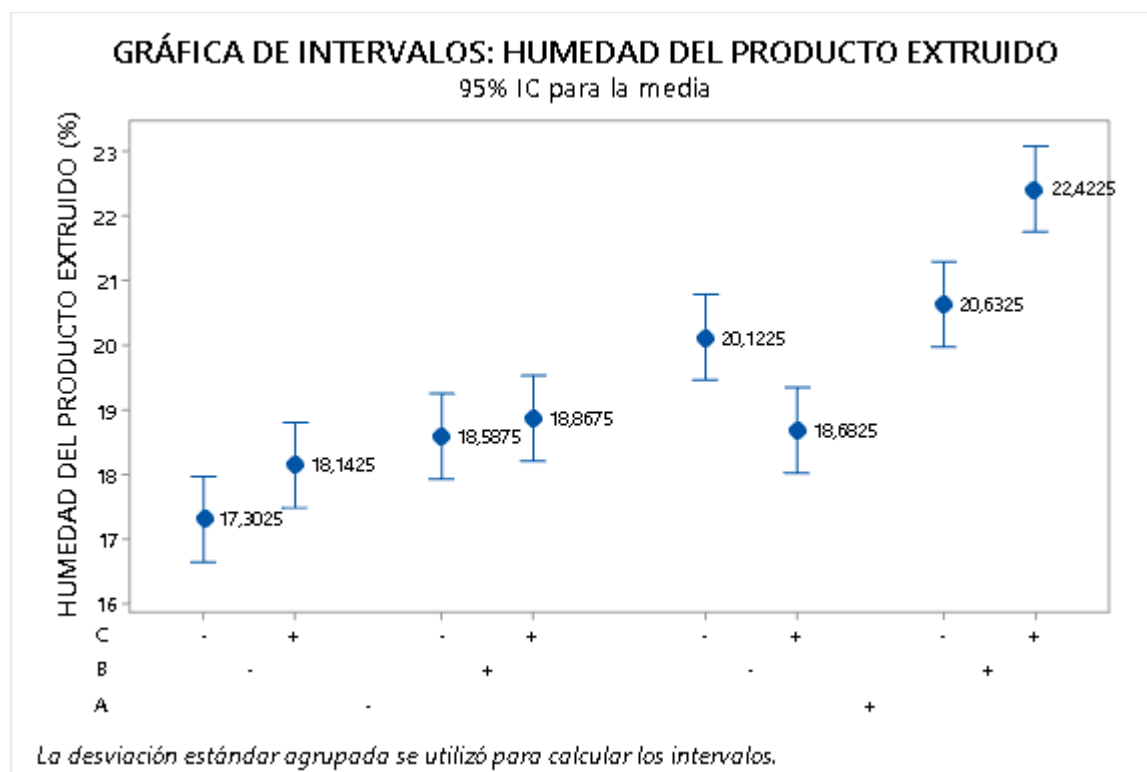


Gráfico 5. Gráfica de interacción triple

Para minimizar el porcentaje de humedad del producto después del proceso de extruido, los parámetros deben configurarse de manera que el porcentaje de agua (A) debe añadirse en su nivel bajo, la temperatura del acondicionador (B) debe mantenerse baja y la carga de mezcla debe ser alto. A continuación, el producto pasa al proceso de secado, siendo la humedad del producto extruido uno de los factores a tomarse en cuenta para un nuevo diseño experimental.

La modelación del proceso de extrusión considerando los tres factores es expresada a través de un modelo de regresión lineal que se muestra a continuación como resultado del efecto que tienen los factores sobre la variable respuesta.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} & \textit{Humedad del producto extruido}(\%) \\ & = 19,34 + 1,12A + 0,78B + 0,28AB + 0,33BC + 0,47ABC \end{aligned}$$

Este modelo permite determinar valores de humedad del producto de forma analítica dentro de la región experimental, al variar los parámetros dentro de los niveles establecidos para cada factor.

Parametrización del proceso de secado

El producto extruido pasa al proceso de secado para ajustar la humedad al valor deseado con el propósito de que el producto adquiera la calidad esperada. Después de obtener los datos de humedad variando los niveles de los factores bajo estudio según la estrategia experimental, se comprueba el supuesto de normalidad y homocedasticidad para, posteriormente aplicar el ANOVA. (Gráfico 6)

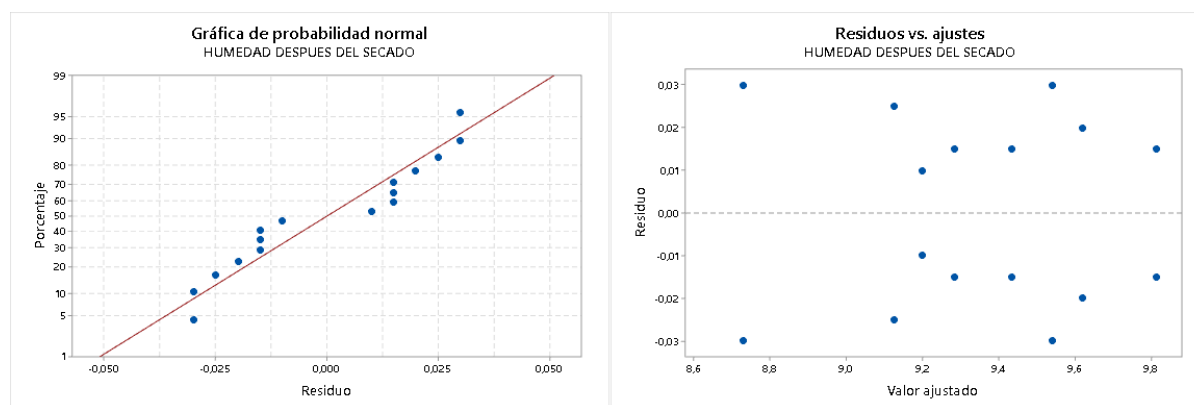


Gráfico 6: Diagramas de normalidad y homocedasticidad de residuos

El análisis de varianza (ANOVA) muestra que tanto los efectos principales como las interacciones dobles y la triple son significativos con un nivel de confianza del 95%. (Tabla 7)

Tabla 7. Análisis de Varianza para humedad después del secado

Fuente	GL	SC	MC	F calculado	F crítico	Criterio de Decisión
A	1	1,071	1,071	1190,25	5,32	MS
B	1	0,297	0,297	330,03		MS
C	1	0,152	0,152	169,00		MS
A*B	1	0,007	0,007	8,03		S
A*C	1	0,008	0,008	9,00		S
B*C	1	0,012	0,012	13,44		S
A*B*C	1	0,040	0,040	44,44		S
Error	8	0,007	0,0009			
Total	15	1,595				

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

El coeficiente de determinación R^2 muestra un 99 % de variabilidad explicada por el modelo, lo cual conduce a garantizar que los resultados son válidos para tomar decisiones que contribuyan al mejoramiento de la productividad

Resumen del modelo

R-	R-cuad.
S	cuad. (ajustado)
0,03	99,55% 99,15%

Después de interpretar el ANOVA se elabora la gráfica de interacción triple, debido a que, cuando existe efecto de interacción, las conclusiones se generan a partir de esta gráfica. (Grafico 7)

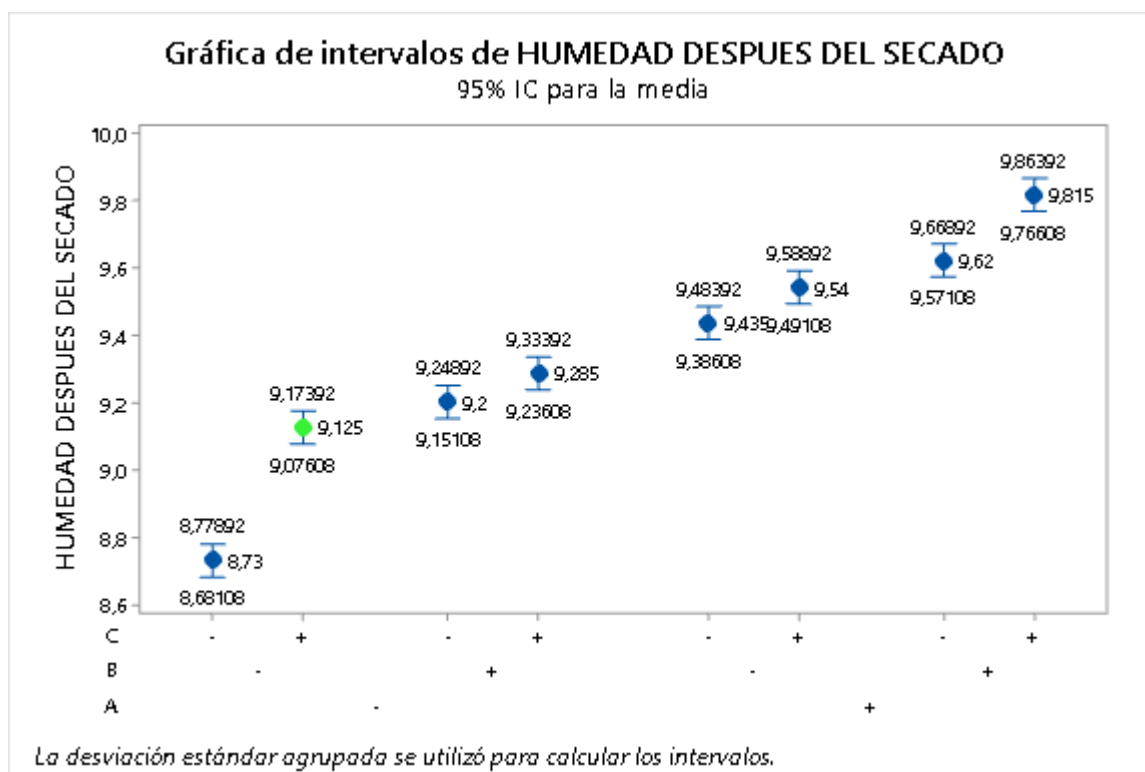


Gráfico 7. Diagrama de interacción triple entre factores A, B, C

Con el estudio experimental se logra parametrizar el proceso de extrusión y secado de alimento balanceado para perros de tal manera que el porcentaje de humedad se encuentre dentro de los rangos especificados entre 8,9% y 9,3%. La grafica de interacción triple entre los factores: humedad del producto extruido (A), velocidad de la banda del secador (B) y temperatura de secador (C) muestra

que el mejor tratamiento para alcanzar un promedio de humedad de 9,125% es necesario operar con el porcentaje de humedad del producto extruido bajo, la velocidad baja del secador y una temperatura de secado en su nivel alto.

La ecuación de regresión lineal que modela adecuadamente el comportamiento del porcentaje de humedad en el alimento balanceado después del secado es:

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned} \text{HUMEDAD DE SECADO (\%)} \\ = 9,34 + 0,26 A + 0,14B + 0,10C - 0,02 AB - 0,03 AC + 0,03 BC \\ + 0,05 ABC \end{aligned}$$

Con la parametrización de los procesos de extrusión y secado se redujo la variabilidad en la humedad del extruido y a la vez se controló y mantuvo la humedad del producto final después del proceso de secado en las especificaciones predeterminadas. Esto contribuyó al aumento de la productividad debido a que hubo una disminución de desperdicio o material reprocesado y que el producto final se mantenga sin alteraciones microbiológicas más tiempo.

Por cada lote de producción (15.000 Kg) se reprocesaba 2,1 % del producto lo cual constituye un incremento en el costo por lote de producción. Después de la parametrización al modificar los niveles de cada factor mencionados en el estudio, el porcentaje de material reprocesado se redujo a 0,27% aumentando la productividad (Gráfico 8)

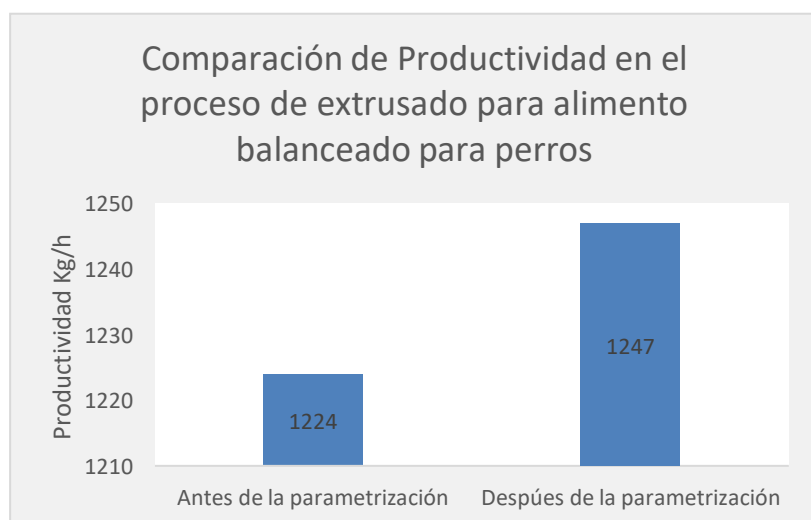


Gráfico 8. Comparación de la productividad

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

En términos de productividad se puede afirmar que aumentó de 1.224 Kg/h a 1.247 Kg/h de producto final (alimento balanceado) es decir un incremento del 1,8 % aproximadamente con la consecuente reducción de costos como se muestra en la figura 10

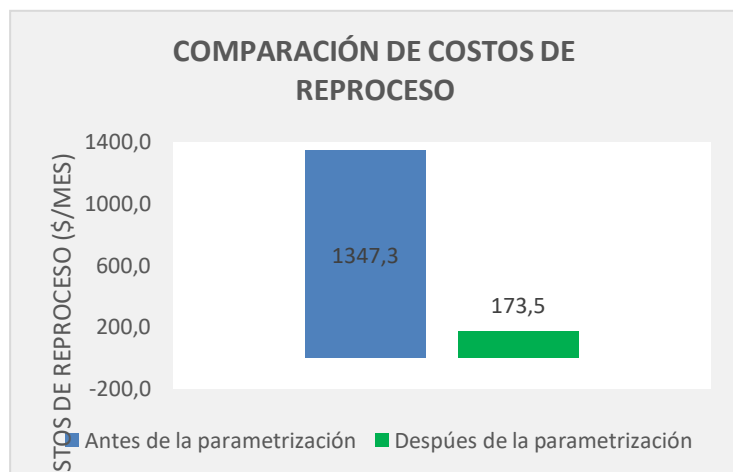


Gráfico 9. Comparación de la productividad

Discusión

Varias investigaciones han demostrado la aplicación de los diseños factoriales 2^k a procesos de fabricación y parametrización de equipos o máquinas cuyos resultados han logrado tener éxito en la solución de los problemas. En este estudio se ha aplicado el método de colapsación para simplificar y mejorar el análisis estadístico, lo cual ha facilitado la comprensión de e interpretación de los resultados sobre el proceso de extrusión.

El uso de técnicas estadísticas como el ANOVA, ampliamente utilizada en investigaciones orientadas a la mejora de los procesos industriales principalmente, ha permitido modelar de forma experimental el comportamiento funcional de tales procesos y equipos, es así que a lo largo del tiempo, se ha configurado de manera óptima los parámetros de operación de los procesos, lo que se corrobora con este estudio, alcanzando mejoras significativas en los indicadores de productividad, en consecuencia se presenta una mejora de la calidad de los productos, sin embargo el costo que implica la experimentación, debe ser analizado antes de la planeación selección y ejecución del diseño experimental para que sea llevado a cabo cuidadosamente.

Conclusiones

- Los resultados demuestran que la aplicación de técnicas estadísticas combinadas con diseños experimentales contribuye a la mejora continua de los procesos de producción dando lugar a un incremento de indicadores claves como la productividad y calidad, no solo de los productos finales sino también de los procesos en si.
- A través del estudio se concluye que un diseño factorial experimental 2^k puede ser flexible en el sentido de que aún con datos de entrada obtenidos con la experimentación, se puede cambiar el diseño a uno mas simplificado optimizando el proceso de los datos y simplificando el análisis estadístico, tal como se demostró al colapsar el diseño factorial 2^4 aun diseño factorial 2^3 lo que incremento las replicas por tratamiento y los grados de libertad en el error aleatorio, necesario para la validez del estudio
- La importancia de seleccionar aquellos factores que inciden significativamente en los procesos radica en que la elección del diseño factorial también será la adecuada y económica siempre y cuando se mantenga controlado otros factores que se encuentran implícitos en el proceso pero que no forman parte del estudio.

Los procesos de producción de alimento balanceado para animales requieren un estudio continuo de los parámetros de operación de los equipos e incluso los procesos de control de calidad a través de estudios R&R lo que contribuirá de mejor manera al incremento de la productividad y calidad del producto, tal como se demostró en el estudio en el cual la productividad aumento un 2% y hubo una reducción de costos de reproceso en un 87% por mes aproximadamente, cumpliendo satisfactoriamente los requerimientos de los clientes.

Referencias

- Álvarez-Gil, Laura, Guerra-Sandoval, Jennifer, Rojas-Reyes Néstor .(2018). Diseño factorial 2k aplicado a la caracterización reológica de suspensiones de caolín. *PROSPECTIVA*, 16(1), 18-25. ISSN: 1692-8261. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496259178002>
- Anton A. A., Luciano F. B. (2007). Instrumental texture evaluation of extruded snack foods: a review. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*. 5(4), 245-25. ISSN: 1135-8122. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72440501>
- Claudio, Mathias. (2019). Proceso de extrusion y sus principios. *All Extruded*. Disponible en: <https://allextruded.com/entrada/proceso-de-extrusion-y-sus-principios-20306/>
- Cruz Restrepo, Eduardo Arturo, Restrepo Correa, Jorge Enrique, Medina Varela Pedro Daniel. (2008). Comparación de la Metodología Clásica y Taguchi del Diseño Experimental en un Ingenio Azucarero del Valle del Cauca. *Tecnura*, 12(23), 46-59. ISSN: 0123-921X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257020605006>
- Delgado, Efred, Alvarado-González, Óscar, Medrano-Roldán, Hiram, Rodríguez-Miranda, Jesús, Carrete-Carreón, Francisco, & Reyes-Jáquez, Damián. (2020). Efecto de la temperatura de extrusión, humedad y contenido del aceite de girasol sobre las propiedades funcionales y digestibilidad de alimentos para ganado bovino. *Abanico veterinario*, 10, e117. Epub 07 de mayo de 2021. <https://doi.org/10.21929/abavet2020.32>
- Guaman Lozada, D.; Rodriguez Pinos, A.; Santiana, C. Yuquilema, B.(2022). Experimental design for the optimization of dry-pressed ceramic bricks (Dry-Press). *Rev. ing. constr*, vol.37, pp.316-323. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-732022000300316&lng=es&nrm=iso. ISSN 0718-5073.
- Huber, G. (2001). Snack Foods from Cooking Extruders, pp 1-33. In R. W. Lucas; L. W. Rooney (ed.), *Snacks Food Processing*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL
- Medina Varela, Pedro Daniel, Lopez Reyes, Angela Maria. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados. *Scientia Et Technica*, XVII (47), 101-106. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84921327018>
- Menéndez, G.; Bonavetti, V.L.; Irassar, E.F. (2008). Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón *Revista de la Construcción*, vol. 7, núm. 1, pp. 94-104 Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612580009>
-

Parametrización del proceso de extrusión para alimento balanceado a través de diseños experimentales factoriales

Moyano Alulema, Julio, Santillán Mariño, Carlos, Sánchez Acevedo, José, Rea Tixilema, Mery, Guaman Lozano Ángel (2018). Diseño factorial mixto para control de temperaturas en las inyectoras del proceso productivo de calzado. ECA Sinergia, 9(1), 109-117. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=588562086010>

Orrea Espinal, Alexander Alberto, Medina Varela, Pedro Daniel, Velez Jaramillo Sebastian. (2011). Mejoramiento del Proceso de Manufactura de Poleas para Hornos Rotatorios: Un enfoque desde el diseño experimental. Scientia Et Technica, XVI (48), 35-40. ISSN: 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84922622007>

©2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).