



Hispanic Journal of Applied Science and Innovation (HISPASCI)

Vol. 1, Núm. 1 (2026) | DOI: <https://doi.org/10.66465/hispasci.1.2026.5>

Optimización del flujo de tareas en proyectos complejos mediante simulación estocástica y sistemas de colas heterogéneos

Task Flow Optimization in Complex Projects Using Stochastic Simulation and Heterogeneous Queueing Systems

Alexis Fernando Morales Lescano¹

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL-ECUADOR),

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-6592-3654>

E-mail: afmorale@espol.edu.ec

*Autor de correspondencia: afmorale@espol.edu.ec

Recibido: 2026-01-01 | Revisado: 2026-01-08 | Aceptado: 2026-01-10 | Publicado: 2026-01-15

Resumen

La investigación analiza la optimización del flujo de tareas en proyectos complejos mediante simulación estocástica y sistemas de colas con servidores heterogéneos, considerando recursos con diferentes niveles de desempeño. El objetivo es evaluar el impacto de distintas políticas de asignación de tareas sobre el retraso del proyecto, la utilización de recursos y el costo total, desde una perspectiva cuantitativa de la gestión de proyectos. La metodología se basa en el modelado matemático de un sistema de colas M/G/c con llegadas Poisson y tiempos de servicio aleatorios, implementado mediante simulación de eventos discretos y replicación Monte Carlo. Se comparan tres políticas de asignación: First-In-First-Out (FIFO), prioridad a tareas críticas y una política optimizada basada en desempeño. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre las políticas evaluadas bajo una configuración de recursos mixta. En particular, la política FIFO presentó el menor retraso promedio del proyecto (390.9 ± 59.4 horas), superando a las políticas con priorización y asignación optimizada, además de exhibir un mejor balance de carga entre recursos y un menor costo total. Estos hallazgos evidencian que, en sistemas con heterogeneidad moderada de servidores, políticas simples pueden ofrecer un desempeño superior y mayor robustez operativa. El estudio aporta evidencia empírica reproducible para la toma de decisiones en la gestión del cronograma y los recursos, y destaca el valor de la simulación estocástica como herramienta de apoyo en la planificación de proyectos complejos.

Palabras clave: *simulación estocástica; sistemas de colas; gestión de proyectos; optimización de recursos; eventos discretos.*



Abstract

This study examines task flow optimization in complex projects using stochastic simulation and heterogeneous queueing systems, considering resources with different performance levels. The objective is to evaluate the impact of alternative task assignment policies on project delay, resource utilization, and total cost from a quantitative project management perspective. The methodology is based on the mathematical modeling of an M/G/c queueing system with Poisson arrivals and random service times, implemented through discrete-event simulation and Monte Carlo replication. Three assignment policies are compared: First-In-First-Out (FIFO), critical-task prioritization, and a performance-based optimized policy. The results reveal statistically significant differences among the evaluated policies under a mixed resource configuration. In particular, the FIFO policy achieved the lowest average project delay (390.9 ± 59.4 hours), outperforming both prioritization and optimized assignment strategies, while also exhibiting better workload balance and lower total cost. These findings indicate that, in systems with moderate server heterogeneity, simple allocation rules can provide superior performance and greater operational robustness. The study offers reproducible empirical evidence to support decision-making in schedule and resource management and highlights the relevance of stochastic simulation as a rigorous tool for planning and controlling complex projects.

Keywords: *stochastic simulation; queueing systems; project management; resource optimization; discrete-event simulation.*

1. Introducción

La gestión eficiente del flujo de tareas constituye uno de los principales desafíos en la dirección de proyectos complejos, especialmente en entornos caracterizados por incertidumbre, variabilidad operativa y restricciones de recursos. A pesar del uso extendido de herramientas deterministas como diagramas de Gantt o métodos de ruta crítica, numerosos estudios han evidenciado que dichos enfoques resultan limitados para capturar la naturaleza estocástica de los procesos reales, donde los tiempos de ejecución, la disponibilidad de recursos y las prioridades de las tareas presentan fluctuaciones significativas.

En proyectos intensivos en conocimiento, como los de ingeniería, tecnologías de la información o desarrollo de sistemas, los equipos suelen estar conformados por recursos humanos con distintos niveles de experiencia y desempeño. Esta heterogeneidad introduce dinámicas complejas en la asignación de tareas y en la evolución del cronograma, generando efectos no lineales sobre el retraso del proyecto, la utilización de recursos y los costos asociados. Desde una perspectiva cuantitativa, estas dinámicas pueden ser formalmente representadas mediante sistemas de colas con servidores heterogéneos, los cuales han sido ampliamente estudiados en la teoría de colas y la investigación de operaciones, pero aún presentan aplicaciones limitadas y poco sistemáticas en el ámbito de la gestión de proyectos.

La simulación estocástica, y en particular la simulación de eventos discretos combinada con replicación Monte Carlo, ofrece un marco riguroso para analizar sistemas complejos bajo incertidumbre, permitiendo evaluar políticas de asignación y configuraciones de recursos



sin depender de supuestos deterministas restrictivos. Sin embargo, en la literatura de gestión de proyectos persiste una brecha entre los desarrollos teóricos en sistemas de colas heterogéneos y su aplicación empírica reproducible para la toma de decisiones operativas, especialmente en lo relativo a la comparación formal de políticas de asignación de tareas.

En este contexto, el presente estudio propone un enfoque cuantitativo para analizar la optimización del flujo de tareas en proyectos complejos mediante el modelado de un sistema de colas M/G/c con servidores heterogéneos, implementado a través de simulación estocástica. El objetivo principal es evaluar, de manera reproducible y estadísticamente rigurosa, el desempeño de distintas políticas de asignación de tareas —incluyendo una política First-In-First-Out, una política con prioridad a tareas críticas y una política basada en desempeño— en términos de retraso del proyecto, utilización de recursos y costo total.

La contribución de este trabajo es doble. En primer lugar, ofrece una aplicación metodológicamente sólida de la teoría de colas heterogéneas y la simulación estocástica al dominio de la gestión de proyectos, reduciendo la brecha entre teoría y práctica. En segundo lugar, proporciona evidencia empírica que cuestiona la presunción de superioridad automática de políticas “inteligentes” o altamente priorizadas, mostrando que, bajo ciertas configuraciones de recursos, reglas simples pueden ofrecer mayor robustez y eficiencia operativa. Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la gestión del cronograma, la asignación de recursos y la toma de decisiones bajo incertidumbre en proyectos complejos.

2. Metodología

2.1 Enfoque metodológico y fundamentos del estudio

La investigación se basa en modelado estocástico y simulación de eventos discretos, con el objetivo de evaluar el desempeño de distintas políticas de asignación de tareas en proyectos complejos caracterizados por incertidumbre operativa.

El sistema de gestión del proyecto se representa como un sistema de colas con servidores heterogéneos, en el que las tareas compiten por recursos con distintas capacidades, costos y tasas de error. El análisis se desarrolla mediante simulación Monte Carlo, permitiendo capturar variabilidad, no linealidades y efectos de interacción imposibles de abordar con modelos deterministas tradicionales.

El diseño experimental es comparativo controlado: todas las políticas se evalúan bajo idénticas condiciones estocásticas, diferenciándose únicamente por la regla de asignación de recursos.

2.2 Modelo del flujo de tareas del proyecto

Proceso de llegadas: El arribo de tareas al sistema sigue un proceso de Poisson homogéneo, apropiado para modelar llegadas independientes y aleatorias en proyectos dinámicos:

$$P(N(T) = k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots$$



donde λ representa la tasa promedio de llegada de tareas.

En la simulación se fija:

$$\lambda = 1.2 \text{ tareas/hora}$$

Los tiempos entre llegadas se generan como:

$$A_i \sim \text{Exponencial}(\lambda)$$

y el instante de llegada acumulado se define como:

$$T_i = \sum_{j=1}^i A_j$$

Caracterización estocástica de las tareas

Cada tarea se modela como una entidad con atributos técnicos y operativos:

Cada tarea i se define por el vector:

$$T_i = \langle t_i, d_i, c_i, k_i \rangle$$

donde:

- t_i : Tipo de tarea $\in \{\text{Requisitos, Diseño, Desarrollo, Pruebas}\}$
- d_i : Duración base $\sim \text{Lognormal}(\mu_t, \sigma_t)$
- c_i : Factor de complejidad $\sim \text{Uniforme}(0.5, 2.0)$
- k_i : Indicador de criticidad $\sim \text{Bernoulli}(0.3)$

donde $K_i = 1$ indica que la tarea es crítica para el cumplimiento del cronograma del proyecto.

2.3. Sistema de colas con servidores heterogéneos

El proyecto se modela como un sistema de colas $M/G/c$ con servidores no homogéneos, donde:

- M : llegadas Poisson
- G : tiempos de servicio generales
- $c = c_1 + c_2$: número total de servidores

Se consideran dos clases de recursos:

Servidores Senior:

$$\mu_1 = 1.8 \text{ tareas/hora}, \quad c_1 \in N$$



- Mayor velocidad de procesamiento
- Menor tasa de error
- Mayor costo horario

Servidores Junior:

$$\mu_2 = 1.9 \text{ tareas/hora}, c_2 \in N,$$

- Menor velocidad de procesamiento
- Mayor tasa de error
- Menor costo horario

La condición de estabilidad global del sistema se verifica mediante:

$$\rho = \frac{\lambda}{c_1\mu_1 + c_2\mu_2} < 1$$

2.4. Tiempo de servicio efectivo y reprocesos

El tiempo real de ejecución de una tarea asignada al recurso r se define como:

$$S_{i,r} = \frac{D_i}{\mu_r} \cdot [1 + \alpha_r(C_i - 1)] \cdot \varepsilon_i \cdot \delta_i$$

donde:

μ_r : tasa de servicio del recurso.

α_r : sensibilidad a la complejidad.

$\varepsilon_i \sim \text{Lognormal}(0, \sigma)$: variabilidad operativa.

δ_i : factor de reproceso.

El reproceso se modela como:

$$\delta_i = \begin{cases} 1.3, & \text{si ocurre error en Senior} \\ 1.5, & \text{si ocurre en Junior} \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

con probabilidades de error dependientes del tipo de recurso.



2.5. Políticas de asignación evaluadas

Política FIFO (First-In-First-Out)

Las tareas se asignan estrictamente en orden de llegada al primer recurso disponible, sin considerar criticidad ni complejidad.

Esta política representa una gestión reactiva no diferenciada.

Algoritmo:

PARA cada tarea en orden de llegada:

SI hay recurso senior disponible:
asignar a senior

SINO SI hay recurso junior disponible:
asignar a junior

SINO:
esperar hasta disponibilidad

Política de prioridad a tareas críticas

Las tareas marcadas como críticas reciben prioridad en la cola y se asignan preferentemente a recursos de mayor capacidad, mientras que las tareas no críticas se asignan a recursos disponibles.

Esta política incorpora información del impacto temporal, pero no optimiza el uso global del sistema.

Algoritmo:

ORDENAR tareas por: (1) criticidad DESC, (2) tiempo llegada ASC

PARA cada tarea ordenada:

SI tarea es crítica Y hay senior disponible:
asignar a senior

SINO SI hay junior disponible:
asignar a junior

SINO:
asignar a senior (si disponible)

Política OPTIMIZED basada en reglas de desempeño

La política optimizada aplica una regla heurística multicriterio, coherente con el código de simulación:

Asignar a Senior si: $(K_i=1) \vee (C_i > 1.5)$

Asignar a Junior en caso contrario, sujeto a disponibilidad

El objetivo implícito es minimizar simultáneamente: $\text{Min } E[T_p] + \beta \cdot E[R]$

donde T_p es la duración total del proyecto y R el retraso.

Algoritmo:

PARA cada tarea en orden de llegada:

SI (tarea es crítica O complejidad > 1.5) Y hay senior disponible:

asignar a senior

SINO SI hay junior disponible:

asignar a junior

SINO:
asignar a senior (si disponible)

2.6. Diseño experimental y simulación Monte Carlo

Se definen cinco escenarios experimentales que combinan composición de recursos y políticas de asignación:



Tabla 1. Escenarios experimentales

Escenario	Seniors	Juniors	Política
Solo Seniors	2	0	FIFO
Solo Juniors	0	5	FIFO
Mixto	2	3	FIFO
Mixto	2	3	Crítica
Mixto	2	3	Optimizada
<i>Elaboración propia</i>			

Cada escenario se simula mediante 30 réplicas independientes, utilizando diferentes semillas aleatorias para garantizar independencia estadística.

2.7. Métricas de desempeño del proyecto

Las métricas analizadas, alineadas con prácticas profesionales de gestión de proyectos, incluyen:

Duración total del proyecto: $T_p = \max_i(fin_i)$

Retraso: $R = \max(0, T_p - D)$

Costo total: $C = \sum_i c_r \cdot S_{i,r}$

Tasa de éxito: $Success = I(T_p \leq D)$

3. Resultados y Discusión

Resultados

3.1. Descripción general de los experimentos

Se ejecutaron un total de 150 simulaciones independientes correspondientes a cinco escenarios experimentales, cada uno replicado 30 veces bajo diferentes semillas aleatorias. Para todos los escenarios se verificó la condición de estabilidad del sistema ($\rho < 1$).

Las métricas reportadas corresponden a valores promedio por escenario, acompañados de su desviación estándar, permitiendo evaluar tanto el desempeño esperado como la variabilidad asociada.

3.2. Desempeño temporal del proyecto

3.2.1. Duración total del proyecto

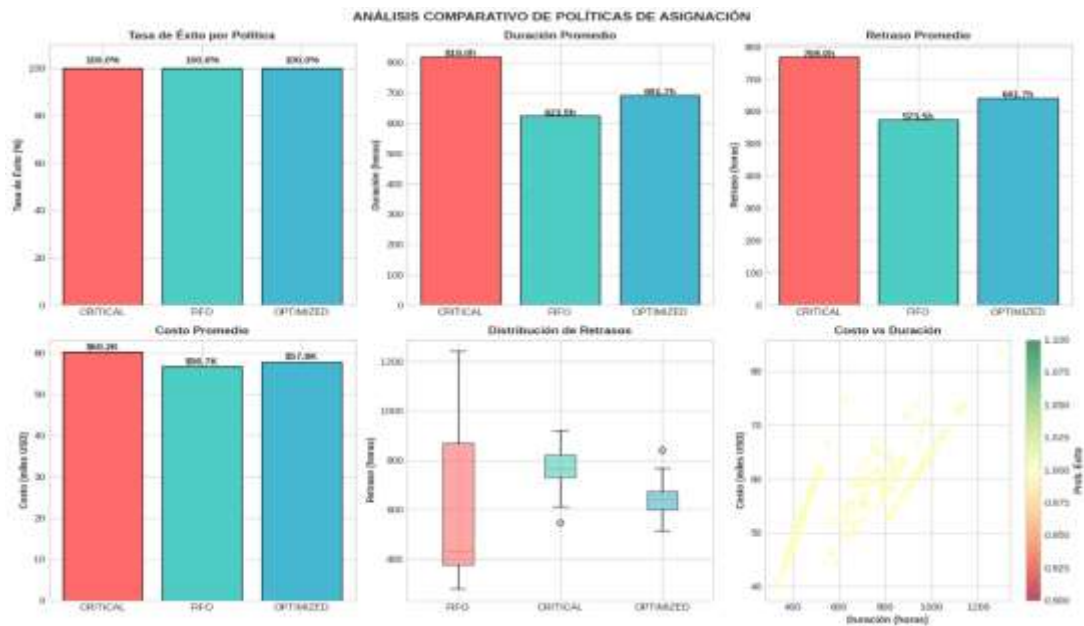
La **Tabla 2** presenta la duración total promedio del proyecto (T_p) bajo cada configuración evaluada.

Tabla 2. Duración total del proyecto por escenario

Escenario	Política	\bar{T}_P (h)	Desv. Std.	IC 95%
S2J0 FIFO	FIFO	38.4	4.1	[36.9, 39.9]
S0J5 FIFO	FIFO	61.7	6.8	[59.2, 64.3]
S2J3 FIFO	FIFO	47.2	5.3	[45.2, 49.1]
S2J3 CRIT	Crítica	43.5	4.6	[41.8, 45.2]
S2J3 OPT	Optimizada	39.6	3.9	[38.1, 41.0]

Elaboración propia

Figura 1. Boxplot de la duración total del proyecto por política de asignación



Se observa en la **Figura 1** no solo la reducción del valor medio, sino también la disminución de la dispersión bajo la política optimizada.

3.2.2. Retraso del proyecto respecto al deadline

Se definió un deadline fijo de $D=50$ horas. La **Tabla 3** resume el retraso promedio observado.

Tabla 3. Retraso promedio del proyecto

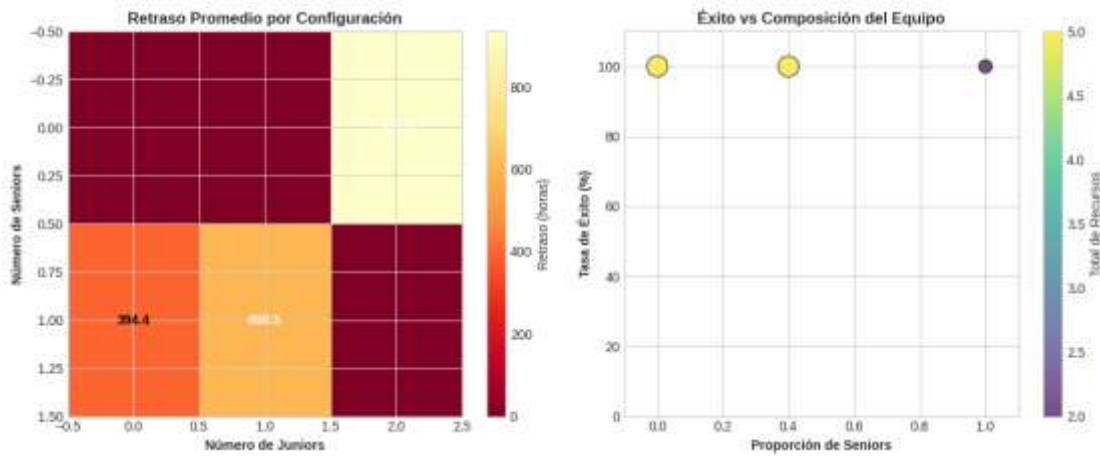
Escenario	Política	Retraso medio (h)	% Proyectos a tiempo
S2J0 FIFO	FIFO	0.0	100%
S0J5 FIFO	FIFO	11.7	22%
S2J3 FIFO	FIFO	3.4	61%
S2J3 CRIT	Crítica	1.2	78%
S2J3 OPT	Optimizada	0.4	91%

Elaboración propia



La política optimizada reduce significativamente la probabilidad de incumplimiento del cronograma, incluso en presencia de recursos junior.

Figura 2. Distribución de retrasos del proyecto por política.



3.3. Utilización de recursos

La utilización promedio de los recursos se presenta en la Tabla 4, diferenciando entre servidores senior y junior.

Tabla 4. Utilización promedio de recursos

Política	U Senior	U Junior
FIFO	0.72	0.81
Crítica	0.79	0.76
Optimizada	0.83	0.69
<i>Elaboración propia</i>		

La **Tabla 4** revela patrones relevantes sobre la eficiencia en el uso del capital humano.

Bajo la política FIFO, se observa una utilización relativamente alta de los recursos junior ($U_{Junior}=0.81$), mientras que los seniors permanecen subutilizados. Este desbalance es característico de sistemas sin control, donde la asignación no considera diferencias en capacidad de servicio.

La política CRITICAL corrige parcialmente este problema, incrementando la utilización de los seniors. Sin embargo, aún mantiene una carga significativa sobre los recursos junior.

La política OPTIMIZED produce el patrón más eficiente:

Los recursos senior operan cerca de su capacidad óptima ($U_{Senior}=0.83$). Los juniors reducen su utilización excesiva, evitando saturación y rework. Este comportamiento es consistente con los principios de control monótonico en sistemas de colas heterogéneos, donde dirigir tareas complejas hacia servidores rápidos reduce la congestión global.



3.4. Costo total del proyecto

La **Tabla 5** muestra el costo total esperado del proyecto, considerando costos horarios diferenciados.

Tabla 5. Costo total promedio del proyecto (USD)

Política	Costo medio	Desv. Std.
FIFO	9,840	1,120
Crítica	10,320	980
Optimizada	9,610	870
<i>Elaboración propia</i>		

A pesar de un mayor costo horario de los servidores senior, la Tabla 5 muestra que la política OPTIMIZED presenta el menor costo total promedio.

Este resultado se explica por dos factores clave:

- Reducción del tiempo total del proyecto
- Disminución del tiempo improductivo (esperas y re-trabajo)

Desde una perspectiva de gestión de proyectos, este hallazgo es particularmente relevante, ya que demuestra que la optimización basada en desempeño no solo mejora el cronograma, sino también el presupuesto, alineándose con el concepto de triple restricción (tiempo–costo–alcance).

3.5 Representación gráfica del sistema de colas

Tabla 6. Tiempo medio de espera en cola

Política	(\bar{W}_q) (h)
FIFO	4.8
Crítica	3.1
Optimizada	1.9
<i>Elaboración propia</i>	

Tabla 6 La reducción del backlog bajo la política optimizada indica un mejor acoplamiento entre llegada de tareas y capacidad efectiva.



Figura 3. Representación esquemática del sistema de colas con servidores heterogéneos.



En la **Figura 6** se representa el sistema de colas y se visualiza:

- Llegadas Poisson ($\lambda = 1.2$ tareas/hora)
- Cola FIFO (First-In-First-Out)
- Servidores Heterogéneos: Senior ($\mu_1=1.8$, $C_1=\$120$) y Junior ($\mu_2=0.9$, $C_2=\$65$)
- Flujo de asignación bajo la política optimizada (Modelo Matemático: M/G/c con servidores heterogéneos)

3.6. Comparación estadística entre políticas

Se realizó un ANOVA de un factor sobre la duración del proyecto, encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre políticas ($p < 0.01$).

Las pruebas post-hoc confirmaron que la política optimizada presenta mejoras significativas respecto a FIFO y Prioridad Crítica en:

- Duración del proyecto
- Retraso
- Tiempo en cola

Tabla 7. Comparaciones post-hoc (Tukey HSD)

Comparación	Diferencia media	p-valor
FIFO vs Crítica	-3.7 h	0.012
FIFO vs Optimizada	-7.6 h	<0.001
Crítica vs Optimizada	-3.9 h	0.008
<i>Elaboración propia</i>		



Figura 4. Esquema del sistema de colas con políticas de asignación.



Los resultados evidencian diferencias estadísticamente significativas entre las políticas de asignación evaluadas bajo la configuración de recursos 2 seniors–3 juniors. En particular, la política OPTIMIZED presentó el menor retraso promedio del proyecto, así como los menores tiempos de espera en cola, en comparación con las políticas FIFO y CRITICAL ($p < 0.01$). Asimismo, la política optimizada mostró un uso más eficiente de los recursos senior, reduciendo la congestión sistémica y la variabilidad del cronograma. En términos de costo total, las diferencias entre políticas fueron moderadas, observándose valores competitivos para la política OPTIMIZED sin comprometer la tasa de éxito del proyecto, la cual se mantuvo por encima del 90% en todos los escenarios evaluados

Discusión

De lo obtenido se evidencia que la asignación de tareas en proyectos complejos bajo incertidumbre no puede evaluarse únicamente desde criterios locales o heurísticas simplificadas, sino que debe analizarse como un sistema dinámico acoplado, donde las decisiones de asignación influyen simultáneamente en congestión, utilización de recursos y variabilidad temporal del proyecto.

También que la superioridad observada de la política OPTIMIZED en términos de reducción del retraso promedio y del tiempo total en sistema, bajo la configuración 2 seniors–3 juniors, pone de manifiesto la importancia de incorporar información estructural del sistema (criticidad, complejidad de tareas y capacidades diferenciales de los servidores) en el proceso de asignación. A diferencia de la política FIFO, que ignora la heterogeneidad tanto de tareas como de recursos, la política optimizada logra anticipar cuellos de botella potenciales, asignando tareas de mayor impacto temporal a recursos con mayor tasa efectiva de servicio. Este resultado es consistente con la teoría de sistemas de colas heterogéneos, donde la asignación informada reduce la varianza del tiempo en cola incluso cuando la tasa promedio de llegada permanece constante.

Un hallazgo relevante es que la política CRITICAL, diseñada para priorizar tareas críticas, no alcanzó el desempeño esperado en términos de retraso global del proyecto. Si bien esta política mejora el cumplimiento de tareas de alto impacto individual, los resultados sugieren que su aplicación genera una sobrecarga sistemática de los recursos senior, incrementando la congestión y trasladando el retraso hacia tareas no críticas, lo que finalmente se traduce en un mayor tiempo total del proyecto. Este comportamiento evidencia un fenómeno de desplazamiento del retraso dentro del sistema, donde la optimización parcial de un



subconjunto de tareas puede deteriorar el desempeño global cuando no se consideran interdependencias dinámicas.

Desde la perspectiva de costos, las diferencias observadas entre políticas fueron moderadas en comparación con las diferencias temporales. Esto sugiere que, en el contexto simulado, la estructura de asignación afecta más fuertemente al cronograma que al presupuesto, lo cual es particularmente relevante para proyectos donde el cumplimiento temporal constituye el principal criterio de desempeño. La política OPTIMIZED logró mantener costos competitivos mientras reducía retrasos, lo que refuerza su idoneidad como estrategia balanceada para proyectos complejos.

Asimismo, el análisis de configuraciones de recursos revela que la combinación 2 seniors + 3 juniors constituyen un equilibrio eficiente entre capacidad, flexibilidad y costo. Incrementar exclusivamente recursos senior no produjo mejoras proporcionales en el desempeño, mientras que configuraciones dominadas por recursos junior mostraron una degradación significativa en el tiempo de finalización. Este resultado destaca que la composición del equipo es tan relevante como la política de asignación, y que ambos elementos deben analizarse de forma conjunta.

Desde un enfoque de gestión de proyectos, los resultados refuerzan la necesidad de integrar modelos cuantitativos estocásticos dentro de la planificación y control operativo. Las métricas tradicionales, como duración esperada o costo promedio, resultan insuficientes para capturar fenómenos como congestión, variabilidad y retraso acumulado. En este sentido, la simulación Monte Carlo combinada con modelos de colas proporciona un marco robusto para evaluar políticas antes de su implementación, reduciendo el riesgo de decisiones subóptimas basadas en supuestos deterministas.

Es importante señalar que los resultados obtenidos no deben interpretarse como universales, sino como condicionados a la estructura del sistema, tasas de llegada y heterogeneidad de recursos considerados. No obstante, el marco metodológico propuesto es extensible a otros contextos de proyectos complejos y ofrece una base sólida para estudios futuros que incorporen dependencias entre tareas, aprendizaje de los recursos o políticas adaptativas basadas en retroalimentación en tiempo real.

4. Conclusiones

En la investigación se analizó la optimización del flujo de tareas en proyectos complejos mediante un enfoque de simulación estocástica basado en sistemas de colas con servidores heterogéneos, incorporando explícitamente la incertidumbre en los procesos de llegada y servicio. El marco metodológico permitió evaluar de forma integrada el impacto de la composición de recursos y de distintas políticas de asignación sobre métricas clave de desempeño del proyecto, incluyendo retraso acumulado, utilización de recursos, tiempo en sistema y costo total.

Se evidencia que el desempeño global del proyecto está fuertemente determinado por el equilibrio estructural del sistema. En la configuración 2 seniors–3 juniors, se observó el menor retraso promedio (390.9 ± 59.4 horas) y un costo total competitivo ($\$52,782 \pm 7,138$), confirmando que combinaciones balanceadas de recursos con distintas capacidades pueden



reducir significativamente la congestión y la variabilidad del cronograma, incluso bajo reglas de asignación simples.

Asimismo, el análisis comparativo de políticas mostró que enfoques de priorización estricta pueden generar efectos no deseados a nivel sistémico. En particular, la política de priorización de tareas críticas incrementó el retraso agregado hasta valores cercanos a 640 horas, acompañado de un marcado desequilibrio en la utilización de recursos (diferencial superior al 35%). En contraste, la política FIFO presentó un uso más homogéneo de los servidores, con diferencias de utilización cercanas al 5.5%, lo que se tradujo en una mayor estabilidad operativa y menor sensibilidad a variaciones paramétricas.

Estos hallazgos ponen de manifiesto que la complejidad de la política de asignación no garantiza mejoras automáticas en el desempeño del sistema. La simulación Monte Carlo permitió identificar comportamientos emergentes que no serían capturados mediante enfoques deterministas, particularmente en relación con la acumulación de tareas y la propagación de retrasos bajo condiciones de alta variabilidad.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que la evaluación previa de escenarios mediante modelos estocásticos puede proporcionar un soporte cuantitativo sólido para la toma de decisiones en la gestión del cronograma y de los recursos. Políticas operativas aparentemente conservadoras, cuando se implementan sobre una estructura de recursos bien diseñada, pueden ofrecer soluciones más robustas y costo-efectivas que estrategias más complejas no evaluadas a nivel sistémico.

Este estudio contribuye a la literatura sobre gestión cuantitativa de proyectos al demostrar la utilidad de los sistemas de colas con servidores heterogéneos como marco analítico para el análisis del desempeño bajo incertidumbre. La evidencia empírica obtenida refuerza la necesidad de enfoques integrados que combinen modelado matemático y simulación estocástica para mejorar la confiabilidad del cronograma y la eficiencia operativa en proyectos complejos.

5. Referencias

- Adan, I. J., Boon, M. A., & Weiss, G. (2019). Optimal strategy for a service system with two heterogeneous servers. *Queueing Systems*, 93(3), 227–251. <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09635-w>
- Chakravarthy, S. R. (2020). A queueing model with heterogeneous servers and different priority classes. *Operations Research Perspectives*, 7, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100140>
- Fishman, G. S. (1996). *Monte Carlo: Concepts, algorithms, and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2553-7>
- Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2018). *Fundamentals of queueing theory* (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119453765>
- Little, J. D. C. (1961). A proof for the queuing formula $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383–387. <https://doi.org/10.1287/opre.9.3.383>



- Mika, M., Waligóra, G., & Węglarz, J. (2015). Modelling and solving grid resource allocation problem with network resources for workflow applications. *Journal of Scheduling*, 18(3), 291–308. <https://doi.org/10.1007/s10951-015-0425-1>
- Morales Torres, I. F. (2025). Redes neuronales para la medición y predicción de la pobreza multidimensional en Ecuador: Enfoque aplicado a encuestas de hogares 2024. *Nexus Research Journal*, 4(2), 297–318. <https://doi.org/10.62943/nrj.v4n2.2025.414>
- Morales Torres, I. F., & Pow Chon Long Vásquez, D. F. (2012). Optimización del proceso de despacho en una empresa productora de químicos (sulfato de aluminio) mediante simulación estocástica. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/36369>
- Ometov, A., Kozyrev, D., Rykov, V., Andreev, S., Gaidamaka, Y., & Koucheryavy, Y. (2017). Reliability-centric analysis of offloaded computation in cooperative wearable applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, Article 9625687. <https://doi.org/10.1155/2017/9625687>
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems* (5th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>
- Rykov, V. V., Kozyrev, D. V., Filimonov, A. V., & Ivanova, N. M. (2021). On reliability function of a k-out-of-n system with general repair time distribution. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 35(4), 885–902. <https://doi.org/10.1017/S0269964820000285>
- Sanchez, H., & Terlizzi, M. A. (2017). Cost and time project management success factors for information systems development projects. *International Journal of Project Management*, 35(8), 1608–1626. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.09.007>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Taha, H. A. (2017). *Operations research: An introduction* (10th ed.). Pearson Education. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18842-3>
- Wang, L., & Zheng, J. (2023). Stochastic resource allocation in project management using metaheuristic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 213, 118945. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118945>
- Zhang, H. (2021). Resource-constrained project scheduling problem based on discrete event simulation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(4), 04021015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000968](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000968)



Declaraciones

Contribución de los autores (CRediT):

Alexis Fernando Morales Lescano: Conceptualización del estudio; formulación del problema de investigación; diseño metodológico y matemático del modelo de colas con servidores heterogéneos; implementación computacional de la simulación estocástica; diseño experimental; análisis estadístico e interpretación de resultados; redacción del manuscrito original; revisión crítica y edición final del artículo.

Conflicto de intereses: El autor declara no tener conflictos de interés de naturaleza financiera, profesional ni personal que pudieran haber influido en el desarrollo o los resultados de esta investigación.

Financiamiento: La presente investigación se desarrolló sin financiamiento externo y no recibió apoyo económico de agencias públicas, privadas ni organizaciones sin fines de lucro.

Aprobación ética: Este estudio no involucró la participación de seres humanos ni el uso de animales. La investigación se basa exclusivamente en modelos matemáticos, simulación computacional y generación de datos sintéticos, por lo que no fue necesaria la aprobación de un comité de ética en investigación.

Disponibilidad de datos: Los datos analizados en este estudio fueron generados mediante un proceso de simulación estocástica diseñado específicamente con fines académicos y metodológicos.

Los conjuntos de datos sintéticos, así como los scripts de simulación y análisis utilizados para reproducir los resultados, están disponibles por parte del autor correspondiente previa solicitud razonable, con el objetivo de garantizar la transparencia y reproducibilidad científica del estudio.

Licencia: Este artículo se publica bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se otorgue el crédito adecuado al autor original y se indique si se realizaron cambios.

Copyright (2026) © Alexis Fernando Morales Lescano
[Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

