



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad De Ingeniería



**FACULTAD DE  
INGENIERÍA**

# **Operación evolutiva (EVOP) aplicado a una panadería**

## **Algoritmos Metaheurísticos Tarea 1**

P R E S E N T A

**Ing. Daniel Eduardo González Alvarado**

Profesor

**Dr. Marco Antonio Aceves Fernández**

15 de Agosto de 2025

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Desarrollo</b>	<b>1</b>
2.1. Objetivo . . . . .	1
2.2. Variables del EVOP . . . . .	2
2.3. Diseño y Ejecución . . . . .	3
2.4. Análisis de Resultados . . . . .	3
2.5. Criterios de decisión . . . . .	5
2.6. Implementación y verificación . . . . .	6
<b>3. Discusión</b>	<b>6</b>
<b>4. Conclusión</b>	<b>6</b>
<b>5. Bibliografía</b>	<b>8</b>

# 1. Introducción

La operación evolutiva (EvOp por sus siglas en ingles) es una técnica de mejora continua desarrollada en los años 50 por George E.P. Box, su objetivo es optimizar procesos sin detener la operación y se basa en principios evolutivos, comúnmente utilizada en procesos industriales, químicos o de calidad mediante experimentación y ajuste continuo[1].

Durante el desarrollo de esta metodología debemos identificar nuestras variables o parámetros para poder encontrar soluciones optimas. El objetivo de un evop puede variar sin embargo el enfoque es el mismo, optimizar procesos en tiempo real sin necesidad de un modelo previo adaptándose a condiciones cambiantes y con poco o nulo control del entorno[2].

## Puntos clave para la implementación de un EVOP

- **Selección del Sistema y Variables a Optimizar:** Identificar claramente el proceso o sistema a optimizar y las variables controlables críticas que afectan el desempeño.
- **Diseño Experimental Inicial:** Establecer condiciones iniciales, definir rangos de variación para las variables y determinar cómo se va a medir el rendimiento o la función objetivo.
- **Iteración y Evaluación Continua:** Cambiar sistemáticamente las variables según reglas evolutivas (mutación, selección) y evaluar el desempeño para determinar cambios beneficiosos.
- **Balance entre Exploración y Explotación:** Equilibrar la búsqueda de nuevas soluciones (exploración) con la optimización de las ya encontradas (explotación) para evitar estancarse en soluciones subóptimas.
- **Adaptabilidad y Flexibilidad:** Permitir que el sistema evolucione ante cambios en el entorno o en el propio proceso, manteniendo la capacidad de respuesta y ajuste dinámico.
- **Recopilación y Análisis de Datos:** Monitorear continuamente los resultados para apoyar la toma de decisiones y la siguiente ronda de ajustes.
- **Consideraciones Prácticas:** Evaluar costos, tiempo de experimentación, recursos disponibles y riesgos asociados con los cambios durante la operación.

## 2. Desarrollo

En nuestro caso se decidió optimizar el proceso de horneado en una panadería mientras la operación continúa normalmente. Se evalúan pequeños cambios en variables de control para reducir consumo energético y mejorar calidad sin afectar la producción.

### 2.1. Objetivo

#### Objetivo principal

Reducir el consumo específico de energía por bandeja en al menos 5 % durante el horneado, sin perder la calidad del producto ni el rendimiento de la línea.

## Criterios de éxito

- **Energía:** reducción media del consumo específico de energía  $E_{\text{esp}} \geq 5\%$  respecto a la línea base (prueba  $t$  bilateral,  $p < 0.05$ ).
- **Calidad:**
  - Humedad interna  $M$  dentro de  $\pm 0.5$  puntos porcentuales del valor objetivo.
  - Color de corteza (escala 1–5): dentro de tolerancia definida (p.ej.,  $\pm 1$  punto o  $\pm 2$  unidades  $L^*$ ) puede ser medido con un higrómetro.
  - Defectos  $D$  ( %) no mayores a la línea base (prueba de proporciones,  $p \geq 0.05$  para no-inferioridad).
- **Productividad:** no reducir la salida de bandejas/hora en más de 1 % ni aumentar el tiempo de ciclo en más de 1 minuto.

## Métricas y definiciones

$$E_{\text{esp}} = \frac{\text{Energía consumida (kWh)}}{\text{Nº de bandejas horneadas}}, \quad D = \frac{\text{Piezas defectuosas}}{\text{Piezas totales}} \times 100\%.$$

El volumen específico (opcional) se estima como  $V_{\text{esp}} = \frac{\text{Volumen del pan}}{\text{Peso}}$  (mL/g).

## Alcance

El EVOP se ejecutará durante **4 semanas**: 1 de preparación y 3 para ciclos en operación normal, con cambios pequeños y controlados.

## Restricciones

Mantener los parámetros dentro de límites de seguridad del horno y especificaciones del producto; todos los cambios serán reversibles y dentro de tolerancias.

## 2.2. Variables del EVOP

### Factores de control (ajustables)

- Temperatura de horneado  $T$  (°C):  $\Delta T = 10$  °C alrededor de  $T_0 = 155$  °C.
- Tiempo de horneado  $H$  (min):  $\Delta H = 10$  min alrededor de  $H_0 = 55$  min.

### Variables respuesta (medibles en producción)

- Consumo específico de energía  $E$  (kW h por bandeja).
- Humedad interna  $M$  (%).
- Color de corteza (escala visual 1–5).
- Porcentaje de defectos  $D$  (%).

### 2.3. Diseño y Ejecución

Se proponen ajustes en nuestras variables para aplicar durante la operación normal. Cada ciclo cubre las cuatro combinaciones y se repite  $C = 4$  veces.

Tabla 1: Matriz EVOP (codificada y real).

Corrida	Factores codificados		Ajustes reales	
	$x_T$	$x_H$	$T$ (°C)	$H$ (min)
1	+1	+1	$T_0 + \Delta T$	$H_0 + \Delta H$
2	+1	-1	$T_0 + \Delta T$	$H_0 - \Delta H$
3	-1	+1	$T_0 - \Delta T$	$H_0 + \Delta H$
4	-1	-1	$T_0 - \Delta T$	$H_0 - \Delta H$

También se considera no aplicar la corrida siempre en el mismo orden, ya que esto puede generar sesgos de tiempo o temperatura del ambiente. Por lo cual debe ejecutarse en orden aleatorio.

Con cada corrida se registrarán los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 2: Formato de registro por corrida (un extracto).

Ciclo	Corrida	$T$ (°C)	$H$ (min)	$E$ (kWh/bandeja)	$M$ (%)	Color (1-5)	$D$ (%)
1	1						
1	2						
1	3						
1	4						
Observaciones: ...							

### 2.4. Análisis de Resultados

#### Modelo lineal con interacción

Para una respuesta  $Y$  (p.ej.,  $E$  o  $D$ ), usar:

$$Y = \beta_0 + \beta_T x_T + \beta_H x_H + \beta_{TH} x_T x_H + \varepsilon, \quad (1)$$

donde  $x_T, x_H \in \{-1, +1\}$ . Un efecto  $\beta$  significativamente distinto de cero indica dirección de mejora.

#### Contrastes de efectos (cálculo manual rápido)

Promedios en alto/bajo:

$$\hat{\beta}_T = \frac{\bar{Y}_{x_T=+1} - \bar{Y}_{x_T=-1}}{2}, \quad \hat{\beta}_H = \frac{\bar{Y}_{x_H=+1} - \bar{Y}_{x_H=-1}}{2}, \quad \hat{\beta}_{TH} = \frac{\bar{Y}_{x_T x_H=+1} - \bar{Y}_{x_T x_H=-1}}{2}.$$

Repetir por ciclo y promediar sobre  $C$  ciclos. Visualizar con gráficos de efectos e intervalos de confianza.

## Ejemplo

Se evalúa el consumo específico de energía  $Y$  (kWh/bandeja) con dos factores codificados:  $x_T \in \{-1, +1\}$  (temperatura:  $\pm 10^\circ\text{C}$ ) y  $x_H \in \{-1, +1\}$  (tiempo:  $\pm 10$  min).

Tabla 3: Corridas del diseño y respuesta observada  $Y$ .

Corrida	$x_T$	$x_H$	$Y$ (kWh/bandeja)
1	+1	+1	2.60
2	+1	-1	2.45
3	-1	+1	2.55
4	-1	-1	2.40

## Modelo

El modelo lineal con interacción es:

$$Y = \beta_0 + \beta_T x_T + \beta_H x_H + \beta_{TH} x_T x_H + \varepsilon.$$

## Estimación por contrastes (codificado)

Promedio general:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} = \frac{2,60 + 2,45 + 2,55 + 2,40}{4} = 2,50.$$

Efectos principales:

$$\hat{\beta}_T = \frac{\bar{Y} \mid x_T = +1 - \bar{Y} \mid x_T = -1}{2} = \frac{\frac{2,60+2,45}{2} - \frac{2,55+2,40}{2}}{2} = \frac{2,525 - 2,475}{2} = 0,025,$$

$$\hat{\beta}_H = \frac{\bar{Y} \mid x_H = +1 - \bar{Y} \mid x_H = -1}{2} = \frac{\frac{2,60+2,55}{2} - \frac{2,45+2,40}{2}}{2} = \frac{2,575 - 2,425}{2} = 0,075.$$

Interacción:

$$\hat{\beta}_{TH} = \frac{\bar{Y} \mid x_T x_H = +1 - \bar{Y} \mid x_T x_H = -1}{2} = \frac{\frac{2,60+2,40}{2} - \frac{2,45+2,55}{2}}{2} = \frac{2,50 - 2,50}{2} = 0.$$

## Modelo ajustado (codificado)

$$\hat{Y} = 2,50 + 0,025 x_T + 0,075 x_H + 0 \cdot (x_T x_H).$$

## Interpretación (codificado)

- $\hat{\beta}_0 = 2,50$ : consumo promedio en los set-points centrales ( $T_0, H_0$ ).
- $\hat{\beta}_T = 0,025$ : mover la temperatura de  $T_0$  a  $T_0 + 10^\circ\text{C}$  (cambio de  $x_T = -1$  a  $+1$ ) incrementa  $Y$  en 0,025 kWh/bandeja.
- $\hat{\beta}_H = 0,075$ : mover el tiempo de  $H_0$  a  $H_0 + 10$  min (cambio de  $x_H = -1$  a  $+1$ ) incrementa  $Y$  en 0,075 kWh/bandeja.
- $\hat{\beta}_{TH} = 0$ : no se detecta interacción en este rango.

## Efectos en unidades naturales

Como  $x_T = \pm 1$  representa  $\pm 10^\circ\text{C}$  y  $x_H = \pm 1$  representa  $\pm 10$  min:

$$\text{Efecto por } ^\circ\text{C} \approx \frac{\hat{\beta}_T}{10} = \frac{0,025}{10} = 0,0025 \text{ kWh/bandeja}/^\circ\text{C},$$

$$\text{Efecto por minuto} \approx \frac{\hat{\beta}_H}{10} = \frac{0,075}{10} = 0,0075 \text{ kWh/bandeja}/\text{min}.$$

**Implicación:** una disminución de 1 min reduce en promedio 0,0075 kWh/bandeja; una disminución de  $1^\circ\text{C}$  reduce en promedio 0,0025 kWh/bandeja (siempre que la calidad permanezca dentro de tolerancias).

## 2.5. Criterios de decisión

### Reglas de decisión (energía)

- D1. Dirección de mejora:** Si  $\hat{\beta}_H > 0$  (aumentar tiempo eleva  $E_{\text{esp}}$ ), entonces moverse hacia  $x_H = -1$  (tiempos menores). Si  $\hat{\beta}_T > 0$ , moverse hacia  $x_T = -1$  (temperaturas menores). Priorizar el factor con mayor  $|\hat{\beta}|$ .
- D2. Interacción:** Si  $|\hat{\beta}_{TH}|$  es significativo, la dirección óptima depende de la combinación  $T$ - $H$ ; en este caso, realizar un *follow-up* focal con pasos más finos alrededor del mejor cuadrante.
- D3. Meta cuantitativa:** Aceptar el nuevo set-point si se demuestra una reducción de al menos 5 % en  $E_{\text{esp}}$  respecto a la línea base, con  $p < 0.05$  o con intervalo de confianza de la diferencia completamente por debajo de 0.

### Salvaguardas de calidad (no-inferioridad)

Para cada métrica de calidad:

- **Humedad  $M$ :** Mantener  $\Delta M$  dentro de  $\pm 0.5$  puntos porcentuales respecto a objetivo. Prueba de no-inferioridad con margen  $\delta_M = 0.5$  p.p.
- **Color:**
  - Escala 1–5: diferencia media dentro de  $\pm 1$  punto.
- **Defectos  $D$ :** No mayor que la línea base (prueba de proporciones; margen de no-inferioridad  $\delta_D = 0.5$  p.p.).

### Regla de aceptación integral

**Aceptar** el nuevo set-point si: (i) Disminuye el costo energético, y  
(ii)  $M$ , Color y  $D$  no exceden en disminución dentro de los márgenes definidos.

## 2.6. Implementación y verificación

### Plan de implementación

1. **Capacitación y checklist** (Semana 1): calidad y mantenimiento; verificación de sensores y límites de seguridad; checklist operativo completado.
2. **Aplicación de set-points** (Semanas 2–3): implementar el plan cíclico EVOP (diseño  $2^2$  a baja amplitud), con orden aleatorizado en cada ciclo y separación entre corridas de 1 min para estabilización térmica.
3. **Registro de datos**: capturar  $E_{\text{esp}}$ ,  $M$ , Color,  $D$ , temperatura ambiental y observaciones de masa.
4. **Análisis intermedio**: al cierre de cada ciclo, revisar efectos y cumplimiento de salvaguardas; detener o ajustar si se exceden límites.

### Riesgos y planes de reversión

- **Sobre/infra-cocción**: monitoreo de Color y  $M$  por lote; si se excede tolerancia, revertir a  $(T_0, H_0)$ .
- **Variación de materia prima**: registrar humedad de masa; si cambia  $> 1.0$  p.p., pausar ajustes y recalibrar objetivo.
- **Inestabilidad térmica**: incremento de dispersión en  $E_{\text{esp}}$ ; verificar quemadores/ventiladores y sellos del horno antes de continuar.

## 3. Discusión

La implementación del EVOP como podemos ver nos permite monitoreo las variables control así como las variables respuesta para poder determinar cual el es mejor paso para llegar al resultado esperado, al llevar un control claro como son tablas nos permite saber con exactitud que variables nos guían a un mejor resultado. Este tipo de procesos son de gran valor dado que no requieren un gran estudio previo, solo un buen conocimiento del proceso y las variables que modifican el comportamiento de nuestro proyecto o nuestro producto. El hecho de no tener que detener la producción es de gran impacto a líneas de producción mas grandes, sin embargo no cuenta con grandes procesos de precision por lo que al momento de planearlo se debe tener en cuenta sus limitantes.

## 4. Conclusión

Los procesos EVOP al ser un modelo flexible que permite el ajuste a lo largo de la ejecución nos presenta un precursor de los algoritmos genéticos, esto debido a que aunque se plantea desde un inicio a lo largo de la ejecución puede evolucionar, tal como su nombre lo indica y sin embargo llegar al resultado esperado haciendo pequeños ajustes. Este proceso ofrece una gran herramienta a la hora de tratar de mejorar un proceso ya establecido con una meta clara y sin un análisis complejo previo por lo cual, es de gran ayuda principalmente en pequeños y



medianos proyectos, ya que para empresas más grandes podría causar incertidumbre y en líneas grandes podría causar muchas pérdidas. Para este caso en específico se tomó como punto de partida una línea de producción de pan esto nos permite aterrizarlo de manera más clara al mundo real. Los valores de las variables fueron propuestos pensando en valores que tengan un impacto significativo en el producto final, de la misma manera es importante tener en cuenta que cada cambio así como estas variaciones pueden ser modificadas hasta llegar a un punto óptimo. Es decir no tiene que permanecer inmutables, llegado el momento los cambios pueden ser menores o mayores según sea el caso.

## 5. Bibliografía

### Referencias

- [1] E. H. Barnett. “Introduction to Evolutionary Operation”. En: *Industrial & Engineering Chemistry* 52.6 (1960), págs. 500-503. DOI: 10.1021/ie50606a026.
- [2] G. E. P. Box. “Evolutionary Operation: A Method for Increasing Industrial Productivity”. En: *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 6.2 (1957), págs. 81-101. DOI: 10.2307/2985505.