

Experimental Analysis of the Egg White Cooking Process through a Trifactorial Design

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dr¹; V. A. A. Espinoza, Dr²; Angie L. Atoche Puelles, Mg³; Nicole Fernanda Mendieta Pisco⁴; Camila Verónica Montalvo Correa⁵; Daniela Fernanda Camacho Noriega⁶; Alvaro Walter Colan Ramos⁷

¹National University of San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, ²National University of Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe, ³Federal University of Minas Gerais, Brazil, angie.puelles@gmail.com, ^{4,5,6,7}Ricardo Palma University, Perú, 202310487@urp.edu.pe, 202311332@urp.edu.pe, 202310490@urp.edu.pe, 202311339@urp.edu.pe

Abstract - Thermal process optimization in the food industry is essential for reducing variability and improving operational standardization. This study, developed by Industrial Engineering students as part of the experimental activities of the Design of Experiments course, evaluated the effect of egg type, oil type, and pan type on egg white cooking time using a 2×2×2 trifactorial design with two replicates (16 experimental runs) conducted under strict principles of randomization, replication, and control of external variables. Data were processed using Analysis of Variance (ANOVA) at a 95% confidence level to determine the statistical significance of main effects and their interactions. Cooking surface material was the only main factor with a statistically significant effect ($p < .05$), producing an average difference of approximately 50 seconds between the Teflon pan (≈ 120 s) and the stainless-steel pan (≈ 170 s); a simple linear regression model confirmed this relationship with a coefficient of determination of $R^2 = 0.963$. A statistically significant interaction between egg type and oil type was also identified, indicating that the effect of one factor depends on the level of the other. This behavior is attributed to differences in heat transfer, thermal diffusivity, and thermal inertia between the evaluated materials. The study allowed students to apply advanced statistical tools (Excel and SPSS v.31) in a practical setting, strengthening their competencies in systems analysis and process optimization. It is concluded that proper equipment selection and the strategic combination of process inputs are decisive for optimizing cycle time, providing quantitative evidence for decision-making in food processes and demonstrating that systematic experimentation is essential for improving efficiency in both academic and industrial contexts.

Keywords— Design of experiments; factorial design; cooking process; factor interaction; heat transfer.

Análisis Experimental del Proceso de Cocción de la Clara de Huevo mediante un Diseño Trifactorial

Maria Elizabeth Puelles Bulnes, Dr¹; V. A. A. Espinoza, Dr²; Angie L. Atoche Puelles, Mg³; Nicole Fernanda Mendieta Pisco⁴; Camila Verónica Montalvo Correa⁵; Daniela Fernanda Camacho Noriega⁶, Alvaro Walter Colan Ramos⁷

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, mpuellesb@unmsm.edu.pe, ²Universidad Nacional del Callao, Perú, vaatochee@unac.edu.pe, ³Universidade Federal Minas Gerais, Brasil, angie.puelles@gmail.com, ^{4,5,6,7}Universidad Ricardo Palma, Perú, 202310487@urp.edu.pe, 202311332@urp.edu.pe, 202310490@urp.edu.pe, 202311339@urp.edu.pe

Resumen - La optimización de procesos térmicos en la industria alimentaria es fundamental para reducir la variabilidad y mejorar la estandarización operativa. El presente estudio, desarrollado por estudiantes de Ingeniería Industrial como parte de las actividades experimentales del curso de Diseño de Experimentos, evaluó el efecto del tipo de huevo, tipo de aceite y tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo, mediante un diseño trifactorial 2×2×2 con dos réplicas (16 corridas experimentales) ejecutadas bajo estrictos principios de aleatorización, replicación y control de variables externas. Los datos fueron procesados mediante Análisis de Varianza (ANOVA) con un nivel de confianza del 95%, permitiendo determinar la significancia estadística de los efectos principales y sus interacciones. Los resultados mostraron que el tipo de sartén fue el único factor principal con efecto estadísticamente significativo, generando una diferencia promedio de aproximadamente 50 segundos entre el sartén de teflón (≈120 s) y el de acero inoxidable (≈170 s); un modelo de regresión lineal confirmó esta relación con un coeficiente de determinación $R^2=0.963$. Asimismo, se identificó una interacción estadísticamente significativa entre el tipo de huevo y el tipo de aceite, lo que indica que el efecto de un factor depende del nivel del otro. Este comportamiento se atribuye a diferencias en la transferencia de calor, la difusividad y la inercia térmicas de los materiales evaluados (teflón frente a acero inoxidable). El estudio permitió a los estudiantes aplicar herramientas estadísticas avanzadas (Excel y SPSS v.31) en un escenario práctico, fortaleciendo sus competencias en análisis de sistemas y optimización de procesos. Se concluye que el control de herramientas y la selección estratégica de la combinación de insumos son determinantes para optimizar el tiempo de ciclo, aportando evidencia cuantitativa para la toma de decisiones en procesos alimentarios y demostrando que la experimentación sistemática es esencial para la mejora de la eficiencia tanto en contextos académicos como industriales.

Palabras clave- Diseño de experimentos; diseño factorial; proceso de cocción; interacción de factores; transferencia de calor.

I. INTRODUCCIÓN

En la Ingeniería Industrial, la optimización de procesos de transformación de alimentos es fundamental para garantizar la estandarización operativa y la eficiencia en el uso de recursos. La cocción de la clara de huevo, aunque se percibe como un procedimiento cotidiano, representa un fenómeno complejo de transferencia de calor en estado transitorio y desnaturalización proteica cinética. En este contexto, cualquier variabilidad en los parámetros de entrada puede alterar significativamente el tiempo de ciclo y la uniformidad del producto final, lo que

justifica el uso de herramientas estadísticas avanzadas para el control de procesos.

Bajo esta premisa, el presente estudio fue desarrollado por estudiantes del sexto ciclo de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial de la Universidad Ricardo Palma (URP) en Lima, Perú. El proyecto busca integrar los conocimientos teóricos del curso de Diseño de Experimentos (DoE) con una aplicación práctica y controlada. Se aplicó el modelo trifactorial que constituye una metodología robusta para evaluar simultáneamente múltiples variables y, fundamentalmente, sus interacciones de segundo o tercer orden [1][2].

Esta técnica permite determinar si el tiempo de cocción de la clara del huevo es sensible únicamente a factores aislados o si existen efectos sinérgicos entre las propiedades termofísicas de los insumos y el equipo utilizado. Así, el análisis deja de ser puramente empírico para convertirse en un estudio de la variabilidad del sistema [3].

Investigaciones previas en ingeniería alimentaria han demostrado que la eficiencia térmica en la fritura no depende solo de la fuente de calor, sino de la interfase térmica creada por el medio graso y la conductividad del sustrato [4]. Estudios sobre tratamientos superficiales y coeficientes de transferencia de calor sugieren que factores como la viscosidad del aceite y la difusividad térmica del material de cocción son críticos para minimizar la absorción de lípidos y optimizar el tiempo de proceso [5] [6] [7].

Finalmente, dado que todo proceso físico presenta una variabilidad inherente, el análisis estadístico mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) resulta indispensable para validar la repetibilidad de los resultados [8]. El presente estudio se evaluó el efecto del tipo de huevo, el tipo de aceite y el tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo. Para este trabajo, el término tiempo de cocción se refiere al intervalo necesario para que la clara alcance el estado deseado de coagulación mediante transferencia de calor. Aunque el proceso experimental corresponde a una fritura en sartén con presencia de aceite, el enfoque principal del análisis se centra en comportamiento térmico de cocción de la clara del huevo y en los fenómenos de transferencia térmica involucrados. Bajo este contexto, se aplicó un modelo DoE trifactorial 2x2x2 con dos réplicas para cuantificar los efectos de los factores estudiados y sus interacciones sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo, proporcionando una base cuantitativa para la toma de

decisiones en el diseño y optimización de procesos culinarios industriales.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo General*

Evaluar el efecto del tipo de huevo, el tipo de aceite y el tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo mediante un diseño de experimentos trifactorial $2 \times 2 \times 2$ con dos réplicas.

B. *Objetivo Específicos*

1. Diseñar el experimento trifactorial $2 \times 2 \times 2$ con dos réplicas y establecer las condiciones experimentales para evaluar el tiempo de cocción de la clara del huevo.
2. Estandarizar el protocolo experimental de cocción para garantizar la repetibilidad de las mediciones y reducir el error experimental.
3. Ejecutar el diseño experimental y registrar los tiempos de cocción obtenidos bajo cada condición experimental.
4. Aplicar un análisis ANOVA factorial para determinar la significancia estadística de los efectos principales y de las interacciones entre los factores evaluados.
5. Identificar las combinaciones experimentales que generan diferencias significativas en el tiempo de cocción e interpretar su efecto sobre comportamiento térmico del proceso.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

La cocción de la clara de huevo es un proceso de transferencia de calor por conducción y convección que deriva en la desnaturalización térmica de las proteínas. Desde una perspectiva técnica, la eficiencia de este proceso está sujeta a la termofísica del sistema, donde la velocidad de coagulación depende de la superación de una barrera energética específica.[9] El comportamiento térmico de la clara, compuesta principalmente por agua (aprox. 88%) y proteínas como la ovoalbúmina, es altamente sensible a la tasa de flujo de calor proveniente de la interfase sartén-aceite [10].

A. *Propiedades de los Insumos y Cinética de Coagulación*

La literatura en ciencia de alimentos indica que la frescura y composición química del huevo alteran su viscosidad y pH, factores que modifican la cinética de desnaturalización proteica. Pequeñas variaciones en el contenido hídrico pueden desplazar el punto de coagulación, que ocurre generalmente entre los 62°C y 65°C [11] Por otro lado, los aceites de fritura actúan como el medio de transferencia térmica. Sus propiedades, como la conductividad térmica (λ), la capacidad calorífica y la viscosidad cinemática, determinan la resistencia térmica en la capa límite. Investigaciones recientes destacan que la estabilidad oxidativa del aceite influye en su comportamiento térmico, afectando la rapidez con la que el calor alcanza la superficie del alimento [5] [7].

B. *Transferencia de Calor y Ciencia de Materiales*

El material del utensilio de cocción es el factor crítico que define la distribución del flujo de calor. La conductividad térmica del material (ej. acero inoxidable vs. aluminio recubierto de teflón) y su difusividad térmica (α) determinan la uniformidad del campo de temperaturas en la superficie. Mientras que los polímeros como el politetrafluoroetileno (teflón) pueden actuar como aislantes relativos, alterando la tasa de transferencia, materiales metálicos sin recubrimiento presentan una mayor inercia térmica, lo que puede generar gradientes de temperatura heterogéneos y variabilidad en los tiempos de cocción finales [12].

C. *Optimización mediante Diseño Experimental (DoE)*

La variabilidad inherente a los procesos biológicos y térmicos exige un análisis estructurado. La metodología de Diseño de Experimentos Factoriales es la herramienta estándar en ingeniería para descomponer la variabilidad total en efectos principales e interacciones de orden superior. Según Montgomery [1], el análisis estadístico permite identificar si los cambios en el tiempo de cocción son producto de una variable aislada o de una sinergia entre factores (ej. la combinación de un aceite específico con un material de sartén determinado). Este enfoque sistémico es fundamental para la optimización de procesos culinarios a escala industrial, reduciendo el error experimental y maximizando la repetibilidad del proceso.

IV. METODOLOGÍA

A. *Principios de Aleatorización*

Los autores [1] y [8] establecen tres principios fundamentales que son la piedra angular para que los datos obtenidos en un experimento sean útiles y sobre todo válidos estadísticamente:

Aleatorización: Consiste en determinar al azar tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán las corridas o ensayos individuales. Este principio es fundamental para validar el uso de métodos estadísticos, ya que ayuda a garantizar que los errores sean variables aleatorias con distribuciones independientes. Además, ayuda a "cancelar" o promediar los efectos de factores extraños o no controlados que pudieran introducir sesgos.

Para ello, se prepararon pequeñas papeletas identificadas con las ocho combinaciones del diseño factorial (A1B1C1, A1B1C2, ..., A2B2C2). Todas las papeletas fueron introducidas en una bolsa uniforme opaca, la cual se agitó vigorosamente para asegurar una mezcla homogénea. A continuación, se extrajo una papeleta al azar y se registró el tratamiento correspondiente. Antes de seleccionar el siguiente tratamiento, la bolsa se agitó nuevamente con el objetivo de mantener la aleatoriedad del proceso. Este procedimiento se repitió hasta obtener el orden completo de los ocho tratamientos que constituyeron la primera réplica. Finalizada dicha réplica, se realizó un segundo sorteo independiente para generar el orden aleatorio de la réplica 2, asegurando así independencia total entre corridas, [13] y [14].

Replicación: Cada una de las ocho combinaciones del diseño factorial fue ejecutada en dos réplicas independientes, lo cual permitió estimar el error experimental y evaluar la variabilidad asociada al proceso. En total, se llevaron a cabo 16 corridas experimentales.

Bloque: No se consideró variables externas y se mantuvo el experimento en estado de homogeneidad.

B. Diseño Experimental

1) **Tipo de Diseño:** El estudio se fundamentó en un diseño factorial trifactorial $2 \times 2 \times 2$ con dos réplicas, en el cual se evaluaron simultáneamente tres factores experimentales con dos niveles cada factor y con dos réplicas y con todas sus interacciones. Este tipo de diseño permite analizar no sólo los efectos principales, sino también los efectos combinados de interacción doble y triple. Los factores incluidos en el diseño y sus respectivos niveles se presentan a continuación:

- **Factor A - Tipo de huevo:** El tipo de huevo se consideró como el primer factor del estudio debido a que sus características fisicoquímicas, tales como la densidad, composición lipídica, frescura y viscosidad de la clara, pueden afectar la transferencia de calor durante la cocción. Se evaluaron dos niveles: A1, correspondiente a huevos de corral obtenidos mediante un proceso estandarizado de clasificación; y A2, correspondiente a huevos adquiridos a granel en mercado local, los cuales presentan mayor variabilidad en tamaño y características físicas entre unidades.

La comparación entre ambos niveles permitió analizar el efecto de la procedencia y estandarización del producto sobre el tiempo necesario para alcanzar la cocción completa de la clara de huevo.

- **Factor B - Tipo de aceite:** El tipo de aceite se seleccionó como segundo factor al considerarse una variable determinante en la conductividad térmica y en la velocidad de transferencia de calor hacia el alimento. Se emplearon dos niveles: B1, aceite vegetal tradicional, ampliamente utilizado en frituras domésticas; y B2, aceite de oliva, cuya composición química y punto de humo difieren del primero. Estas diferencias pueden alterar la rapidez con la que se estabiliza la temperatura en la superficie de la sartén y, por consiguiente, modificar el tiempo de cocción del huevo. La inclusión de ambos niveles permitió contrastar el comportamiento térmico de aceites de distinta naturaleza.
- **Factor C - Tipo de sartén:** El tipo de sartén se consideró como el tercer factor, dado que el material y recubrimiento del utensilio pueden modificar la distribución y transferencia de calor durante la cocción. Se evaluaron dos niveles: C1, sartén de teflón, reconocido por su baja adherencia y capacidad para calentarse de manera uniforme; y C2, sartén de acero inoxidable, cuyo comportamiento térmico puede ser más variable y dependiente del grosor del metal. Comparar ambos materiales permitió analizar cómo

las propiedades físicas del utensilio afectan la transmisión de calor y, en consecuencia, el tiempo necesario para que la clara alcance su punto de cocción.

2) **Variable de respuesta:** La variable de respuesta fue el tiempo de cocción de la clara del huevo, medido mediante cronómetro digital desde el instante en que el huevo hacía contacto con el aceite caliente hasta que toda la clara adopta una apariencia completamente blanca, homogénea y sin áreas translúcidas. Este criterio se definió como el indicador estandarizado de “clara cocida”.

3) **Número de tratamientos y corridas totales:** El experimento estuvo conformado por un total de 8 tratamientos, resultado de la combinación completa de los factores en un diseño $2 \times 2 \times 2$, cada uno de los cuales fue replicado dos veces, obteniéndose así 16 corridas experimentales en total. Todas las corridas se realizaron siguiendo estrictamente el orden aleatorio determinado por el sorteo aplicado en cada réplica, garantizando la correcta aplicación del principio de aleatorización.

4) **Procedimiento Experimental:** Se utilizaron los materiales presentados, entre ellos: huevos de ambas procedencias, aceites vegetales y de oliva, sartenes de teflón y acero inoxidable, una jeringa para dosificación del aceite, una cocina doméstica, un cronómetro digital y la hoja física de registro de datos.

5) **Realización del Experimento:** La ejecución de cada corrida experimental se llevó a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado para asegurar la reproducibilidad y el control de las condiciones de cocción. Para cada tratamiento, se midieron con precisión 8 ml del aceite correspondiente, utilizando una jeringa para garantizar uniformidad en la cantidad empleada. Posteriormente, el aceite se vertió en la sartén asignada y el utensilio se colocó sobre una hornilla doméstica encendida a fuego medio, permitiendo un calentamiento constante de 30 segundos antes de incorporar el huevo.

Una vez alcanzada la temperatura prevista, el huevo seleccionado según el tratamiento en curso se quebró cuidadosamente y se vertió sobre la superficie caliente. En el instante de contacto entre el huevo y el aceite, se inició el cronómetro digital para registrar el tiempo de cocción. El proceso continuó hasta que la clara adquirió una coloración completamente blanca y homogénea, criterio previamente establecido como indicador objetivo del punto de cocción. Al alcanzar esta condición, el cronómetro se detuvo y el tiempo registrado se anotó inmediatamente en la hoja de recolección de datos correspondiente.

Este procedimiento se repitió para cada una de las corridas, respetando estrictamente el orden aleatorizado generado para cada réplica, con el fin de

evitar sesgos y asegurar la independencia entre tratamientos.

6) Recolección y Procesamiento de Datos: Los tiempos de cocción registrados manualmente en la hoja física fueron transferidos posteriormente a Microsoft Excel, donde se organizaron y depuraron. Una vez estructurados, los datos fueron importados a SPSS 31v, software utilizado para el análisis estadístico del diseño trifactorial, la estimación de efectos y la ejecución del ANOVA correspondiente.

V. RESULTADOS

Los datos obtenidos en las 16 corridas experimentales permitieron evaluar el efecto de los tres factores considerados, tipo de huevo, tipo de aceite y tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara. Para determinar la significancia estadística de los efectos principales y las interacciones entre los factores propuestos, se aplicó un análisis ANOVA correspondiente a un diseño trifactorial 2x2x2 con dos réplicas por tratamiento.

A. Datos Experimentales

Los tiempos de cocción obtenidos en cada una de las 16 corridas se consolidaron en una matriz única que integra factores y réplicas. Esta matriz representa el conjunto completo de datos utilizados en el análisis estadístico, ver Tabla 1:

TABLA 1: MATRIZ DE DATOS TOTALES EN SEGUNDOS

Tratamientos	C1		C2	
	B1	B2	B1	B2
A1	124	118	166	163
	117	112	171	166
A2	112	122	170	174
	121	125	164	179

B. Resultados del ANOVA Factorial

Se aplicó un análisis de diseño trifactorial de efectos fijos con nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, donde se resumen los valores estadísticos F y p_valores asociados a cada factor e interacción evaluados.

A partir del análisis de la Tabla 2, se determinó que únicamente el factor sartén y la interacción huevo x aceite presentaron efectos estadísticamente significativos sobre el tiempo de cocción del huevo, debido a que sus p_valores fueron menores que el nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), tal como se observa en las Figuras 3 y 4, respectivamente. En contraste, para los factores principales huevo y aceite, así como las interacciones dobles de huevo x sartén y aceite x sartén y la interacción triple huevo x aceite x sartén, no se rechazó la hipótesis nula, ya que sus p_valores fueron mayores a 0.05, según se aprecia en las Figuras 1 y 2.

La figura 4, muestra las medias estimadas del tiempo de cocción para la interacción entre el tipo de huevo y el tipo de aceite evaluados en el experimento.

TABLA 2: PRUEBAS DE EFECTOS INTER-SUJETOS

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: TIEMPO					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	10351.000 ^a	7	1478.714	87.628	<.001
Intersección	331776.000	1	331776.000	19660.800	<.001
HUEVO	56.250	1	56.250	3.333	.105
ACEITE	12.250	1	12.250	.726	.419
SARTÉN	10100.250	1	10100.250	598.533	<.001
HUEVO * ACEITE	169.000	1	169.000	10.015	.013
HUEVO * SARTÉN	9.000	1	9.000	.533	.486
ACEITE * SARTÉN	4.000	1	4.000	.237	.639
HUEVO * ACEITE * SARTÉN	.250	1	.250	.015	.906
Error	135.000	8	16.875		
Total	342262.000	16			
Total corregido	10486.000	15			

a. R al cuadrado = .987 (R al cuadrado ajustada = .976)

FIGURA 1: DIAGRAMA DE CAJAS DE TIPO DE HUEVO

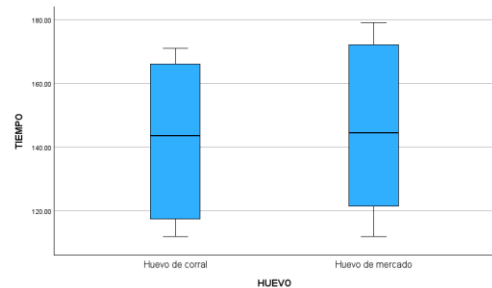


FIGURA 2: DIAGRAMA DE CAJAS DE TIPO DE ACEITE

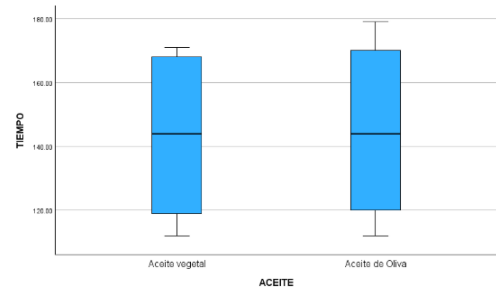


FIGURA 3: DIAGRAMA DE CAJAS DE TIPO DE SARTÉN

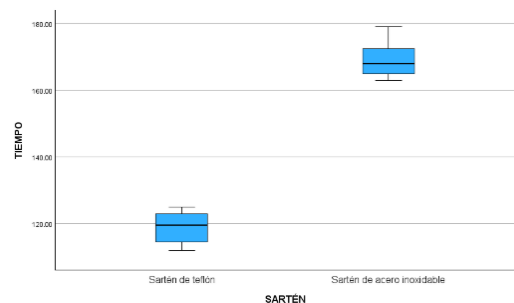
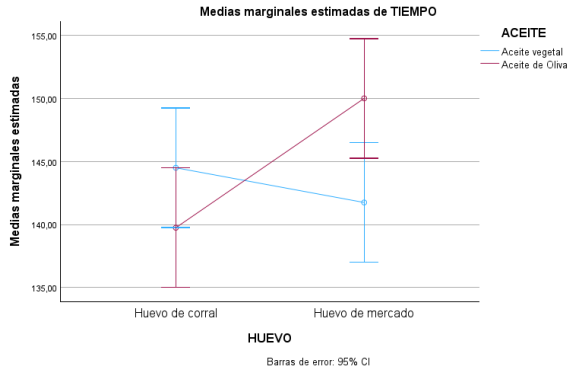


FIGURA 4: MEDIAS MARGINALES ESTIMADAS DEL TIEMPO DE COCCIÓN INTERACCIÓN HUEVO X ACEITE



a) Efecto del tipo de huevo

Se observa en la Figura 1, ambos tipos de huevo presentan distribuciones similares en los tiempos de cocción de la clara del huevo. El huevo de mercado muestra una mediana ligeramente superior y una dispersión algo mayor en comparación con el huevo de corral; sin embargo, las diferencias entre ambos grupos no son pronunciadas. Asimismo, existe un amplio solapamiento entre los rangos de datos, lo que indica un comportamiento térmico relativamente semejante bajo las condiciones experimentales evaluadas. Estos resultados sugieren que el tipo de huevo no ejerce efecto significativo sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo.

b) Efecto del tipo de aceite

Se observa en la Figura 2, ambos tipos de aceite presentan distribuciones muy similares en los tiempos de cocción de la clara del huevo. Tanto el aceite vegetal como el aceite de oliva muestran medianas prácticamente iguales y una dispersión comparable de los datos. Asimismo, existe un amplio solapamiento entre los rangos intercuartílicos y los valores extremos, lo que indica que el comportamiento térmico de ambos aceites fue semejante bajo las condiciones experimentales evaluadas. Estos resultados sugieren que el tipo de aceite no ejerce efecto significativo sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo.

c) Efecto del tipo de sartén

Se observa en la Figura 3, existen diferencias marcadas entre los tiempos de cocción de la clara del huevo con los dos tipos de sartén evaluados. La sartén de teflón presenta tiempos de cocción menores, concentrados aproximadamente entre 115 y 125 segundos, mientras que la sartén de acero inoxidable muestra tiempos considerablemente mayores, entre aproximadamente 165 y 178 segundos. Asimismo, la dispersión de los datos en ambos grupos es relativamente baja, evidenciando estabilidad en las mediciones experimentales. Estos resultados indican que el material de la sartén presentó un efecto estadísticamente significativo sobre el proceso de transferencia de calor y, en consecuencia, sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo. En particular, la sartén de teflón

permitió alcanzar una cocción más rápida en comparación con la sartén de acero inoxidable.

d) Efecto del tipo de huevo y aceite

Se observa en la Figura 4, las líneas correspondientes a los tipos de aceite no presentan un comportamiento paralelo a través de los niveles del factor huevo, evidenciando una interacción entre ambos factores. En particular, para el huevo de corral, el aceite vegetal presentó un tiempo de cocción ligeramente mayor que el aceite de oliva; sin embargo, en el huevo de mercado se observó el comportamiento opuesto, donde el aceite de oliva produjo tiempos de cocción superiores. La divergencia observada entre las líneas indica que el efecto del tipo de aceite sobre el tiempo de cocción depende del tipo de huevo utilizado y, de manera equivalente, que el efecto del tipo de huevo depende del tipo de aceite empleado. Este comportamiento es consistente con el análisis ANOVA, donde la interacción huevo x aceite presentó significancia estadística.

En conclusión, el análisis gráfico y estadístico evidenció que el tipo de sartén constituye el factor con mayor efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo, mientras que los factores principales tipo de huevo y tipo de aceite no presentaron efectos significativos de manera individual. Sin embargo, la interacción doble entre huevo y aceite sí mostró un efecto significativo, indicando que el comportamiento de uno de los factores depende del nivel del otro y que determinadas combinaciones experimentales pueden generar variaciones en el tiempo de cocción.

Estos resultados resaltan la utilidad del diseño trifactorial, ya que permite evaluar simultáneamente tanto los efectos principales como las interacciones entre los factores involucrados en el proceso de cocción. Asimismo, los comportamientos observados en las representaciones gráficas fueron consistentes con los resultados obtenidos mediante el análisis ANOVA.

C. Análisis de Regresión para Factor Significativo

Tras determinar mediante ANOVA que el tipo de sartén es el único factor principal con efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de cocción, se realizó un análisis de regresión lineal simple con el objetivo de cuantificar este efecto y evaluar la capacidad predictiva del modelo. Para ello, el factor sartén fue incorporada como predictor del tiempo de cocción.

El modelo ajustado mostró en la Tabla 3, una relación lineal significativa entre el tipo de sartén y el tiempo de cocción.

TABLA 3: COEFICIENTES DE REGRESIÓN DEL MODELO

Coeficientes ^a								
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		
	B	Desv. Error	Beta			Límite inferior	Límite superior	
1	(Constante)	68.625	4.150	16.537	<.001	59.725	77.525	
	SARTÉN	50.250	2.625	.981	19.146	<.001	44.621	55.879

a. Variable dependiente: TIEMPO

El modelo ajustado es representado mediante la ecuación:

$$\hat{Y} = 68.625 + 50.250X \quad (1)$$

Donde $\hat{Y}$ representa el tiempo estimado de cocción de la clara del huevo y X corresponde a la codificación asignada al tipo de sartén. El coeficiente positivo asociado al predictor indica que el cambio de sartén de teflón a acero inoxidable produce un incremento promedio de 50.25 segundos en el tiempo de cocción de la clara del huevo, según el modelo en (1).

Los coeficientes del modelo resultaron altamente significativos, con p_valores inferiores a 0.001 tanto para la constante como para el predictor, lo que confirma que cada parámetro contribuye de manera estadísticamente relevante a la explicación del comportamiento observado. Asimismo, los intervalos de confianza al 95% fueron estrechos y contuvieron los valores estimados 59.725 y 77.525 para la constante y entre 44.621 y 55.879 para el coeficiente asociado al predictor, lo que evidencia precisión y estabilidad en las estimaciones.

La bondad de ajuste fue notablemente elevada, obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 de 0.963, Tabla 4. Lo que implica que el modelo lineal explica el 96.3% de la variabilidad presente en los tiempos de cocción de la clara del huevo. De manera consistente, el coeficiente de correlación r alcanzó un valor de 0.981, evidenciando una asociación positiva muy fuerte entre el tipo de sartén y el tiempo de cocción de la clara del huevo.

TABLA 4: COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN DEL MODELO

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	.981 ^a	.963	.961	5.24915

a. Predictores: (Constante), SARTÉN

Adicionalmente, en la Tabla 5, mostró significancia estadística ($F=366.568$; $p < 0.001$), confirmando que el modelo lineal es adecuado para describir el comportamiento experimental del sistema.

TABLA 5: PRUEBA ANOVA DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	10100.250	1	10100.250	366.568	<.001 ^b
	Residuo	385.750	14	27.554		
	Total	10486.000	15			

a. Variable dependiente: TIEMPO

b. Predictores: (Constante), SARTÉN

En conjunto, estos resultados confirman que el tipo de sartén constituye el factor de mayor efecto sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo dentro de las condiciones evaluadas y que el modelo obtenido posee una alta capacidad explicativa y predictiva

D. Verificación de Supuestos de Modelo

Para validar el modelo estadístico, se evaluaron los supuestos del ANOVA:

1) Normalidad de los residuos

H0: Los residuos siguen una distribución normal

H1: Los residuos no siguen una distribución normal

En la Tabla 6 se obtuvo un p_valor > 0.05 , por lo que no se rechaza la hipótesis nula al 95% de confianza. Esto indica que no existe evidencia suficiente para afirmar que los residuos se desvían de una distribución normal.

TABLA 6: PRUEBA DE NORMALIDAD DEL MODELO

Pruebas de normalidad						
Residuo para TIEMPO	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
	.191	16	.120	.895	16	.067

a. Corrección de significación de Lilliefors

2) Homogeneidad de varianzas

H0: Las varianzas poblacionales son iguales.

H1: Al menos una varianza poblacional es diferente.

En la Figura 5, se observa los residuos estandarizados frente a los valores predichos no evidenció una forma de embudo ni cambios sistemáticos en la dispersión de los residuos a lo largo del rango de valores estimados. La distribución observada fue relativamente uniforme alrededor de cero, lo que sugiere que la variabilidad de los errores se mantiene aproximadamente constante. Por ello, el supuesto de homogeneidad de varianzas se consideró razonablemente satisfecho para el modelo ajustado.

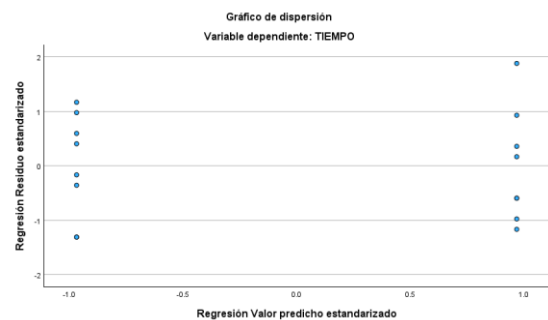
3) Independencia de Residuos

H0: Los residuos del modelo son independientes entre sí.

H1: Los residuos del modelo no son independientes entre sí.

En la Figura 5, no se observaron patrones sistemáticos, tendencias definidas ni agrupamientos secuenciales entre los puntos observados. Los residuos se distribuyeron aleatoriamente alrededor de cero, indicando ausencia de dependencia evidente entre los errores. En consecuencia, el supuesto de independencia de los residuos se consideró aceptablemente cumplido dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

FIGURA 5: RESIDUOS ESTANDERIZADOS VS VALORES PREDICHOS ESTANDARIZADOS



VI. DISCUSIONES

A. Significancia de los Factores y sus Interacciones

El análisis del ANOVA reveló que, de los tres factores evaluados, únicamente el tipo de sartén tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo. En contraste, el tipo de huevo y el tipo de aceite

que no mostraron efectos principales significativos. Estos resultados indican que el material del sartén constituye el factor predominante en la transferencia de calor durante el proceso de cocción.

Desde el punto de vista térmico, este comportamiento puede explicarse por las diferencias físicas de los materiales utilizados. El teflón posee una conductividad térmica aproximada de $0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mientras que el acero inoxidable presenta valores cercanos a $16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, [15], [16]. Sin embargo, además de la conductividad térmica, intervienen otros factores como la capacidad calorífica, la distribución del calor y la interacción superficial entre el alimento y el material del sartén.

Se observó que el sartén de teflón permitió alcanzar menores tiempos de cocción (aproximadamente entre 115 y 125 s), mientras que el sartén de acero inoxidable presentó tiempos considerablemente mayores (entre 165 y 178 s). Esta diferencia cercana a 50 segundos evidencia que el tipo de sartén está asociado al comportamiento térmico del proceso y a la rapidez con que se estabiliza la temperatura en la interfaz sartén-alimento.

En relación con las interacciones entre factores, la interacción doble huevo x aceite resultó estadísticamente significativa, lo que indica que el efecto del tipo de aceite sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo depende del tipo de huevo utilizado. Por otro lado, las interacciones dobles como huevo x sartén, aceite x sartén y la interacción triple huevo x aceite x sartén no fueron estadísticamente significativas. Esto sugiere que el efecto del tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo no presentó variaciones estadísticamente significativas respecto a los niveles de tipo de huevo y tipo de aceite evaluados. En consecuencia, el tipo de sartén presentó el mayor efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de cocción dentro de las condiciones experimentales estudiadas.

B. Implicancias en la Ingeniería Industrial

Los resultados obtenidos presentan implicancias relevantes para procesos productivos en los que el tiempo de cocción de la clara del huevo constituye una variable de interés para la eficiencia operativa y el control del proceso. El tipo de sartén, identificado como el factor de mayor efecto estadísticamente significativo, puede considerarse un factor relevante para la optimización de procesos térmicos y la reducción de tiempos de operación.

En el contexto del control de calidad, estos hallazgos permiten establecer condiciones de cocción más consistentes, considerando tanto el material del utensilio como la interacción significativa entre el tipo de huevo y el tipo de aceite. Esto contribuye a reducir variaciones en el proceso y mejorar la reproducibilidad de los resultados.

Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura especializada. Choe y Min [17] documentaron que el tipo de equipo y las condiciones operativas constituyen factores determinantes en la cinética del proceso de fritura, señalando que variables como la temperatura y el tiempo de contacto gobiernan la transferencia de calor hacia el alimento. En línea

con esto, Dana y Saguy [18] destacaron que las características superficiales del utensilio y la viscosidad del aceite influyen directamente en la interfase térmica formada durante la fritura, lo cual es coherente con el efecto dominante del material del sartén identificado en el presente estudio. Asimismo, Farinu y Baik [19] demostraron que las propiedades termofísicas de los materiales involucrados en el proceso, particularmente la difusividad térmica y la conductividad, son determinantes en la velocidad de transferencia de calor, lo que respalda la diferencia observada entre el teflón y el acero inoxidable. En cuanto a la no significancia del tipo de aceite como factor principal, este resultado sugiere que, bajo condiciones de temperatura uniforme y rangos de operación doméstica, las diferencias entre aceites vegetales comunes no generan variaciones sustanciales en la cinética de cocción, aspecto que merece mayor exploración en futuras investigaciones con condiciones más controladas.

C. Limitaciones del Estudio

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Aunque el uso de dos réplicas por tratamiento permitió estimar el error experimental y realizar el análisis factorial correspondiente, un mayor número de réplicas podría incrementar la precisión estadística y mejorar la detección de efectos de menor magnitud. Además, el entorno doméstico en el que se realizó el experimento puede diferir significativamente de un contexto industrial, donde los sistemas térmicos están más controlados y la fuente de calor es más estable y uniforme.

Asimismo, la determinación del punto de fin de cocción de la clara del huevo mediante observación visual introduce variabilidad subjetiva en la medición de la variable de respuesta. Futuras investigaciones podrían emplear métodos instrumentales más objetivos, como termografía infrarroja o análisis de textura, con el fin de mejorar la precisión de las mediciones.

Finalmente, el diseño experimental se limitó a dos niveles por factor y estudios futuros podrían incorporar más niveles o aplicar metodología de superficie de respuesta para evaluar posibles comportamientos no lineales, así como analizar con mayor profundidad la interacción significativa la combinación huevo y aceite, dado que la literatura existente no aborda con detalle la sinergia entre composición proteica y medio graso en condiciones de fritura doméstica.

VII. CONCLUSIONES

La aplicación del diseño trifactorial $2 \times 2 \times 2$ con dos réplicas permitió evaluar de manera simultánea los efectos principales y las interacciones entre el tipo de huevo, tipo de aceite y tipo de sartén sobre el tiempo de cocción de la clara de huevo.

Los resultados obtenidos permitieron identificar el efecto de estas variables sobre el proceso evaluado, evidenciando que el tipo de sartén fue el factor con mayor efecto estadísticamente significativo sobre el tiempo de cocción de la clara del huevo dentro de las condiciones experimentales estudiadas. Este

comportamiento se atribuye a diferencias en las propiedades térmicas del material de la superficie de cocción.

Esta diferencia se atribuye a las distintas propiedades de difusividad térmica e inercia calorífica de los materiales evaluados, que gobiernan la tasa de transferencia de calor por conducción hacia el alimento, generando una diferencia de aproximadamente 50 segundos entre la sartén de teflón (≈ 120 s) y la de acero inoxidable (≈ 170 s).

Asimismo, se identificó una interacción significativa entre el tipo de huevo y el tipo de aceite, lo que indica que el efecto de uno de los factores depende del nivel del otro dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

Este resultado demuestra que ciertas combinaciones experimentales de factores pueden modificar el tiempo de cocción de la clara del huevo, aun cuando los efectos individuales del huevo y del aceite no resulten significativos por separado. Este hallazgo resalta la complejidad de procesos con comportamiento multifactorial y la necesidad de aplicar un enfoque sistémico para minimizar la variabilidad operativa.

El análisis de regresión lineal confirmó adicionalmente la importancia del tipo de sartén como variable predictora del tiempo de cocción de la clara del huevo, obteniéndose un modelo con elevada capacidad explicativa ($R^2 = 0.963$). Este resultado indica que el tipo de sartén explica una proporción considerable de la variabilidad observada en el proceso experimental.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, los resultados muestran que la selección adecuada del material del equipo de cocción puede contribuir a la estandarización de procesos térmicos, reducción de tiempos de operación y mejora de la eficiencia operativa. Además, el estudio evidencia la utilidad del DoE como herramienta para analizar sistemas multifactoriales y apoyar la toma de decisiones basada en evidencia cuantitativa.

La robustez metodológica del estudio, sustentada en los principios de aleatorización y replicación, así como en la verificación de los supuestos del modelo estadístico, permitió garantizar la validez de los resultados obtenidos mediante ANOVA. La evaluación de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los residuos confirmó que la variabilidad observada fue principalmente atribuida a los factores controlados y no a fuentes externas de error, permitiendo una interpretación confiable del comportamiento del proceso.

Finalmente, aunque el uso de dos réplicas permitió estimar el error experimental y desarrollar el análisis factorial correspondiente, futuras investigaciones podrían incorporar un mayor número de réplicas, métodos instrumentales más objetivos para determinar el punto de cocción y diseños con más niveles o metodologías de superficie de respuesta, con el fin de evaluar posibles comportamientos no lineales y profundizar en la interacción significativa huevo x aceite.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Ricardo Palma, así como a los estudiantes Nicole F. Mendieta Pisco, Camila V. Montalvo Correa, Daniela F. Camacho Noriega y Alvaro W. Colan Ramos, quienes participaron en la 32° Feria y Concurso de Creatividad e Innovación Tecnológica Industrial – FECITIN con el proyecto “Análisis trifactorial del efecto del tipo de huevo, aceite y sartén en el tiempo de cocción de la clara del huevo”, desarrollado en el curso de Diseño de Experimentos durante el semestre académico 2025-II, en Ingeniería Industrial – URP obteniendo el Segundo Puesto en dicho concurso.

Asimismo, se reconoce la valiosa contribución del Dr. Vicente A. Atoche Espinoza y de la Mg. Angie L. Atoche Puelles por el apoyo brindado en las discusiones técnicas, revisión metodológica y análisis de los resultados obtenidos durante la investigación.

DECLARACIÓN DE USO ÉTICO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que, durante la elaboración de este proyecto, se utilizaron herramientas de Inteligencia Artificial Generativa (IA) bajo un marco de ética y responsabilidad académica. El uso de estas tecnologías se limitó estrictamente al apoyo en la curación de formato, traducción técnica de términos al inglés y optimización de la redacción para garantizar la claridad y el rigor científico del informe.

Se hace constar que todos los datos experimentales, el análisis estadístico mediante ANOVA y las interpretaciones de los resultados de diseño factorial fueron generados, supervisados y validados íntegramente por los autores. El contenido intelectual y las conclusiones de este trabajo reflejan el aprendizaje y la capacidad de análisis de los alumnos de Ingeniería Industrial de la Universidad Ricardo Palma – Perú, asegurando la integridad y la autoría de la investigación.

REFERENCES

- [1] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [2] Guptha PM, Surendran V, Gunda RK. Casting a Spotlight on Factorial Design: Exploring the Power of DoE for Experiment Screening and Optimization: A Review. *Ind J Pharm Edu Res.* 2025;59(2 Suppl):s406-s416. doi: 10.5530/ijper.20257373.
- [3] Granato D, Calado VMA. The use and importance of design of experiments (DOE) in process modelling in food science and technology. In: *Mathematical and statistical methods in food science and technology*. Vol. 1. Chichester: Wiley-Blackwell; 2014. p. 1-18.
- [4] Vitrac O, Trystram G, Raoult-Wack AL. Deep-fat frying of food: Heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *Eur J Lipid Sci Technol.* 2000;102(8-9):529-538.
- [5] Su Y, Gao J, Tang S, Feng L, Azam SMR, Zheng T. Recent advances in physical fields-based frying techniques for enhanced efficiency and quality

attributes. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2022;62(19):5183-5202. doi: 10.1080/10408398.2021.1882933.

[6] Dash KK, Sharma M, Tiwari A. Heat and mass transfer modeling and quality changes during deep fat frying: A comprehensive review. *J Food Process Eng.* 2022;45(4):e13999. doi: 10.1111/jfpe.13999.

[7] M. E. Puelles Bulnes, J. R. Cervantes Miranda, J. A. Cardenas Echevarria, J. M. Bartolo Bolimbo, and M. G. Sulca Valderrama, "Application of the Three-Factor Design as an Educational Strategy in Industrial Engineering: An Experimental Case on Healthy Potato Cooking," *LACCEI Proceedings*, 2025.

[8] R. A. Fisher, *The Design of Experiments*. New York, NY, USA: Macmillan, 1974.

[9] Nicorescu I, Vial C, Delepine B, et al. Comparative effect of thermal treatment on the physicochemical properties of whey and egg white protein foams. *Food Hydrocolloids.* 2011;25(4):797-808.

[10] Liu T, Wang J, Cheng Y, et al. Egg white protein-based delivery system for bioactive substances: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2024;64(3):617-637. doi: 10.1080/10408398.2022.2106544.

[11] Luo X, Yang Y, Zhao Y, et al. Mechanism of effect of heating temperature on functional characteristics of thick egg white. *LWT.* 2022;154:112807. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112807.

[12] Yuan L, Zhang J, Li H, et al. Study on the electrical insulation properties of modified PTFE at high temperatures. *Polymers.* 2024;16(3):316. doi: 10.3390/polym16030316.

[13] M. E. Puelles Bulnes, V. A. Atoche Espinoza, and A. L. Atoche Puelles, "Experimental Evaluation of Coffee Extraction Times: Integrating Statistical Analysis in Engineering Education," *LACCEI*, vol. 1, no. 12, 2025.

[14] M. E. Puelles Bulnes, G. Bautista Rotondo, J. F. Jimenez Rojas, L. Y. Trejo Osorio, and M. F. Valderrama de la Cruz, "Design of Bifactorial Experiments in the Physical Performance of a Team of Students from the Ricardo Palma University, Peru," *LACCEI*, vol. 1, no. 10, 2024.

[15] Yousif, A. A., Ali, O. M., Sadiq, D., Alomar, O. R., Sabri, Q. S., & Mohammed, A. M. (2025). Effect of CuO-water nanofluid on natural convection from heated cylinders in a duct. *Results in Engineering*, 27, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106189>

[16] Li, D., Zhao, L., & Liu, F. (2020). Design of C band high power Teflon water load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/717/1/012002>

[17] E. Choe and D. B. Min, "Chemistry of deep-fat frying oils," *Journal of Food Science*, vol. 72, no. 5, pp. R77–R86, 2007, doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x.

[18] D. Dana and I. S. Saguy, "Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect—theory and myth," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 128–130, pp. 267–272, 2006, doi: 10.1016/j.cis.2006.11.013.

[19] A. Farinu and O.-D. Baik, "Thermal properties of sweet potato with its moisture content and temperature," *International Journal of Food Properties*, vol. 10, no. 4, pp. 703–719, 2007, doi: 10.1080/10942910601137482.