

Modelado de Sistemas bajo Incertidumbre

Juliana Quintana-Rojas
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Los Andes

Sobre mí

Ingeniera Química y de Alimentos
M.Sc. en Ingeniería Química
Ph.D en Ingeniería (proceso)

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

- Analítica de datos
- Machine learning e IA
- Modelado de incertidumbre en sistemas de ingeniería
- Análisis de riesgo y confiabilidad

AREAS DE INVESTIGACIÓN

Modelado de la confiabilidad y riesgo de la red de gas en Colombia por medio de la implementación de ML y agentes de IA para predecir fallas

INVESTIGACIÓN ACTUAL



Reglas del curso

- **Preparación:** lecturas obligatorias antes de cada clase magistral; las sesiones son de discusión y aplicación, no de introducción.
- **Parciales:** 3 parciales individuales en el semestre. Supletorios bajo cumplimiento del reglamento de la Universidad
- **Actividades :** 3 actividades magistrales evaluables. Supletorio bajo cumplimiento de excusas válidas de la Universidad.
- **Laboratorios:** 3 laboratorios en complementarias evaluables. Supletorio bajo cumplimiento de excusas válidas de la Universidad.
- **Atención a estudiantes:** horarios publicados en Bloque Neón; también por correo. Citas pueden ser con profesores magistrales o AG.
- **Excusas por inasistencia:** Evaluadas y verificadas según el Reglamento General de Estudiantes de Pregrado.
- **Reclamos de notas:** dentro del plazo anunciado tras la publicación de cada nota.
- **Nota final:** se aproxima a 2 decimales y, una vez publicada, es innegociable (solo se aceptan reclamos por errores numéricos o recalificación del final).
- **Bonos:** puntos adicionales en los parciales sumados directamente sobre la nota del mismo. Bono extra sobre los laboratorios basado en el desempeño de los talleres realizados en TA.
- **Integridad académica:** cualquier sospecha de fraude se trata según el Reglamento General de Estudiantes de Pregrado.

Programa del curso

Módulo 1 (Semanas 1-4)

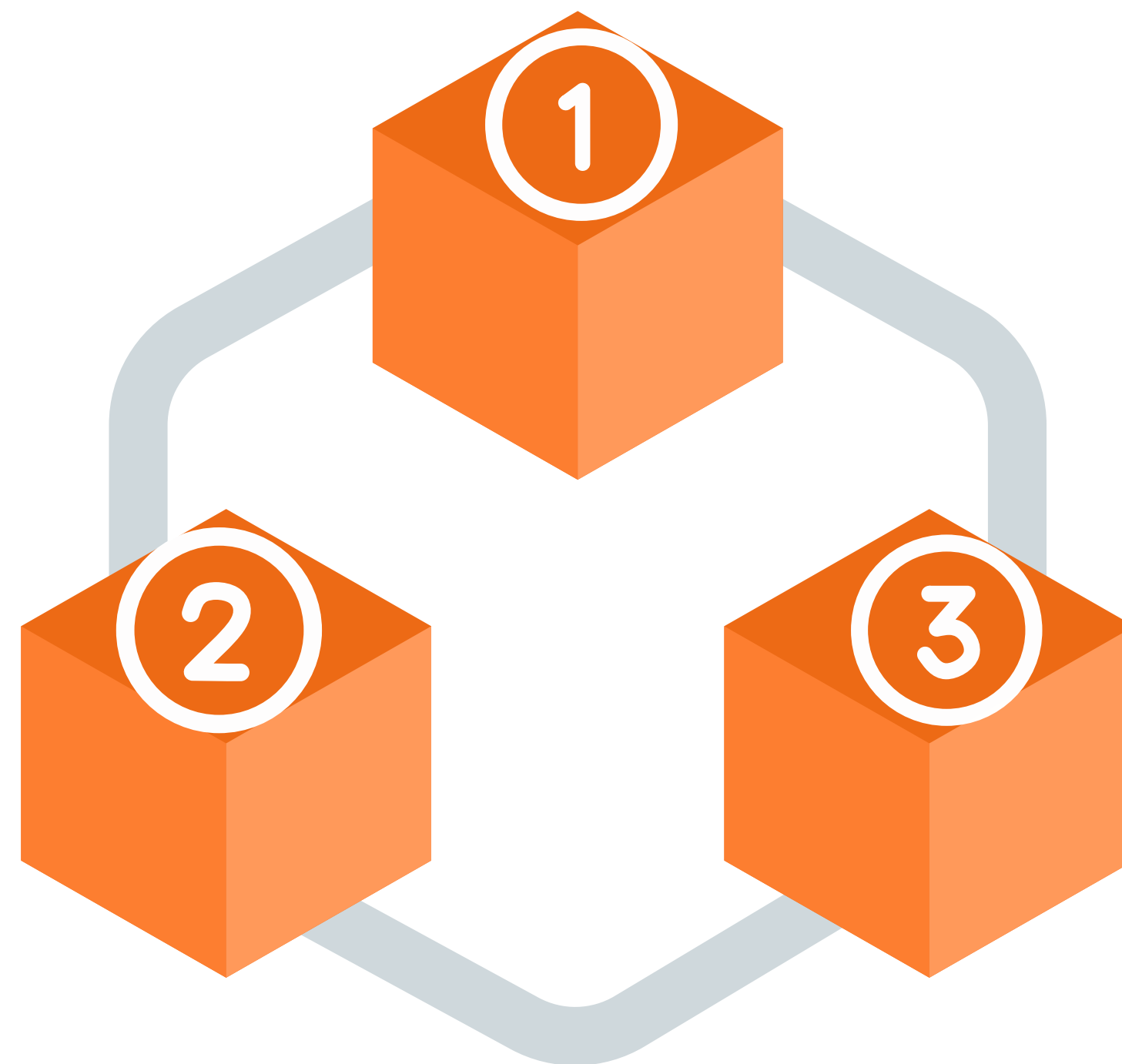
Fundamentos de Simulación y Probabilidad: pensamiento sistémico, simulación Monte Carlo, sistemas de eventos discretos (SED), sistemas de colas.

Módulo 2 (Semanas 5-10)

Cadenas Continuas y Sistemas de Colas: procesos de Poisson, cadenas de Márkov de tiempo continuo (CMTC), Parcial 1 (semana 6) y Parcial 2 (semana 10).

Módulo 3 (Semanas 11-16)

Ingeniería de Estudios de Simulación: modelado de entradas, verificación y validación, análisis de salidas, y casos de aplicación



Semana	Sesión y Temas Clave
1	- Sesión 1: Introducción a la simulación. Diferencias entre sistemas determinísticos y estocásticos. ¿Qué es la simulación? ¿Cuándo es apropiada/ no apropiada?; Ventajas/Desventajas. Ejemplos. Introducción a simulación de Monte Carlo. - Sesión 2: Repaso de variables aleatorias, distribuciones de probabilidad, momentos y distribuciones de probabilidad clave: Exponencial, Poisson y Normal, y su aplicación en problemas de ingeniería. Rol de las distribuciones en el modelado y simulación en ingeniería.
2	- Sesión 1: Generación de números pseudo-aleatorios uniformes (LCG) y generales con transformada inversa. - Sesión 2: Simulación Monte Carlo: pseudo-código de una simulación, cálculo de métricas de desempeño/resultados. Análisis de salida de la simulación Monte Carlo: Teorema del Límite Central (TLC) y su papel en la simulación. Uso de la estadística.
3	- Sesión 1: Conceptos clave de SED: Eventos, Reloj de simulación, Lista de eventos futuros (FEL), Avance del tiempo (Event Scheduling/Time Advance Algorithm). - Sesión 2: Vistas del mundo (World Views): Event Scheduling, Process Interaction, Activity Scanning. Ejemplo manual simple de SED (ej. cola simple).
4	- Sesión 1: Anatomía de un sistema de colas: Población de llamadas, Capacidad, Proceso de llegada, Comportamiento y disciplina de cola, Mecanismo de servicio. Notación Kendall. Medidas de desempeño a largo plazo: Tiempo promedio en sistema (L), Tiempo promedio por cliente (w). Ecuación de conservación $L=\lambda w$, Utilización del servidor. Ley de Little. - Sesión 2: Introducción al modelado de colas simples (ej. M/M/1) con SED.

Actividad magistral

Parcial

5	• Sesión 1: Definición de Procesos Estocásticos e introducción al proceso de Poisson. Modelado analítico. • Sesión 2: Propiedades del Proceso de Poisson (ej. suma de procesos, descomposición). Ejemplos computacionales y analíticos.
6	• Sesión 1: Ejemplos analíticos y computacionales • Sesión 2: Actividad Magistral 1
7	• Sesión 1: Parcial 1 • Sesión 2: Introducción a las Cadenas de Márkov de Tiempo Continuo (CMTC). Definición de tasas de transición y la matriz generadora (Q).
8	• Sesión 1: Modelado de CMTC. • Sesión 2: Análisis transitorio de CMTC: Ecuaciones diferenciales de Kolmogorov.
9	• Sesión 1: Análisis de estado estacionario de CMTC: Ecuaciones de balance y cálculo de la distribución límite. • Sesión 2: Análisis de tiempos: tiempo de primera pasada y tiempos de ocupación en CMTC
10	• Sesión 1: Ejemplos analíticos y computacionales. • Sesión 2: Actividad Magistral 2.

Actividad magistral

Parcial

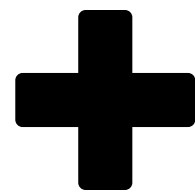
11	- Sesión 1: Parcial 2. - Sesión 2: Modelado de entradas: Identificación de distribuciones con datos: Histogramas (construcción, interpretación, elección de intervalos). Selección de la familia de distribuciones (heurísticas, bases físicas). Gráficos Cuantil-Cuantil (Q-Q plots) para evaluar ajuste visualmente.
12	- Sesión 1: Estimación de Parámetros para distribuciones seleccionadas (ej. media, varianza, MLE). Proceso formal de ajuste de distribuciones a datos brutos. Pruebas de bondad de ajuste (Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov). Ejemplos prácticos. - Sesión 2: Diferencias entre Verificación (¿construir el modelo correctamente?) y Validación (¿construir el modelo correcto?). Técnicas de Verificación del modelo computacional (debugging, trazas, pruebas unitarias). Calibración y Validación del modelo conceptual. Face Validity. Validación de supuestos (estructurales y de datos). Validación Input-Output. Test de Turing.
13	- Sesión 1: Tipos de simulaciones respecto al análisis de salidas: Terminales (horizonte finito) vs. Estado Estacionario. Naturaleza estocástica de los datos de salida (autocorrelación). Medidas de desempeño y su estimación puntual. - Sesión 2: Análisis para simulaciones terminales: Estrategia de Réplicas Independientes. Cálculo de ICs. Determinación del número de réplicas para una precisión especificada.
14	- Sesión 1: El problema del sesgo de inicialización (InitializationBias). Métodos para manejar el sesgo: Período de calentamiento (Warm-up Period) - Detección y eliminación. - Sesión 2: Estimación del error estándar en estado estacionario: Método de Réplicas (con período de calentamiento). Método de Medias por Lotes (Batch Means)
15	- Sesión 1: Comparar el desempeño de dos o más configuraciones de sistema. Comparación de dos sistemas usando muestreo independiente (pruebas t). Técnicas de Reducción de Varianza: Números Aleatorios Comunes (CRN) - Concepto y aplicación. Comparación usando CRN (pruebas t pareadas) - Sesión 2: Caso integrador.
16	- Sesión 1: Caso integrador. - Sesión 2: Actividad Magistral 3

PARCIAL 3
SEMANA 17

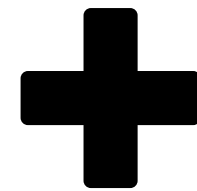
Evaluaciones y Fechas Importantes

Tipo de Evaluación	Fecha de Entrega / Realización	Ponderación (%)
Actividad Magistral 1	Jueves/Viernes, Semana 6	4%
Examen Parcial 1	Martes/Miércoles, Semana 7	20%
Laboratorio 1	Viernes, Semana 7	9%
Actividad Magistral 2	Jueves/Viernes, Semana 10	4%
Examen Parcial 2	Martes/Miércoles, Semana 11	20%
Laboratorio 2	Viernes, Semana 11	9%
Actividad Magistral 3	Jueves/Viernes, Semana 16	4%
Laboratorio 3	Viernes, Semana 16	10%
Examen Parcial 3	Programado por Registro	20%
	Total	100%

Herramientas y Software



Integrated
Development
Environment



- **SimPy**: Simulación de eventos discretos.
- **NumPy**: Operaciones numéricas y generación de números aleatorios.
- **SciPy**: Análisis estadístico y ajuste de distribuciones.
- **Matplotlib/Seaborn**: Visualización de datos y resultados.
- **Jmarkov**: Análisis de cadenas de Markov de tiempo continuo.

Introducción a la simulación

Juliana Quintana-Rojas

Departamento de Ingeniería Industrial

Universidad de Los Andes

¿Qué es la simulación ?

SHANNON ~ 1975 | INGALS ~ 2008

Simulation is the process of **designing a model of a real system and conducting experiments** with this model for the purpose either of understanding the behavior of the system or of evaluating various strategies (within the limits imposed by a criterion or set of criteria) for the operation of the system.

BANKS ~ 1990 | BANKS ~ 2010

Simulation is the **imitation of the operation of a real-world process or system over time**. Simulation involves the generation of an artificial history of the system, and the observation of that artificial history to draw inferences concerning the operating characteristics of the real system

¿Qué es la simulación ?

SHANNON ~ 1975 | INGALS ~ 2008

Crear una representación o imitación de un sistema del mundo real

BANKS ~ 1990 | BANKS ~ 2010

¿Qué es la simulación ?

SHANNON ~ 1975 | INGALS ~ 2008

Comprender el comportamiento del sistema o evaluar estrategias de operación ("qué pasaría si") para apoyar la toma de decisiones

Crear una representación o imitación de un sistema del mundo real

BANKS ~ 1990 | BANKS ~ 2010

¿Por qué usar la simulación en ingeniería?

Sistemas de ingeniería reales como:

- **cadena de suministro**
- **redes de servicios**
- **líneas de producción**

Son complejos, interdependientes y rara vez tienen una solución analítica simple.

Simulación de sistemas permite anticipar efectos indirectos, identificar cuellos de botella y tomar decisiones considerando la **incertidumbre como parte natural del sistema.**

Sistemas Determinísticos vs Estocásticos

DETERMINÍSTICO

Resultado final se conoce a partir de las condiciones iniciales del sistema, no hay probabilidad o aleatoriedad asociada.



ESTOCÁSTICO

Resultado final no se puede conocer a partir de las condiciones iniciales del sistema, hay probabilidad y aleatoriedad asociada

$a \text{ (VA)} \sim N(\mu, \sigma)$



¿ Qué valor tomará b ?

$b \text{ (VA)} \sim \exp(\mu = 10)$

Sistema determinístico



Al establecer las condiciones iniciales y las relaciones lógicas, el resultado es **totalmente determinable**

Ecuaciones diferenciales que describe una reacción química

Horario de citas médicas donde todos los pacientes llegan exactamente a la hora programada

Sistema estocástico



El resultado de una corrida de simulación es solo una **estimación estadística de las características reales del sistema**

2 ejecuciones con las **mismas condiciones** iniciales pero **diferentes números aleatorios** producirán **resultados distintos.**

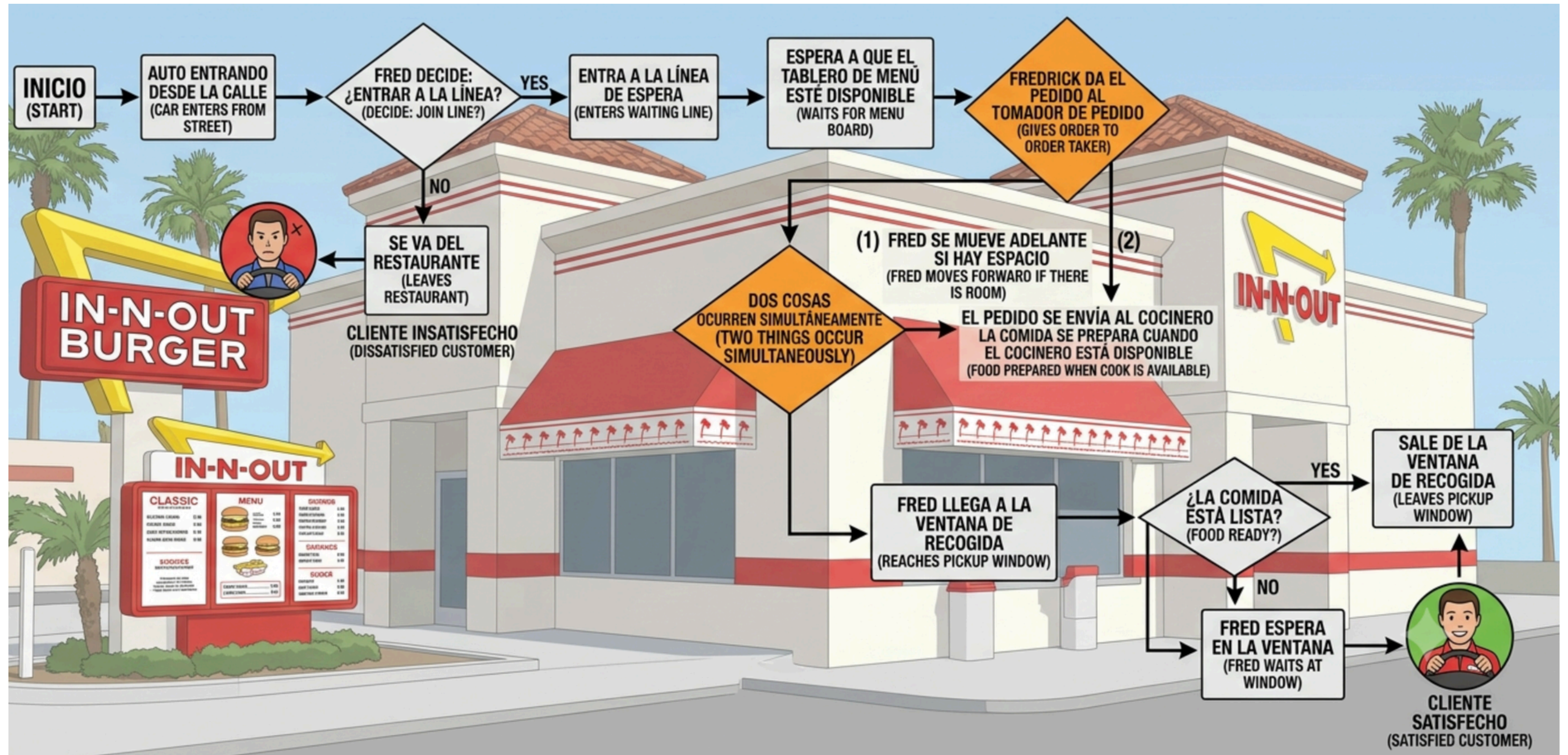
Sistemas de colas en
bancos

Sistemas de inventarios

Drive - thru

El sistema representa un restaurante de comida rápida con servicio drive-through. Los vehículos deciden si ingresan según la longitud de la fila; después realizan el pedido, avanzan cuando existe espacio y esperan hasta que el automóvil y su orden coincidan en la ventanilla de entrega. Las salidas del sistema son clientes satisfechos y clientes que abandonan el restaurante por una fila demasiado larga.

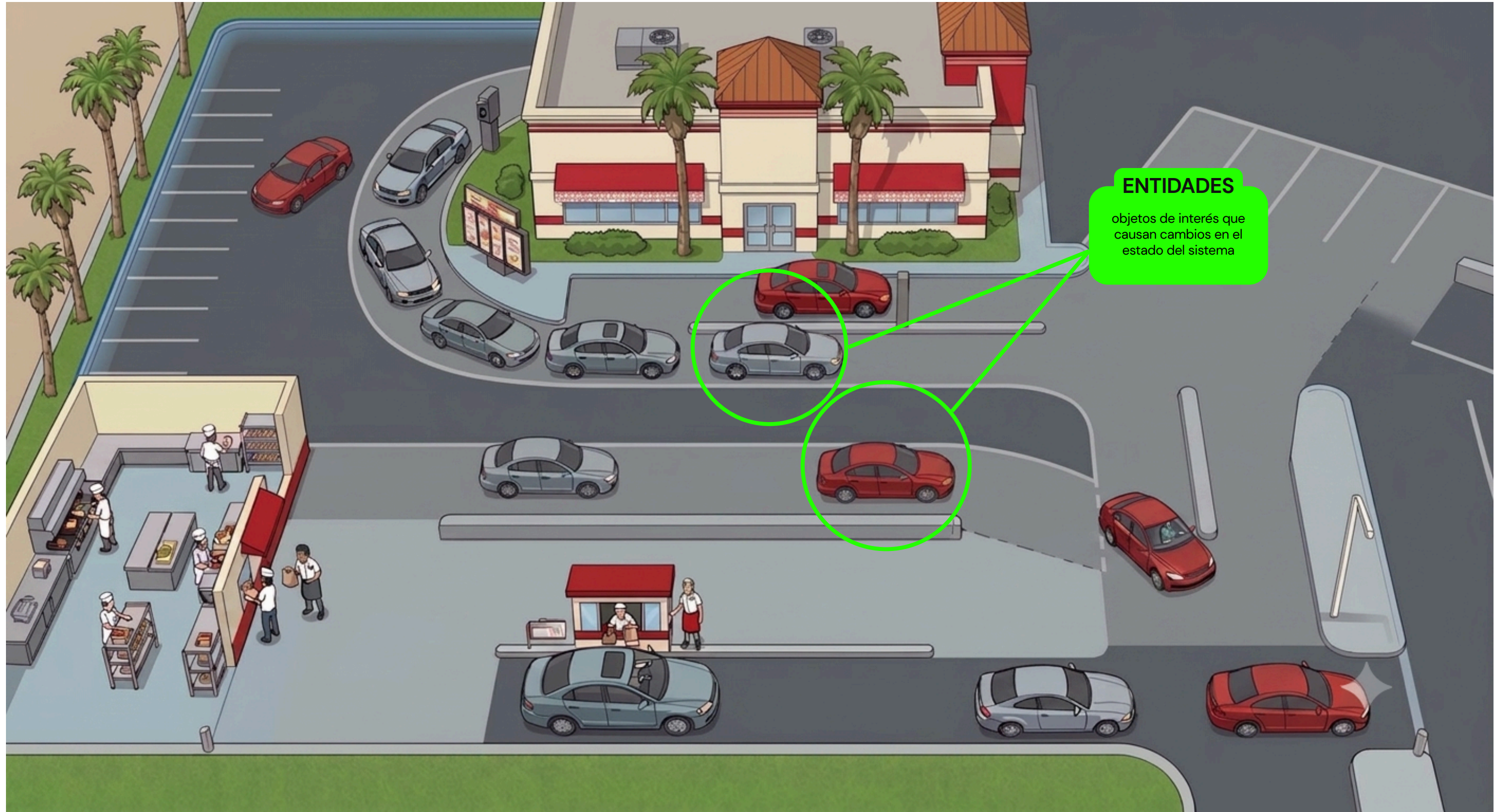


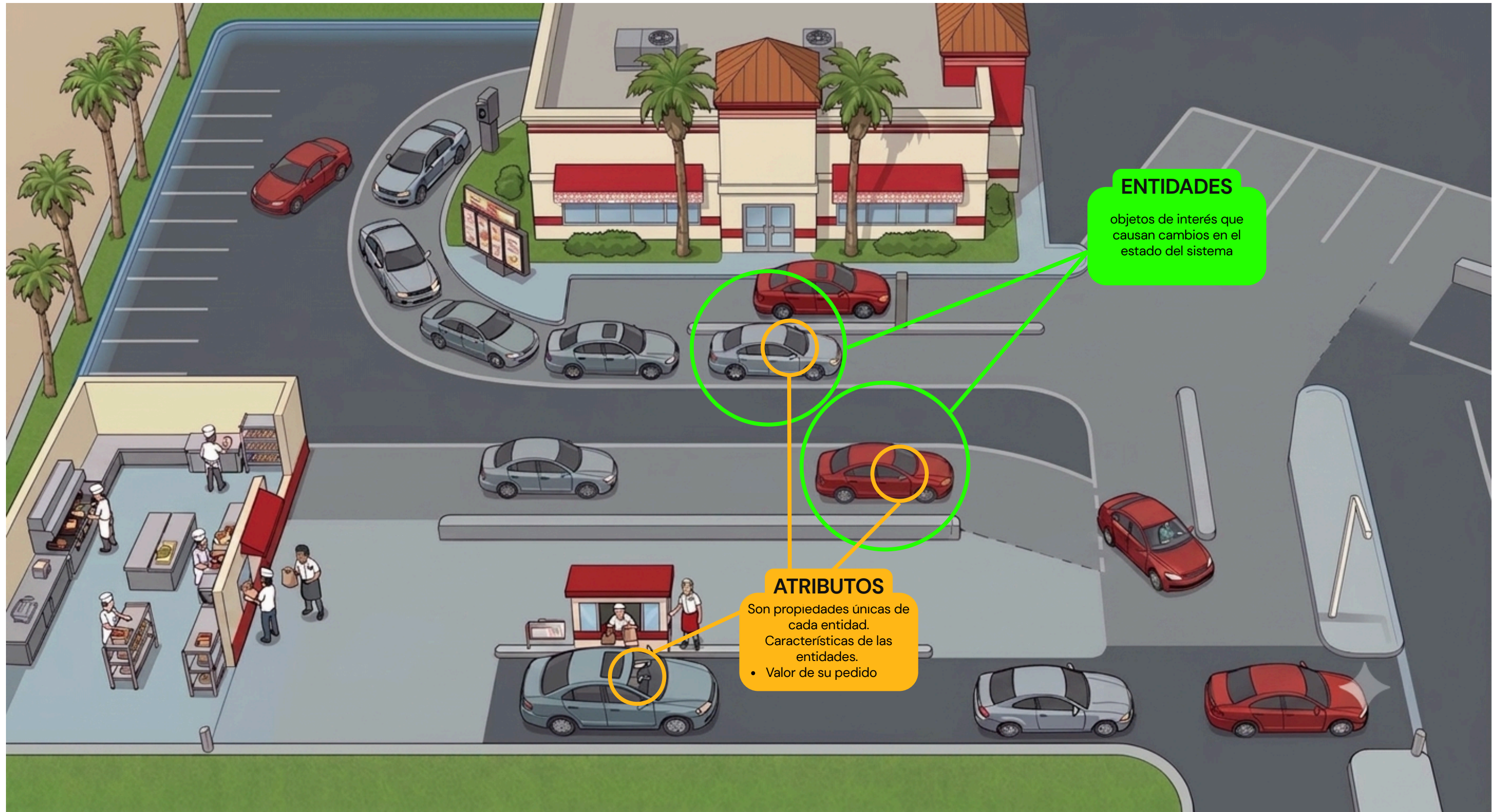


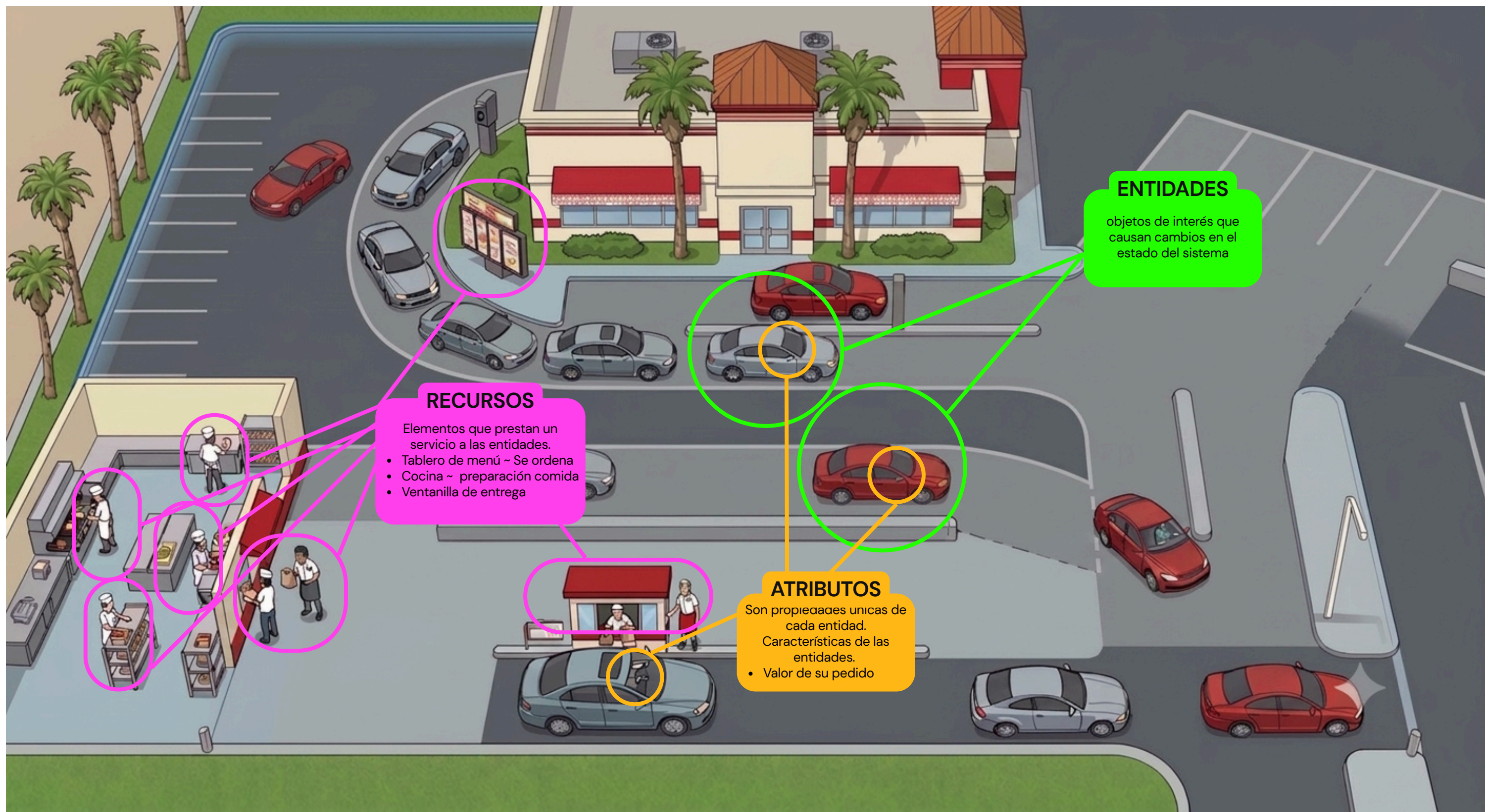


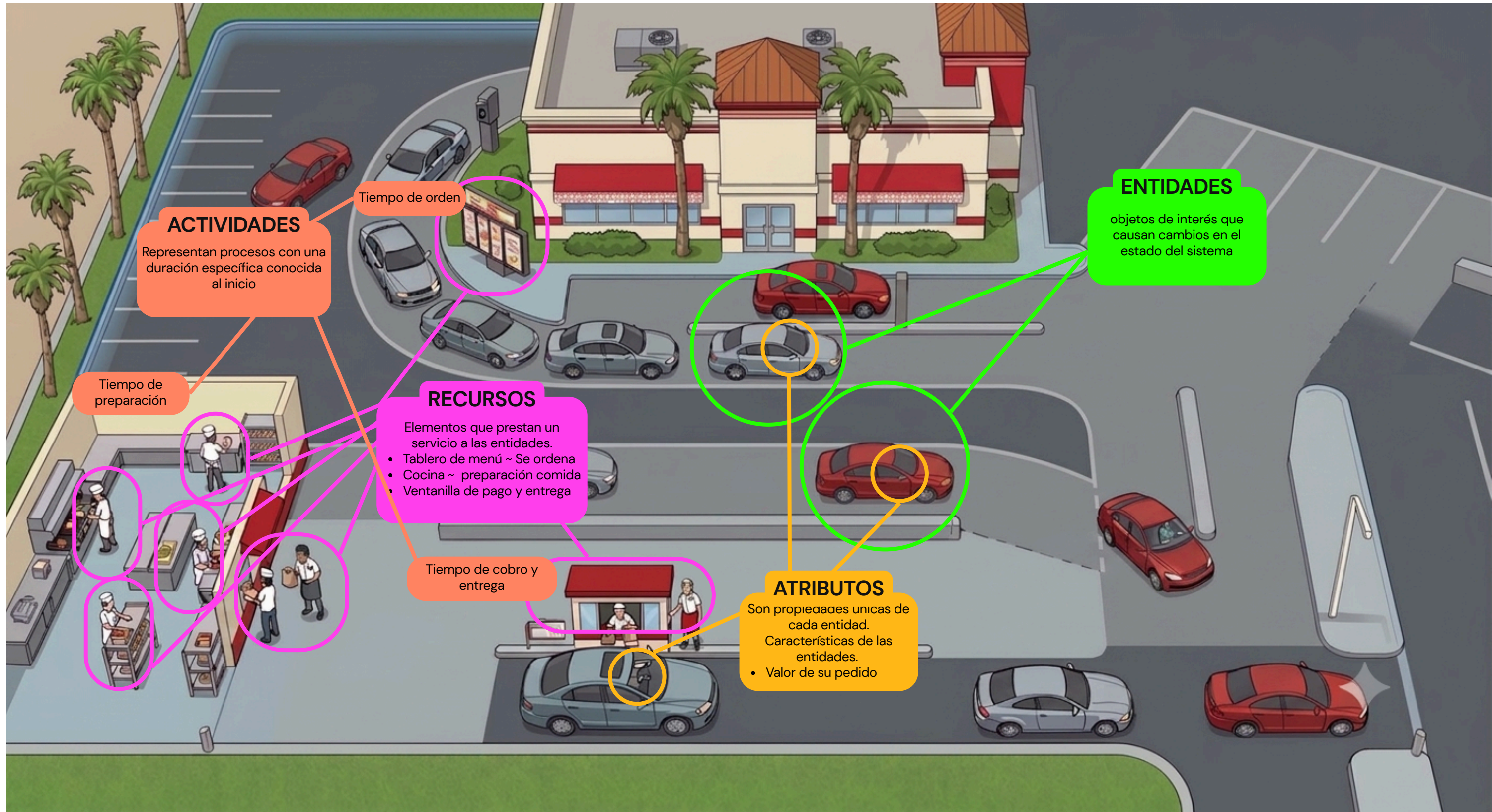
Componentes del sistema

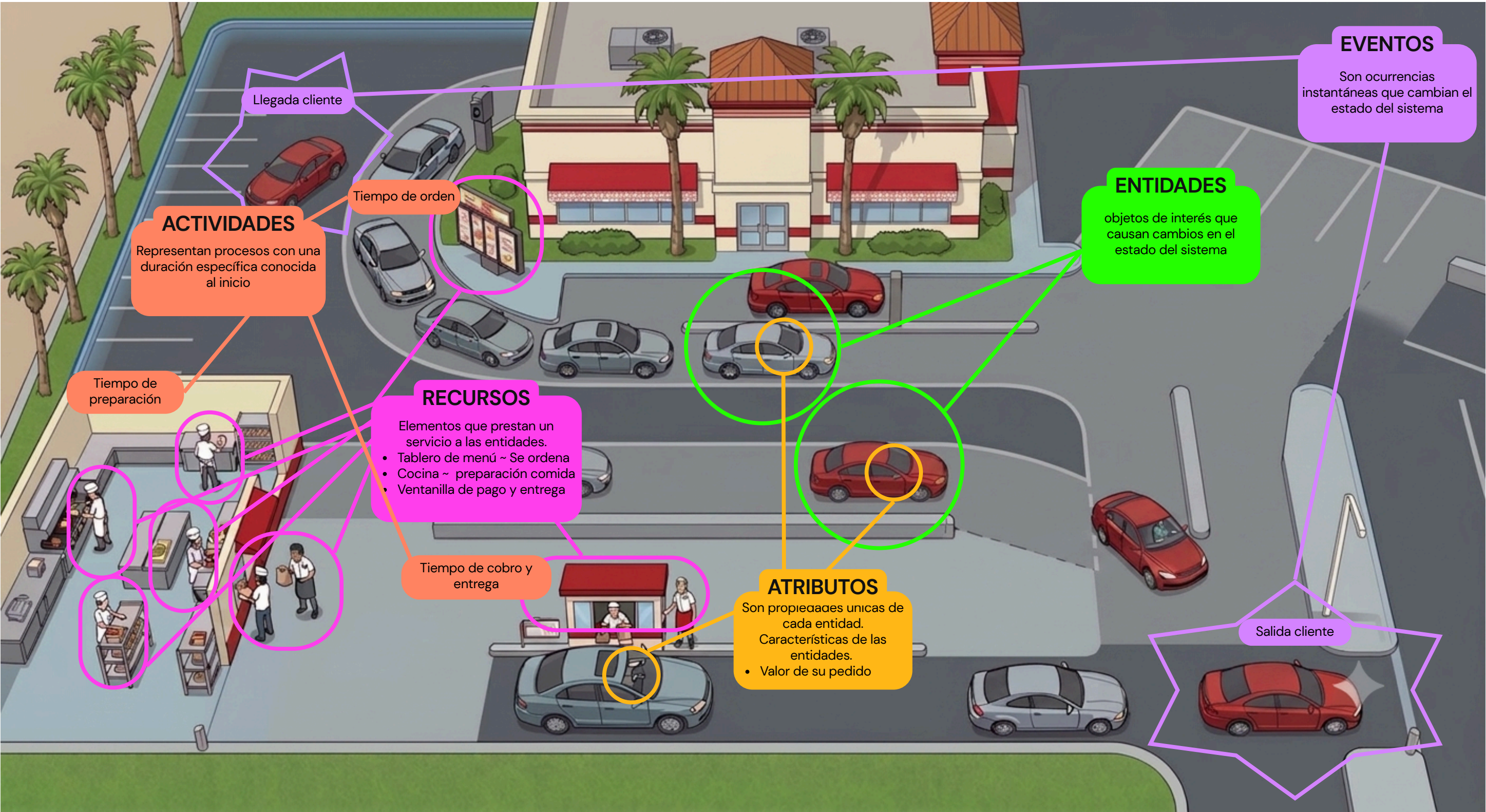


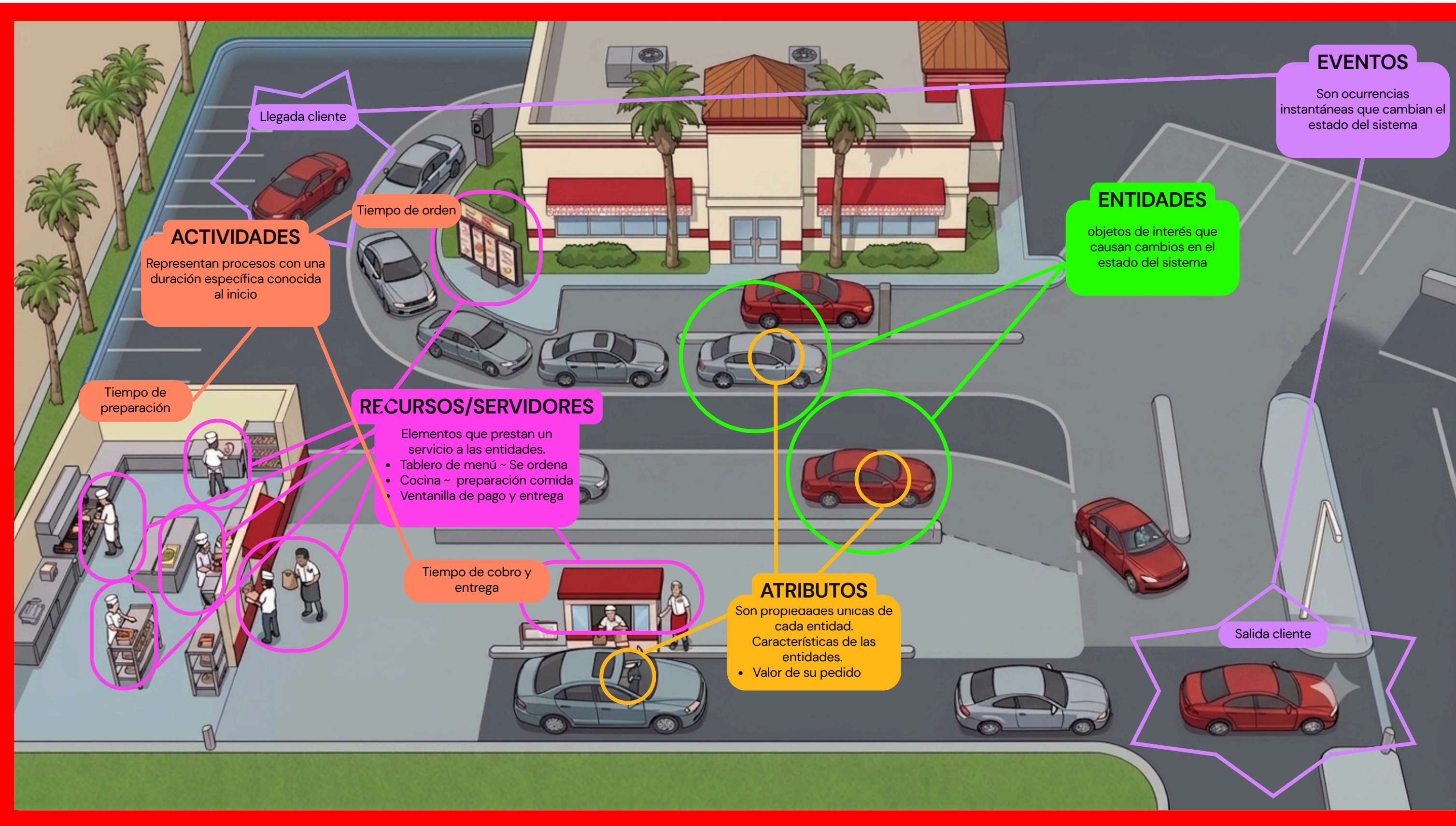












ESTADO DEL SISTEMA

Colección de variables necesarias para describir el sistema en cualquier punto del tiempo.

- Tiempo actual (CurrentTime)
- Número de autos en la fila en un momento dado.

FRONTERA DEL SISTEMA



¿Cuál es la diferencia entre actividades y eventos ?

¿ Por qué es importante la frontera del sistema ?

¿ El servidor de pago y entrega de comida debería ser diferente o puede ser el mismo ?

Drive - thru

DETERMINÍSTICO

Si supiéramos con total certeza que un auto llega exactamente cada 5 minutos y que cada pedido tarda exactamente 3 minutos en procesarse, el sistema sería determinístico

ESTOCÁSTICO

Fred puede llegar en cualquier momento y su pedido puede ser simple o complejo

Tiempos de llegada y de servicio son variables aleatorias que siguen distribuciones de probabilidad según el comportamiento en el mundo real

Produce resultados que son estimaciones estadísticas, ya que cada corrida puede dar un resultado diferente

¿Cuándo es apropiada la simulación?

- Se necesita estudiar interacciones internas complejas de un sistema o evaluar cambios organizacionales y ambientales sin interrumpir la operación real.
- Se desea experimentar con nuevos diseños de sistemas (como una nueva fila en el drive-through) antes de invertir recursos en su construcción.
- El sistema es tan complejo que no existen soluciones matemáticas analíticas cerradas

¿Cuándo no es apropiada la simulación?

- El problema puede resolverse por sentido común o mediante cálculos analíticos simples (ej. si llegan 100 personas por hora y un cajero atiende 12, se sabe de inmediato que se necesitan al menos 9 cajeros).
- Es más fácil y económico realizar experimentos directos (ej. poner a una persona real a tomar pedidos con un terminal portátil para probar el efecto).
- Los costos de la simulación superan los ahorros potenciales, o no se cuenta con los datos, el tiempo o el personal capacitado necesario.

Ventajas de la simulación

Exploración sin riesgo

Probar nuevas políticas o diseños sin interrumpir el sistema real

Compresión/ Expansión del tiempo

Evaluar años de operación en minutos o estudiar procesos rápidos en cámara lenta

Diagnóstico de problemas

Identificar cuellos de botella y entender las interacciones entre variables

Desventajas de la simulación

Entrenamiento especial

Construir modelos es un arte que requiere capacitación y experiencia

Dificultad de interpretación

Los resultados son aleatorios y pueden ser difíciles de distinguir de la variabilidad del sistema

Consumo de tiempo y dinero

El desarrollo de modelos detallados puede ser costoso y lento

Tipos de simulación

Eventos discretos

Modela el sistema como una secuencia de eventos que ocurren en instantes específicos del tiempo.

Monte Carlo

Usa muestreo aleatorio repetido para estimar el comportamiento de sistemas con incertidumbre en un momento específico (estática)

Continua

Representa el sistema mediante ecuaciones que cambian de forma continua en el tiempo.