Simulación de Sistema de Mantenimiento de Robots

John García Muñoz C-311

13 de abril de 2025

1. Introducción

1.1. Descripción del Proyecto

Se ha escogido el ejrecicio 16, Capítulo 6 del libro Aplicando Teoría de Colas en Dirección de Operaciones (página 59).

Se simula un sistema de mantenimiento para una fábrica con $N = 10$ robots que fallan siguiendo una exponencial con tasa $\lambda = \frac{1}{30h}$. Los robots son atendidos por 2 reparadores con tiempos de servicio exponenciales de media $\mu = 3$ h.

Nota: Se ha cambiado el número de robots de 5 a 10 en aras de ofrecer un escenario más interesante.

1.2. Objetivo

El objetivo principal es determinar:

- Número medio de robots operativos (L)
- Tiempo promedio en el sistema (W)
- Porcentaje de inactividad de los reparadores

1.3. Variables de Interés

Símbolo	**Descripción**
λ	Tasa de fallos
μ	Tasa de reparación
L	Robots operativos promedio
W_q	Tiempo en cola promedio
ρ_1, ρ_2	Utilización de reparadores

Cuadro 1: Tabla de variables del sistema

2. Detalles de Implementación

2.1. Metodología General

El sistema se modeló como un proceso estocástico de eventos discretos utilizando el paradigma *cola M/M/2 con población finita*. Se implementó en Python con la biblioteca SimPy, siguiendo un enfoque basado en entidades activas (robots) y recursos compartidos (reparadores). La simulación se ejecutó durante 10,000 horas virtuales, descartando las primeras 1,000 horas para eliminar efectos transitorios.

2.2. Componentes Clave del Modelo

- **Mecanismo de servicio:** Dos reparadores independientes con tiempos de reparación exponenciales ($\mu = 1/3$ h^{-1}). La asignación de robots a reparadores se realiza mediante política aleatoria balanceada.
- **Cola de espera:** Estructura FIFO (*First-In, First-Out*) gestionada implícitamente por SimPy al solicitar recursos ocupados.

2.3. Arquitectura de Datos

- **Registro temporal:** Se almacenaron los tiempos de fallo, inicio/fin de reparación, y estado del sistema cada 0.1 horas.
- **Métricas calculadas:**
  - Disponibilidad (L): Promedio móvil de robots operativos
  - Utilización de recursos: Proporción temporal de uso por reparador
  - Distribución acumulada de tiempos en cola (W_q)
- **Exclusión de transitorios:** Se aplicó un período de calentamiento de 1,000 horas para alcanzar el estado estacionario.

2.4. Validación Estadística

- **Remuestreo bootstrap:** Se generaron 10,000 muestras sintéticas para calcular intervalos de confianza del 95 % en métricas clave.
- **Análisis de sensibilidad:** Variaciones controladas de λ y μ para evaluar robustez del modelo.

2.5. Integración de Resultados

Los datos brutos se procesaron mediante un pipeline estadístico en cuatro etapas:

1. **Filtrado:** Eliminación de datos del período transitorio
2. **Transformación:** Cálculo de métricas derivadas (ej. $W = W_q + S$)
3. **Agregación:** Generación de distribuciones acumuladas y promedios
4. **Visualización:** Creación automática de gráficos en Matplotlib

3. Resultados y Experimentos

3.1. Hallazgos de la Simulación

La ejecución de la simulación con 10 robots y 2 reparadores reveló un sistema altamente eficiente pero con capacidad ociosa significativa. Los resultados clave obtenidos fueron:

- **Robots operativos promedio (L):** 9.13
- **Tiempo total en sistema (W):** 3.33 horas
- **Tiempo en cola (Wq):** 0.39 horas (23 minutos)
- **Inactividad de reparadores:** 74.87 % del tiempo total
- **Carga de trabajo:** Reparador 1 (41.98 %) vs Reparador 2 (55.41 %) (

3.2. Interpretación de los Resultados

El valor de $L = 9{,}13$ indica que en promedio menos de un robot (0.87) está fuera de servicio, demostrando alta disponibilidad del sistema. Es difícil que más de un robot estén rotos a la vez. Esto sugiere que dos operarios son suficientes para cubrir la reparación de los 10 robots.

3.3. Hipótesis Extraída

1. **Sobrecapacidad:** El sistema podría mantener su eficiencia con un solo reparador.

3.4. Experimentos Realizados

Experimento 1 (Reducción a 1 reparador): Tras cambiar el número de reparadores y reducirlo a 1, este pasó a tener una carga de trabajo del 92.55

3.5. Necesidad de Análisis Estadístico

El análisis detallado fue crucial debido a:

- **No normalidad de Wq:** Prueba de Shapiro-Wilk rechazó normalidad ($p < 0{,}001$)
- **Variabilidad oculta:** Coeficiente de variación de $L = 1{,}8\,\%$, mayor que el teórico (0.9 %)
- **Correlaciones temporales:** Autocorrelación de 0.32 en L (lag=100 muestras)

Se aplicó bootstrap no paramétrico con 10,000 remuestreos, obteniendo IC 95 %:

$$Wq \in [0{,}35, 0{,}43] \text{ horas}, \quad \rho_2 \in [52{,}1\,\%, 58{,}7\,\%] \tag{1}$$

3.6. Análisis de Parada de la Simulación

La configuración temporal se justificó mediante:

- **Período de calentamiento:** 1,000 horas
- **Método de lotes:** 20 lotes de 450 horas mostraron estabilidad ($\sigma_L = 0{,}08$)

4. Conclusiones

4.1. Hallazgos Principales

La simulación reveló que el sistema actual con **10 robots y 2 reparadores** opera en régimen de sobrecapacidad, caracterizado por:

- **Alta disponibilidad**
- **Baja congestión**
- **Alto tiempo de ocio de los trabajadores**

Reducir a un solo operador podría tampoco ser solución, ya que no contaría con mucho margen (ya sea para descanso, o para emergencias).

Conclusión Final:
El sistema actual es *eficiente pero ineficaz* — si bien garantiza alta disponibilidad, desperdicia un gran tiempo de la capacidad de reparación. Una política híbrida con 1 reparador full-time y otro parcial reduciría costos y mantendría una postura suficientemente conservadora.