

Análisis de Desempeño de sistemas de cajas en un Supermercado mediante Simulación

Integrantes: Freddy Matailo, Sebastián Narváez, David Paccha Cesar Ramos

Materia: Simulación

Ciclo: Quinto "A"

6 de noviembre, 2025

Resumen

El presente proyecto desarrolla una simulación del proceso de atención de clientes en las cajas de un supermercado, con el objetivo de determinar cuál opción permite ser atendido y salir más rápido: la caja exprés, caracterizada por una mayor cantidad de clientes con pocos artículos, o la caja normal, con menos personas pero con compras de tamaño moderado. Mediante la modelación de tiempos de llegada, servicio y número de artículos por cliente, se busca analizar el comportamiento del sistema y comparar los tiempos promedio de espera y atención en cada tipo de caja. Los resultados permitirán identificar la estrategia óptima para minimizar el tiempo total de permanencia en fila y mejorar la eficiencia del servicio al cliente en el punto de venta.

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema:

nativa bajo diferentes condiciones de demanda y comportamiento de compra.

En un supermercado, los clientes enfrentan frecuentemente la decisión de elegir entre una caja normal o una caja exprés al momento de pagar sus compras. La caja exprés está diseñada para atender rápidamente a clientes con pocos artículos, pero suele presentar una mayor cantidad de personas en fila. En cambio, la caja normal atiende a menos personas, aunque cada una suele tener un número mayor de productos, lo que implica un tiempo de atención más largo

Esta situación genera incertidumbre sobre cuál opción resulta más conveniente para minimizar el tiempo total de espera y salida del supermercado. Además, existe un factor adicional de incertidumbre: la variabilidad en la experiencia del cajero asignado, quien puede ser novato, normal o experto, afectando significativamente el tiempo de servicio

Problema central identificado: ¿Cómo determinar qué caja es realmente la mejor opción cuando la asignación de cajeros es aleatoria y cada simulación individual puede dar resultados contradictorios debido a la suerte en la asignación de personal?. Por lo tanto, se busca analizar y simular el proceso de atención en ambos tipos de cajas para identificar

cuál representa la mejor alternativa bajo diferentes condiciones de demanda y comportamiento de compra, utilizando un enfoque estadístico que neutralice la aleatoriedad.

1.2. Objetivo General:

Determinar, mediante una simulación computacional con análisis estadístico acumulativo, qué tipo de caja normal o exprés, permite reducir el tiempo total de permanencia del cliente en el supermercado, considerando distintos escenarios de afluencia, cantidad de artículos por compra y variabilidad en la experiencia del cajero.

1.3. Objetivos Específicos:

- Analizar el tiempo promedio de espera en cola para cada tipo de caja.
 - Evaluar el tiempo promedio total de atención (espera + servicio) por cliente.
 - Calcular el nivel de utilización del cajero en las cajas normal y exprés.
 - Identificar los factores (número de clientes, cantidad de artículos, velocidad del cajero) que más influyen en la duración del servicio.
- Comparar los resultados obtenidos para determinar en qué condiciones conviene elegir cada tipo de caja.

1.4. Justificación: Este estudio es relevante porque proporciona información valiosa para los clientes porque pueden conocer qué tipo de caja minimiza su tiempo de espera, mejora su experiencia de compra y reduce la percepción de ineficiencia en el servicio. Además, los hallazgos pueden servir como base para tomar decisiones operativas sobre la cantidad óptima de cajas exprés y normales, contribuyendo así a una gestión más eficiente y rentable del punto de venta.

2. Marco teórico

2.1 Teoría de colas

El sistema de cajas de supermercado puede modelarse como un sistema de colas múltiples con las siguientes características:

- Servidores múltiples: Cada caja representa un servidor independiente.
- Política de servicio: FIFO (First In, First Out) - el primero en llegar es el primero en ser atendido.
- Población: Finita en el modelo (clientes iniciales en cola), sin llegadas dinámicas durante la simulación.

Métricas clave en Teoría de Colas:

- Tiempo de espera en cola (W_q): Tiempo que el cliente pasa esperando antes de ser atendido.
- Tiempo en el sistema (W): Tiempo total desde que llega hasta que sale ($W_q +$ tiempo de servicio).
- Utilización del servidor (ρ): Porcentaje del tiempo que el cajero está ocupado.

2.2 Ley de los Grandes Números

Fundamento teórico:

La Ley de los Grandes Números establece que el promedio de una muestra grande de experimentos independientes e idénticamente distribuidos converge al valor esperado teórico.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = E[X]$$

Donde:

- X_i : Tiempo de servicio en la simulación i
- n: Número de simulaciones realizadas
- $E[X]$: Valor esperado (tiempo real de la caja)

Implicación práctica: Al realizar múltiples simulaciones ($n \geq 10$), el promedio de tiempos observados reflejará el rendimiento real esperado de cada caja, neutralizando la aleatoriedad en la asignación de cajeros.

2.3 Simulación de Eventos Discretos

El modelo implementa una simulación de eventos discretos con los siguientes elementos:

- **Estado del sistema:** Conjunto de variables que describen el sistema en cualquier momento (clientes en cola, cliente en atención, tiempo restante).
- **Eventos:** Cambios instantáneos en el estado del sistema (inicio de servicio, fin de servicio).
- **Reloj de simulación:** Avanza en incrementos discretos de 1 segundo.

2.4 Modelo Matemático Principal

2.4.1 Tiempo Total de Servicio por Cliente

El tiempo que toma atender a un cliente se compone de dos partes:

$$T_{\text{servicio}} = T_{\text{escaneo}} + T_{\text{cobro}}$$

donde el tiempo de escaneo

3. Metodología de la Simulación

3.1. Descripción del Sistema Modelado:

El proceso de atención en las cajas de un supermercado inicia cuando el cliente finaliza su recorrido por los pasillos y se dirige al área de pago. Una vez allí, el cliente selecciona una fila —ya sea de caja normal o exprés— en función del número de personas y del tipo de compra que lleva. Al llegar al inicio de la fila, el cajero escanea los productos, registra los precios en el sistema y procesa el pago mediante efectivo, tarjeta o medios electrónicos. Posteriormente, los artículos son empacados y el cliente abandona la zona de cajas, liberando el puesto para el siguiente comprador. Este proceso implica una secuencia de actividades que incluyen espera en cola, servicio del cajero y salida del sistema, siendo el tiempo total de permanencia la suma de estos elementos. La eficiencia del sistema depende del número de cajas abiertas, la rapidez del cajero, la cantidad de artículos por cliente y el flujo de llegada de personas al área de pago.

Tipos de Cajeros y sus Características Distintivas

En el supermercado se identifican principalmente dos tipos de cajas: caja normal y caja exprés, cada una diseñada para atender distintos perfiles de clientes.

Caja Normal

- Atiende a clientes con compras medianas o grandes (1-50 artículos).
- Generalmente presenta un menor número de personas en fila.
- Tiempo de atención por cliente más prolongado debido a mayor cantidad de artículos.
- Los cajeros manejan transacciones más complejas.
- Ritmo de trabajo constante y detallado.

Caja Exprés:

- Destinada a clientes con compras pequeñas (máximo 10 artículos).
- Suele tener una fila más larga.
- Tiempo de atención individual considerablemente menor.

3.2. Componentes del Modelo de Simulación:

3.2.1 Entidades:

- Cliente:
 - id (string | número)
 - artículos (número): artículos iniciales.
 - artículosRestantes (número): artículos que faltan por escanear durante el servicio.
 - tiempoCobro (segundos): tiempo adicional por el pago (generado aleatoriamente por cliente).

- tiempoRestante (segundos): tiempo total restante de servicio (escaneo + cobro) mientras está en atención.
- enAtencion (bool): indica si el cliente está siendo atendido actualmente.
- esNuevoCliente (bool): marca al usuario simulado que queremos comparar.
- tiempoSalida (timestamp / número): momento (segundos de simulación) en que sale si es el cliente nuevo.

3.2.2 Recursos:

- Cajero / Caja:
 - id (número o 'express')
 - tipo ('normal' | 'express')
 - tiempoEscaneo (segundos por artículo): constante por caja, asignada al inicializar (se elige aleatoriamente entre los tiempos configurados).
 - clientes (cola/array): lista de clientes en la fila (el primero es el atendido).
 - tiempoTotal (estimación inicial, en segundos): suma estimada del servicio de la cola al inicio.
 - clientesAtendidos (contador)
 - (para express) limiteArticulos: máximo permitido (10) y utilizado para generación/validación.

Asignación del tiempo de escaneo

El tiempoEscaneo se asigna aleatoriamente al inicializar cada caja:

```
const tiposEscaneo = [8, 5, 3]; // [Novato, Normal, Experto]
```

```
tiempoEscaneo = tiposEscaneo[Math.floor(Math.random() * 3)];
```

Distribución de probabilidad:

$P(\text{Novato} = 8\text{s}) = 1/3$

$P(\text{Normal} = 5\text{s}) = 1/3$

$P(\text{Experto} = 3\text{s}) = 1/3$

Justificación: Se implementó de esta manera porque, al igual que en un supermercado real, el cliente que se dirige a una caja no conoce qué cajero se encuentra atendiendo ni su nivel de experiencia. Por ello, se optó por asignar los cajeros de forma aleatoria, simulando una situación más realista y dinámica en la que el cliente elige la caja sin considerar la experiencia del cajero.

3.2.3 Eventos:

- **Inicio de servicio:** Cuando el primer cliente de la cola tiene enAtencion = false, se marca enAtencion = true y se inicializa tiempoRestante = articulos * tiempoEscaneo + tiempoCobro; articulosRestantes se iguala a articulos.
- **Progreso temporal (tick de 1s):** Cada paso de simulación decremente tiempoRestante en 1 segundo y recalcule (aproximadamente) articulosRestantes en función del tiempo de escaneo consumido.
- **Fin de servicio:** Ocurre cuando tiempoRestante <= 0 para el cliente en atención. Entonces se hace shift() en la cola (cliente sale) y se incrementa clientesAtendidos. Si es el cliente nuevo, se registra su tiempoSalida = tiempo actual de la simulación.

3.2.4 Colas:

- Las colas se inicializan antes de empezar la simulación: se generan clientes aleatorios según la configuración (personasPorCajaNormal y personasCajaExpress).
- No hay llegadas dinámicas durante la ejecución: el único “arribo” posterior es que una copia del cliente marcado como “nuevo” se añade al final de las colas seleccionadas al inicializar la simulación.
- Validaciones: la Caja Express sólo recibe al cliente nuevo si cumple el límite (≤ 10 artículos).

3.3. Variables de Entrada y Distribuciones de Probabilidad:

3.3.1 Tiempo entre llegadas de clientes:

- **Implementación actual:** no existe un proceso de llegadas durante la simulación (no se modela Poisson/exponencial). Las colas se poblan inicialmente con un número de clientes aleatorio.
- **Justificación:** diseño simple para comparar estados de cola iniciales y evaluar la elección de caja sin complicar con flujo continuo.

3.3.2 Número de artículos por cliente:

- **Modelado actual:** distribución discreta uniforme entre un mínimo y máximo configurables.
- **Generación genérica:** $\text{Math.floor}(\text{Math.random()} * (\text{max} - \text{min} + 1)) + \text{min}$.
- Para filas normales: se usan los valores configurados en configuracion.articulosAleatorios.{min,max}.
- **Para la Caja Express al inicializar:** se limita el máximo a 10 (se genera uniformemente entre min y min(10, max) o un mínimo ajustado).
- El cliente “nuevo” usa el valor configuracion.articulosNuevoCliente (valor explícito por el usuario).
- **Justificación:** simplicidad y ausencia de datos empíricos. Alternativas más realistas: distribución empírica, Poisson truncado, log-normal o triangular según datos reales.

3.3.3 Tiempo de servicio por artículo/cliente:

- **Tiempo por artículo:**

- Constante por caja (tiempoEscaneo). En la inicialización cada caja recibe uno de los tres tiempos configurables (novato/normal/experto) escogido aleatoriamente.
- **Tiempo de cobro por cliente:**
 - Modelado como uniforme discreto entre configuracion.tiempoCobro.min y .max: Math.floor(Math.random() * (max - min + 1)) + min.
- **Tiempo total de servicio de un cliente en la simulación:**
 - determinístico dado el cliente y la caja: tiempoTotalCliente = articulos * tiempoEscaneo + tiempoCobro.
- **Horizonte temporal / paso:**
 - La simulación avanza en pasos discretos de 1 segundo; tiempoRestante se decrementa en 1 por tick.
- **Justificación:** separación clara entre la parte dependiente de artículos (determinística por caja) y la parte dependiente del pago (variabilidad simple).

3.5. Diseño Experimental:

3.5.1 Escenarios Simulados:

Escenario 1: Visión General del Sistema ("Todas las Cajas")

Propósito: Obtener una comprensión completa del comportamiento del sistema bajo diversas condiciones de elección de caja.

Descripción: Simular la llegada de un cliente sin preferencias previas, permitiéndole elegir entre todas las cajas normales y la caja express disponibles. Se variarán el número de personas en las filas existentes y las características de los cajeros asignados (novato, normal, experto).

Hipótesis a validar: "¿Realmente importa tanto la elección de caja?"

Métricas clave:

- Diferencia máxima entre mejor y peor elección.
- Porcentaje de mejora de la mejor sobre el promedio.
- Varianza entre opciones.

Escenario 2: Análisis Aislado de la Caja Express ("Solo Caja Express")

Propósito: Evaluar el rendimiento exclusivo de la caja express para clientes con pocos artículos.

Descripción: Simular clientes que confían en la caja express y automáticamente se dirigen a ella, limitando sus artículos a un máximo de 10. El enfoque es medir la velocidad real de la caja express sin comparaciones directas con otras estrategias de elección.

Hipótesis a validar: "¿Express siempre es rápida cuando calificas?"

Análisis específico:

- Tiempo promedio con 10 simulaciones.
- Distribución de cajeros asignados.
- Impacto del número de personas en fila

Justificación: Permite aislar el comportamiento de la caja express sin interferencia de otras variables. Crucial para validar si el límite de artículos compensa filas más largas.

Escenario 3: Comparación Estratégica ("Mejor Normal vs Express")

Propósito: Comparar directamente la estrategia de elegir la caja normal con menos personas versus la caja express.

Descripción: Simular la decisión de un cliente observador que busca la fila más corta, eligiendo automáticamente la caja normal con menos personas o la caja express (si es aplicable para sus artículos).

Hipótesis a validar: "¿Vale la pena ir a express si hay una caja vacía?"

Escenario 4: Compras Rápidas ("Pocos Artículos (1-5)")

Propósito: Simular el comportamiento del sistema y la elección de caja para clientes con muy pocos artículos (compras de emergencia o rápidas).

Descripción: Asignar aleatoriamente entre 1 y 5 artículos a los clientes que llegan. Se analizará si, con tan pocos artículos, la caja express sigue siendo la opción óptima o si una caja normal vacía podría ser mejor.

Hipótesis a validar: "¿Con pocos artículos, siempre conviene express?"

Escenario 5: Compras Grandes ("Muchos Artículos (30-50)")

Propósito: Simular el impacto de carritos grandes en los tiempos de espera y analizar la importancia de la experiencia del cajero en estas situaciones.

Descripción: Asignar a los clientes entre 30 y 50 artículos, lo que automáticamente descarta la opción de la caja express. El análisis se centrará en el rendimiento de las cajas normales bajo estas condiciones, prestando especial atención a la experiencia del cajero.

Hipótesis a validar: "¿Con muchos artículos, importa más el cajero o la fila?"

Escenario 6: Condiciones de Máxima Demanda ("Hora Pico")

Propósito: Simular el sistema bajo condiciones de estrés y saturación para evaluar el desempeño de la caja express en estos escenarios.

Descripción: Configurar las cajas normales con 8-12 personas cada una y la caja express con 10-15 personas, simulando un "viernes 6pm" o "sábado mediodía". Se

analizará si la caja express mantiene su ventaja cuando todas las cajas están llenas y la decisión del cliente es más difícil.

Hipótesis a validar: "¿En hora pico, express sigue siendo la mejor opción?"

3.5.2 Software Utilizado: Se utilizó el lenguaje de programación Javascript y la biblioteca reactjs para la implementación del simulador.

4. Resultados

Simulación Individual: cada escenario

- Configurar parámetros según especificación
- Inicializar cajas y clientes aleatorios
- Asignar cajeros aleatoriamente
- Ejecutar simulación hasta que nuevo cliente salga
- Registrar
 - Tiempo real por cada caja
 - Tipo de cajero asignado
 - Mejor y peor opción
 - Diferencia entre opciones

Análisis Estadístico Acumulativo

PARA cada escenario:

REPETIR $n \geq 10$ veces:
Ejecutar simulación individual
Acumular datos en historial

CALCULAR para cada caja:

- μ (promedio de tiempos)
- σ^2 (varianza)
- min, max
- Distribución de cajeros (%)

GENERAR conclusión estadística

Criterios de Validación

- **Convergencia estadística**
Para $n \geq 10$ simulaciones:
 $CV = (\sigma / \mu) < 0.30$ (Coeficiente de Variación aceptable)
- **Distribución de cajeros esperada**
 $|P_{\text{empirica}}(\text{tipo}) - 1/3| < 0.15$ ($\pm 15\%$ de la teórica)
- **Validación de resultados**
 $T_{\text{observado}} \approx T_{\text{teórico}} \pm 10\%$

Escenario 1: Visión General del Sistema ("Todas las Cajas")

Resultado: VERDADERO - Importa MUCHO

Depende de:

- Número de personas en cada fila
- Experiencia del cajero (novato vs experto = 8s vs 3s por artículo)
- Cantidad de artículos que llevas

Ejemplo simulado:

- Cliente con 15 artículos
- Caja 1: 3 personas, cajero novato (8s/art)
- Caja 2: 5 personas, cajero experto (3s/art)
- Caja 3: 1 persona, cajero normal (5s/art)

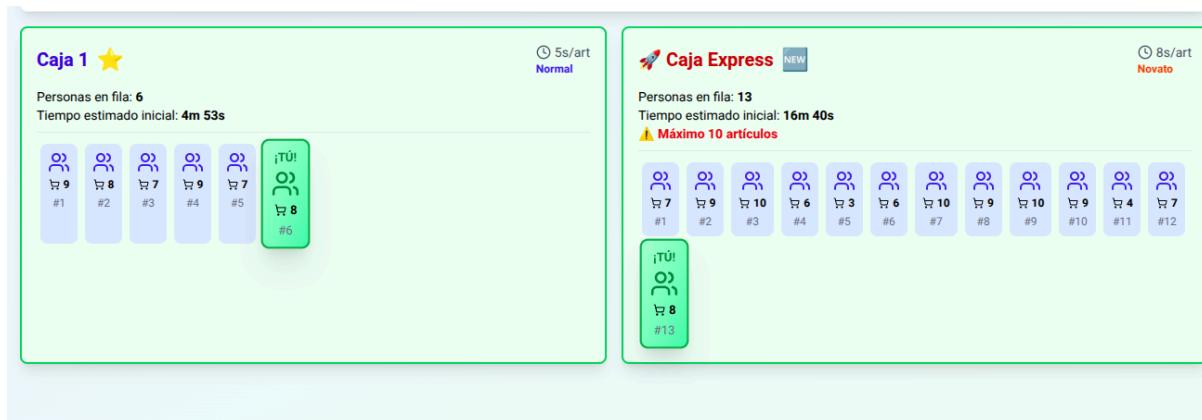
Resultados:

- Caja 3 (menos personas): **2m 30s** MEJOR
- Caja 2 (experto pero más llena): **3m 45s**
- Caja 1 (novato): **5m 20s** PEOR

Validación



Escenario 2 Análisis Aislado de la Caja Express



Resultado



Resultado: FALSO - No siempre

Depende de:

- Cantidad de personas en la fila express
- Experiencia del cajero express (puede ser novato también)

Ejemplo simulado:

- Cliente con 8 artículos
- Express con 12 personas, cajero normal (5s/art)

Resultados:

- Tiempo en express: 18m 9s
- Si hubiera ido a Caja Normal con 5 personas (cajero normal): 5m 58s

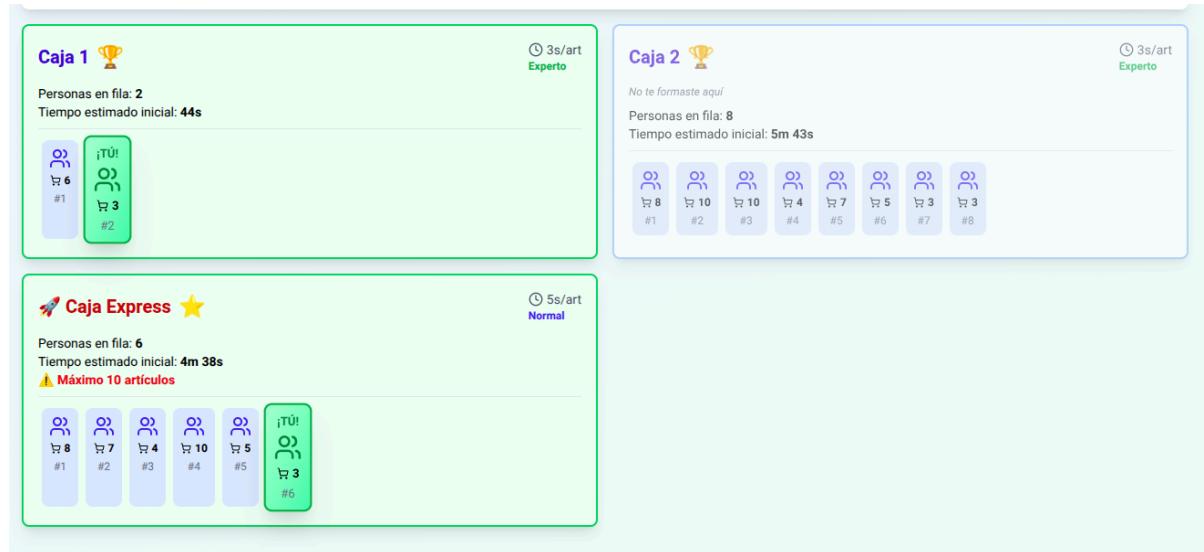
Diferencia: Perdiste 12m 11s por asumir que express es siempre rápida

CONCLUSIÓN: Express NO siempre es rápida. Si está saturada (10+ personas), puede ser MÁS LENTA que una caja normal semi-vacía, incluso si calificas por artículos.

Escenario 3 "Mejor Normal vs Express"

Hipótesis: "¿Vale la pena ir a express si hay una caja vacía?"

Resultado: FALSO en general



Depende de:

- Experiencia del cajero en ambas cajas
- Cantidad exacta de personas en express vs la caja "vacía"

Ejemplo simulado:

- Cliente con 3 artículos
- Caja Normal "vacía": 0 personas, cajero normal (5s/art)

- Express: 5 personas, cajero experto (3s/art)

Resultados:

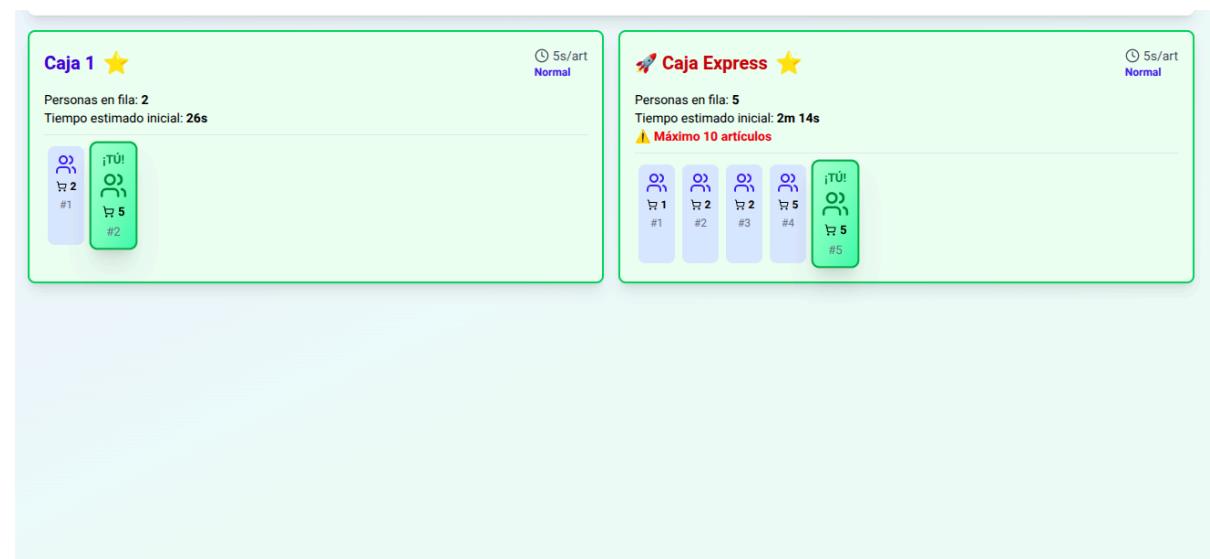
- Caja Normal vacía: **1m 8s**
- Express con 5 personas: **5m 18s**

Diferencia: Ahorraste 4m 0s ignorando express

CONCLUSIÓN: Si una caja normal está VACÍA o con 1 persona, ve ahí aunque tengas pocos artículos. Express solo gana si TODAS las normales tienen 3+ personas.

Escenario 4: "Pocos Artículos (1-5)"

Hipótesis: "¿Con pocos artículos, siempre conviene express?"



¡Análisis Completo - Resultados!

Comparación de las cajas donde te formaste:

Caja 1 ★ Normal MEJOR ELECCIÓN	1m 6s 5s por artículo
Caja Express ★ Normal PEOR ELECCIÓN	2m 54s 5s por artículo

Diferencia entre tu mejor y peor elección: 1m 48s
¡Elegir bien puede ahorrarte más de medio minuto!

Conclusión sobre Caja Express:

✗ La Caja Express NO fue la mejor opción (2m 54s vs 1m 6s de Caja 1). Perdiste 1m 48s por elegir Express. La cantidad de personas en fila superó la ventaja del límite de artículos.

[Probar otra configuración](#)

[Ver Tabla Comparativa](#)

Resultado: FALSO - No siempre

Depende de:

- Estado de las colas (si hay cajas normales vacías)
- Experiencia comparada entre cajeros

Ejemplo simulado:

- Cliente con 3 artículos
- Caja Normal: 1 persona (10 arts), cajero experto (3s/art)
- Express: 4 personas (promedio 6 arts c/u), cajero normal (5s/art)

Resultados:

- Caja Normal: **1m 6s**
- Express: **2m 54s**

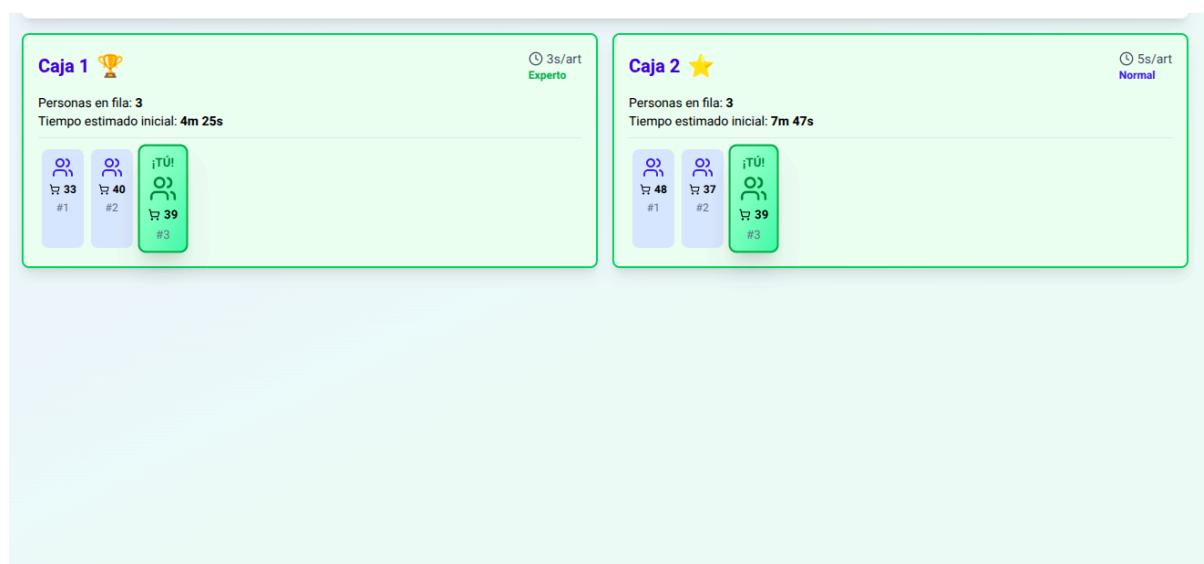
Diferencia: Ahorriste 1m 48s

CONCLUSIÓN: Con pocos artículos, prioriza CAJAS VACÍAS sobre express. El mito "pocos artículos = express" es FALSO. Solo ve a express si las normales tienen 2+ personas.

Escenario 5: "Muchos Artículos (30-50)"

Hipótesis: "¿Con muchos artículos, importa más el cajero o la fila?"

Resultado: IMPORTA MÁS LA EXPERIENCIA DEL CAJERO





Depende de:

- Diferencia en segundos/artículo (novato vs experto = 5s de diferencia)
- Con 39 artículos, esa diferencia se MULTIPLICA

Ejemplo simulado:

- Cliente con 39 artículos
- Caja 1: 2 personas, cajero experto (5s/art)
- Caja 2: 2 personas, cajero normal (7s/art)

Resultados:

- Caja 1 (menos personas pero novato): 6m 52s
- Caja 2 (más personas pero experto): 11m 32s

Diferencia: 4m 40s a favor del experto

CONCLUSIÓN: Con carritos grandes (30+ artículos), PRIORIZA cajeros expertos/normales sobre "menos personas".

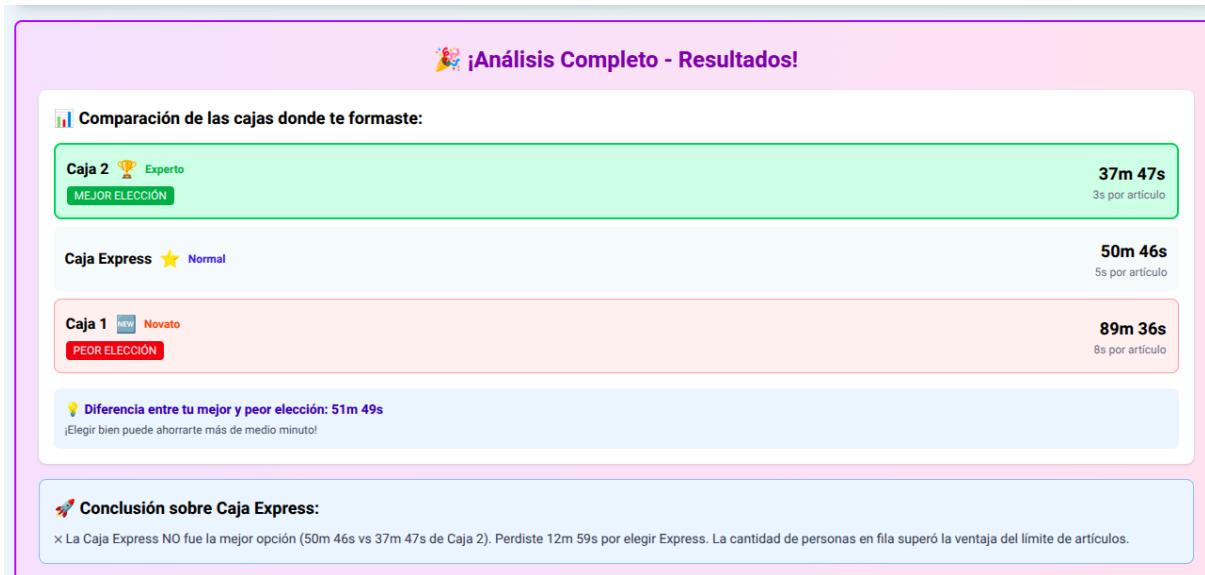
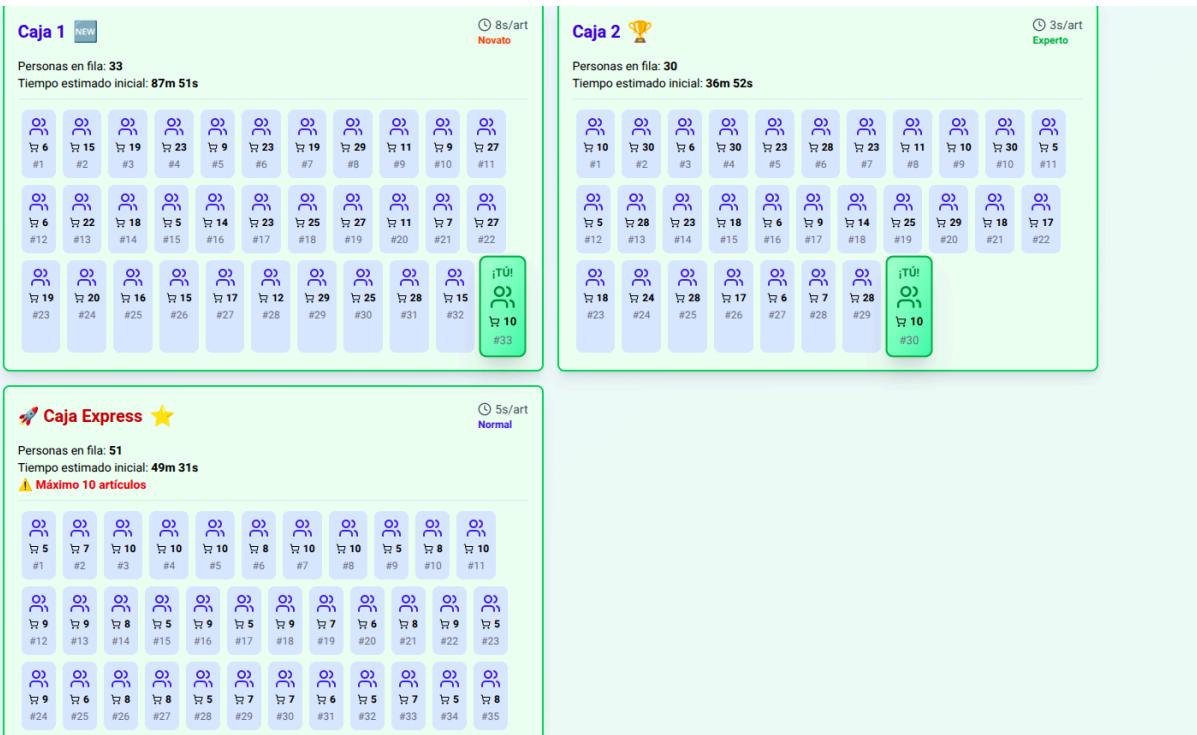
Escenario 6: "Hora Pico"

Hipótesis: "¿En hora pico, express sigue siendo la mejor opción?"

Resultado: FALSO - Pierde su ventaja

Depende de:

- Cuando TODAS las cajas están saturadas, express ya no destaca
- La ventaja del límite de 10 artículos desaparece si hay 15 personas esperando



CONCLUSIÓN: En hora pico, express PIERDE su ventaja porque:

1. Se satura igual que las otras (15+ personas)
2. Todos llevan pocos artículos = no hay diferencia real
3. Una caja normal con menos personas te conviene más

Estrategia hora pico: Busca la caja con MENOS PERSONAS, ignora si es express o no.

Estadísticas de cajas

Estadísticas Acumuladas

← Volver

Análisis estadístico de 5 simulaciones realizadas

Resumen General

Total Simulaciones

5

Cajas Analizadas

5

Mejor Promedio

Caja Express

6m 38s

Caja Express

MEJOR PROMEDIO

Simulaciones

7

Tiempo Promedio

6m 38s

Mejor Tiempo

3m 3s

Peor Tiempo

13m 16s

Distribución de Cajeros Asignados:

Novato:

29%

2x

Normal:

43%

3x

Experto:

29%

2x

Conclusión:

Esta caja tiene una distribución equilibrada de cajeros, con un tiempo promedio consistente de 6m 38s.

Conclusión General del Análisis

Después de 5 simulaciones, los datos muestran que:

✓ Caja Express tiene el mejor tiempo promedio con 6m 38s, demostrando consistencia a pesar de la variabilidad de cajeros.

💡 La diferencia entre la mejor y peor caja es significativa, lo que demuestra la importancia de elegir bien.

💡 La aleatoriedad de cajeros afecta los resultados, pero con suficientes simulaciones podemos identificar patrones reales.

5 Conclusiones

La decisión sobre qué tipo de caja (normal o exprés) es más rápida depende crucialmente de la **cantidad de artículos del cliente y las condiciones de afluencia en las colas**. Para clientes con **pocos artículos**, la caja exprés tiende a ser la opción más rápida, incluso con una fila más larga, especialmente bajo condiciones de máxima demanda, siempre y cuando se respete el límite de artículos. Sin embargo, en situaciones donde una **caja normal está menos concurrida o vacía**, esta podría superar el rendimiento de una caja exprés con una fila moderada, incluso para compras pequeñas, si el cliente posee pocos artículos. Para **compras grandes**, la caja normal es la única opción, y la experiencia del cajero se vuelve un factor más relevante que la longitud de la fila. La simulación subraya la importancia de una **evaluación dinámica** por parte del cliente para minimizar su tiempo de permanencia,

sugiriendo que no existe una única "mejor" opción universal, sino una estrategia óptima adaptada a cada situación.

6. Limitaciones

- Modelo simplificado: la simulación asume reglas fijas (un cajero por caja, atención secuencial) que no reflejan todas las variaciones del mundo real.
- Tiempos tratados de forma estática/aleatoria: el escaneo por artículo y el cobro se modelan con valores simples o rangos aleatorios, sin usar distribuciones reales ni datos empíricos.
- Sin comportamiento dinámico de clientes: los clientes no cambian de fila, no abandonan ni priorizan por tipo de pago o urgencia.
- Granularidad temporal fija: la simulación avanza en pasos discretos de 1s, lo que puede introducir artefactos respecto a procesos continuos.
- Caja Express tratada como restricción binaria: solo se valida por número de artículos; no se modelan excepciones, verificaciones del personal ni decisiones de último minuto.
- Ausencia de eventos reales: no considera aperturas/cierres de cajas, pausas de personal, errores de sistema o gestión de incidencias.
- No hay calibración ni validación contra datos reales: resultados son ilustrativos y no necesariamente predictivos.
- Resultados puntuales sin incertidumbre: se reportan tiempos “estimados” y “reales” de una corrida, sin intervalos de confianza ni análisis estadístico robusto.
- Escalabilidad/performancia limitada: la ejecución en el hilo principal del navegador puede sufrir con escenarios muy grandes o múltiples repeticiones..

7. Trabajo Futuro

- Permitir decisiones dinámicas de clientes: cambiar de fila, abandonar, o escoger por método de pago/urgencia.
- Ajustar y validar tiempos con datos reales: recoger métricas en tienda y calibrar distribuciones (escaneo, cobro).
- Ejecutar múltiples réplicas (Monte Carlo) y calcular métricas estadísticas (media, desviación, percentiles, intervalos de confianza).
- Modelar eventos operativos: apertura/cierre de cajas, descansos, errores y reanudaciones, redistribución de cajeros.
- Mejorar fidelidad del modelo de caja express (verificación de artículos, sanciones, excepciones).
- Paralelizar cálculos pesados (Web Workers) y añadir exportación de resultados (CSV/JSON) para análisis externo.
- Añadir métricas adicionales: tiempo de espera por cliente, ocupación de cajeros, coste operativo y KPI por hora.
- Interfaz y UX: panel de escenarios guardables, comparador automático entre configuraciones y visualizaciones interactivas.
- Automatizar optimización: algoritmos que recomiendan la mejor caja/estrategia según parámetros objetivo (minimizar tiempo, coste, o congestión).