

JULIO 2025

Informe de DISTRIMAX

APELLIDO Y NOMBRE	Legajo
Aboulafia Gerardo	95938083
Barquet Amelie	46701782
Lombardo Micaela	46196183
Vazquez Agustina	45822538

0 Resumen Ejecutivo

El presente informe tiene como objetivo principal describir y evaluar el comportamiento del sistema logístico de DISTRIMAX a través de un modelo de simulación de eventos discretos. La compañía opera con tres plantas productivas y un centro de distribución, donde los camiones se desacoplan de los semiacoplados para su reutilización. Actualmente, cada planta cuenta con un único camión, situación que genera cuellos de botella y tiempos de espera significativos.

Para analizar distintas formas de operación, se modelaron dos configuraciones: (1) la tradicional, con un camión dedicado a cada planta, y (2) una alternativa flexible, en la que los camiones conforman una flota común que atiende la demanda de todas las plantas. Mediante simulaciones realizadas con la biblioteca Salabim en Python, se estudiaron diversos escenarios variando la cantidad de camiones y el parámetro de equidad β , que pondera la eficiencia logística frente a una distribución balanceada de los recursos.

Los resultados muestran que la estrategia de flota común combinada con $\beta = 2$ logra un desempeño favorable al mejorar la cantidad de entregas. Estas conclusiones se obtuvieron tras validar cuidadosamente las lógicas de asignación y los eventos clave del simulador, asegurando la consistencia del modelo.

El trabajo concluye con una discusión de los hallazgos y su relevancia para la toma de decisiones operativas en DISTRIMAX, proporcionando evidencia sobre cómo diferentes configuraciones impactan el desempeño sin pretender, en esta instancia, establecer un óptimo único sino explorar y comparar alternativas viables.

1 Objetivo

El objetivo de este estudio es diseñar y evaluar un modelo de simulación de eventos discretos que represente la operación logística entre las plantas productivas y el centro de distribución de DISTRIMAX, con el fin de determinar la cantidad de camiones que garanticen el correcto funcionamiento del sistema, minimizando tiempos de espera y maximizando la utilización de recursos. Asimismo, se busca analizar una alternativa operativa que permita que los camiones puedan operar libremente entre todas las plantas, evaluando su impacto en la eficiencia y complejidad del sistema.

1.1 Definición del problema y alcance

La empresa DISTRIMAX cuenta con tres plantas productivas y un centro de distribución que gestiona los envíos a los clientes. Para mejorar la coordinación interna se adoptó un esquema en el que el camión tractor se desacopla del semi-acoplado, de modo que cada componente pueda reutilizarse de forma independiente. Actualmente cada planta dispone de tres semi-acoplados y un único camión; esta configuración provoca esperas y posibles cuellos de botella en los procesos de carga, traslado y descarga.

El sistema incluye procesos estocásticos y eventos secuenciales cuyas variaciones condicionan el desempeño global. En particular, el hecho de que cada planta cuente con un solo camión restringe la disponibilidad de tractores y podría no ser la forma más conveniente de operar. Por ello se plantea estudiar la posibilidad de permitir que los camiones formen una flota común que atienda a las tres plantas, eliminando la restricción de asignación fija.

Con este enfoque, la necesidad principal es simular el funcionamiento actual y comparar alternativas de asignación de recursos a fin de comprender la dinámica del sistema, identificar cuellos de botella y estimar cómo se comportan los indicadores clave (tiempos de espera, ociosidad de recursos, nivel de servicio) bajo diferentes supuestos. El trabajo se estructura en dos grandes etapas:

1. **Modelo base (asignación fija).** Se representa el esquema vigente, donde cada planta opera con su propio camión y tres semi-acoplados. La simulación permite medir el desempeño bajo las condiciones actuales y detectar puntos críticos tales como acumulación de semi-acoplados, largos tiempos de espera o bajo grado de utilización de tractores.
2. **Modelo alternativo (flota común).** Se incorpora la posibilidad de que cualquier camión atienda cualquier planta, convirtiendo la flota de tractores en un recurso compartido. Este cambio ofrece mayor flexibilidad, pero también incrementa la complejidad de coordinación. El objetivo es observar cómo se modifican los indicadores y qué nivel de desempeño se alcanzaría con diferentes cantidades de camiones disponibles.

Sobre ambos modelos se ejecutarán varios escenarios con distinta cantidad de tractores para evaluar la relación entre recursos disponibles y desempeño del sistema. La meta práctica es proponer un rango razonable de camiones que asegure niveles operativos adecuados.

La metodología empleada es la simulación de eventos discretos (SED), apropiada para sistemas cuya evolución depende de eventos que ocurren en instantes discretos, dejando al sistema inalterado entre ellos. Los tiempos asociados a cada evento se representarán mediante distribuciones probabilísticas que reflejen la variabilidad observada en la operación real.

La herramienta metodológica empleada será la simulación de eventos discretos (SED), ya que el sistema evoluciona en función de eventos que ocurren en momentos puntuales del tiempo virtual, como la llegada de un camión a una planta o la finalización de una descarga. Entre cada evento, el estado del sistema permanece inalterado. Dado que los tiempos involucrados presentan variabilidad aleatoria, se utilizarán distribuciones probabilísticas para modelar dichos procesos.

1.1.1 Variables de decisión y de referencia

En el marco del desarrollo del simulador, se identificaron dos tipos de variables fundamentales para el análisis: las variables de decisión y las variables de referencia. Las variables de decisión son aquellas sobre las que el usuario puede intervenir activamente para modificar el comportamiento del sistema. En este caso, se consideran las siguientes:

- Configuración del sistema: camiones asignados a una única planta o a múltiples plantas.
- Cantidad total de camiones en el sistema.

- β , parámetro de ponderación (controla el trade-off entre dos objetivos del sistema: minimizar tiempo de entrega y distribuir equitativamente los recursos).

Por otro lado, las variables de referencia permiten medir el desempeño del sistema bajo distintas configuraciones. Estas variables no se modifican directamente, pero son el resultado de las decisiones tomadas y sirven para evaluar su impacto. Las variables consideradas son:

- Cantidad de semiacoplados entregados
- Tiempo promedio de espera de los camiones en planta.
- Tiempo promedio de espera de los camiones en el centro de descarga.
- Tasa de utilización de los camiones.
- Cantidad de semiacoplados entregados por planta

Estas métricas permiten analizar el rendimiento logístico del sistema, identificar ineficiencias y tomar decisiones informadas.

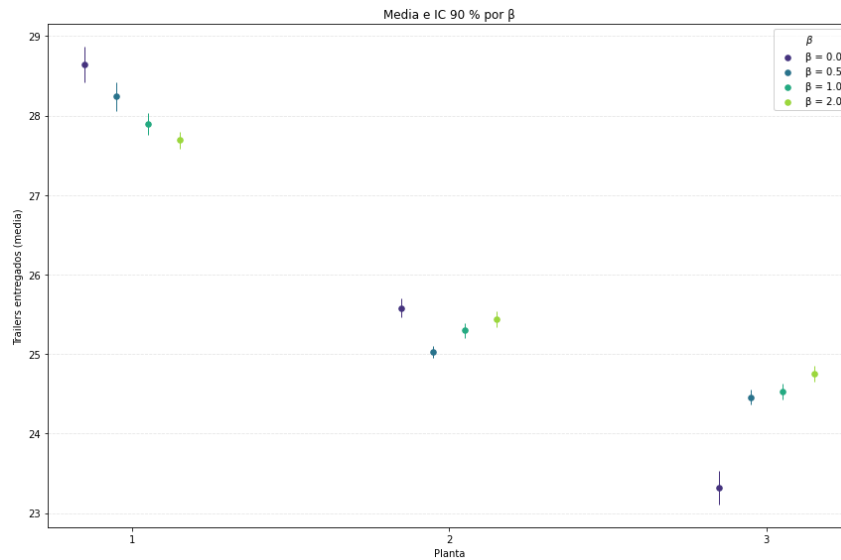
En la primera configuración, donde cada camión está asignado a una planta específica (modelo camión→planta), la cantidad de camiones debe ser un múltiplo de 3 para respetar la distribución equitativa entre las plantas. Se evaluará también la incorporación de más camiones. En la segunda configuración, donde los camiones pueden ir a cualquier planta, la única condición es que la cantidad de camiones sea superior a 3, permitiendo una mayor flexibilidad operativa.

1.2 Experimentación y resultados

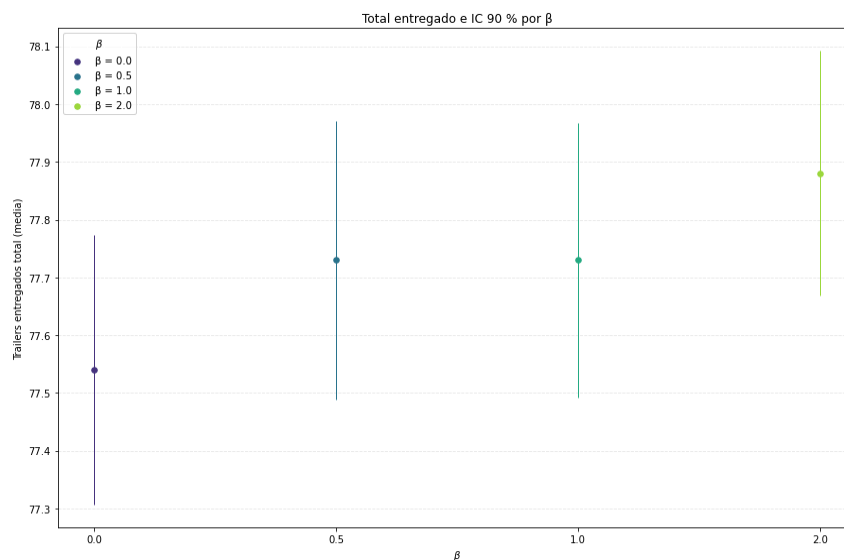
Tal como se explicó en el modelo conceptual, se experimentó con las distintas heurísticas propuestas por el negocio. Por un lado, se exploró cómo se desempeñaban los camiones bajo una lógica de asignación única a cada planta. Para 100 simulaciones y un intervalo de confianza del 90%, en el primer escenario se obtuvo los siguientes resultados:

Métrica	Media (μ)	Desvío Estándar (σ)	Intervalo de confianza (90%)
Cantidad de semiacoplados entregados	77.73	1.3	[77.516, 77.94]
Minutos que esperaron por un semiacoplado vacío	9.69	6.06	[8.69, 10.68]
Minutos que esperaron por un semiacoplado lleno	0.93	0.49	[0.85, 1]
Utilización de los camiones	97.79	1.25	[97.58, 97.99]
Cantidad de semiacoplados entregados por planta	P1: 29.94 P2: 25.07 P3: 22.72	P1: 0.94 P2: 0.49 P3: 0.45	P1: [29.79, 30.09] P2: [24.99, 25.15] P3: [22.65, 22.79]

Para la segunda heurística, se ejecutaron 100 simulaciones para 4 valores diferentes de β : 0, 0.5, 1, 2. Por lo tanto, en esta oportunidad se cuenta con 400 ejecuciones totales. Se obtuvieron los siguientes resultados:

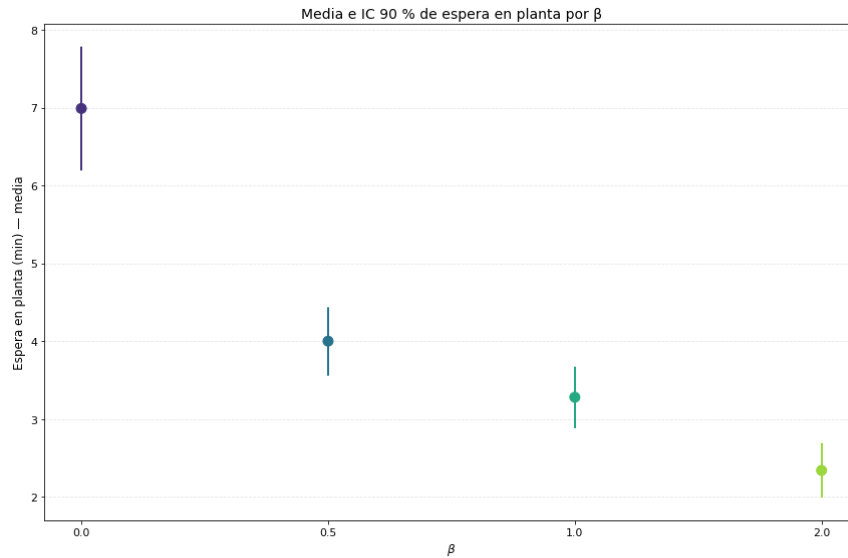


En este primer gráfico se observa la cantidad de trailers entregados por planta para los distintos valores de β . Al incrementar el coeficiente β se logra una redistribución más equitativa de los trailers entregados entre las plantas. Particularmente, la Planta 1, que inicialmente concentraba la mayor carga operativa, reduce su volumen de entregas, mientras que la Planta 3 se ve beneficiada con un incremento. La Planta 2 permanece con valores estables, lo que podría indicar una posición neutral en la lógica de decisión. Esto valida la utilidad del parámetro β como mecanismo de balanceo en el sistema.

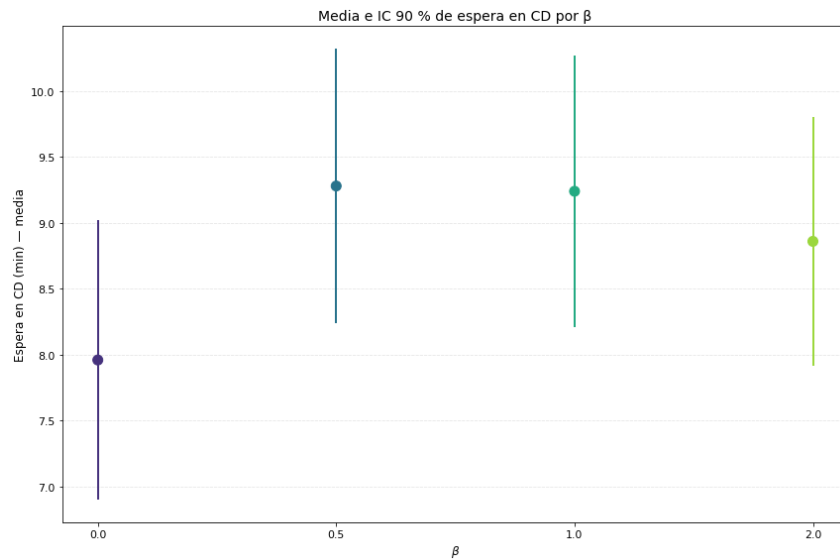


En este gráfico se presenta la media de trailers entregados en función de los distintos valores del coeficiente β . El objetivo es analizar cómo varía el rendimiento global del sistema en términos de entregas a medida que se modifica este parámetro. La información obtenida permite justificar la elección de $\beta = 2$ como

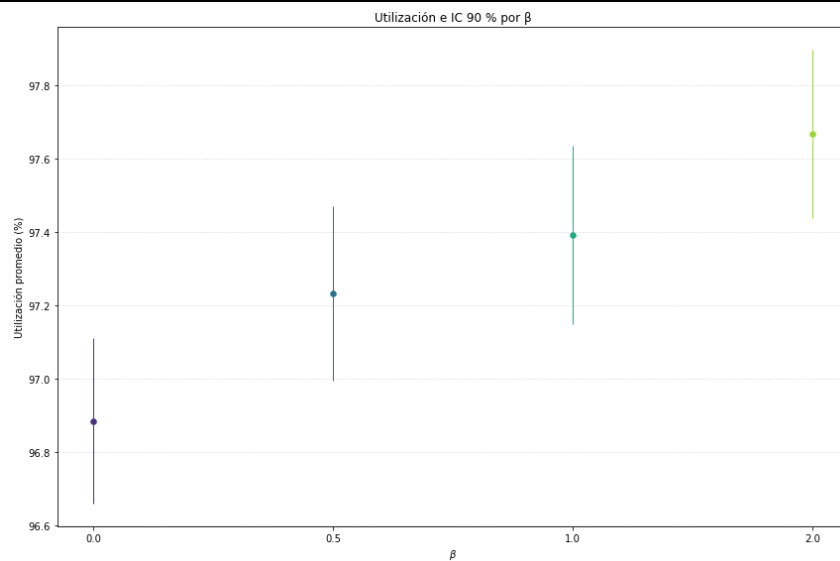
valor óptimo, dado que maximiza la cantidad promedio de trailers entregados, lo cual se observa de manera clara en la tendencia ascendente de la media a medida que β aumenta.



También se requiere analizar el impacto de β sobre el tiempo medio de espera en cada planta, se busca ver cómo es afectado por este parámetro, mientras que buscamos minimizarlo. El gráfico evidencia que $\beta=2$ minimiza el tiempo de espera manteniéndolo en un rango de entre unos 2 a 3 minutos.



Lo mismo se busca hacer para el tiempo de espera en el centro de distribución. Aunque en este gráfico vemos que el $\beta=0$ es el que minimiza el tiempo de espera en el centro, la segunda mejor opción del valor de β es 2, y teniendo en cuenta que los demás gráficos nos indican que este sería el valor óptimo, seguimos considerando $\beta=2$ como la mejor opción.



Por último, observamos el porcentaje promedio de utilización de los recursos correspondiente a cada valor de β ; evidentemente se busca el valor de β que maximice la utilización promedio. El gráfico, una vez más, nos muestra que el valor de $\beta=2$ sería la opción ideal, con su intervalo de confianza alrededor de 97.4 y el 97.9.

A partir de los resultados obtenidos, se identificó que la configuración que ofreció el mejor desempeño fue la correspondiente a la heurística 3 con un valor de β igual a 2. Esta combinación permitió alcanzar un equilibrio eficiente en la distribución de trailers entre plantas, maximizando la cantidad de entregas y manteniendo niveles aceptables de utilización de recursos. En función de este hallazgo, se definió avanzar con una nueva serie de simulaciones incorporando una mayor cantidad de camiones. El objetivo es analizar si el sistema mantiene su eficiencia bajo condiciones operativas más exigentes, y evaluar su capacidad de escalabilidad sin comprometer la estabilidad del rendimiento.

Métrica	Media (μ)	Desvío Estándar (σ)	Intervalo de confianza (90%)
Cantidad de semiacoplados entregados	85.72	1.29	[85.51, 85.93]
Minutos que esperaron por semiacoplados vacíos	3.32	1.20	[3.13, 3.52]
Minutos que esperaron por semiacoplados llenos	71.04	4.75	[70.26, 71.83]
Utilización de los camiones	85.03	0.98	[84.86, 85.19]

Al comparar los resultados obtenidos entre la primera y la segunda heurística, se observa una mejora significativa en varios indicadores clave del sistema. En términos de cantidad de semiacoplados entregados, la heurística 2 alcanza una media de 85.72 unidades, superando por 8 unidades a la heurística 1, que presenta una media de 77.73. Este incremento refleja una mayor eficiencia general del sistema en términos de capacidad operativa.

Uno de los cambios más notorios se da en el tiempo de espera por semiacoplados. La razón principal por la cual el tiempo medio de espera por semiacoplados vacíos en el centro de distribución se reduce de aproximadamente 9.7 a cerca de 1.4 minutos, radica en un cambio estructural del punto de congestión dentro del sistema. En la heurística 1, con 3 camiones operativos y 9 semiacoplados, los camiones tienden a acumularse en el centro de distribución compitiendo por semiacoplados vacíos, lo que genera colas y tiempos de espera elevados. En cambio, al introducir un cuarto camión en la heurística 2 (manteniendo los 9 semis), el sistema se reconfigura: los camiones rotan más rápidamente, se produce una mayor circulación, y el cuello de botella se desplaza hacia las plantas, donde se acumula la espera por semiacoplados llenos. Así, aunque el número total de recursos no cambia, el aumento de camiones modifica la dinámica del sistema, descomprimiendo el centro de distribución y trasladando la congestión a otro punto.

Por otro lado, el tiempo de espera por semiacoplados llenos presenta un patrón inverso. En la heurística 1 es prácticamente despreciable, con una media de solo 0.93 minutos, mientras que en la heurística 2 aumenta a 71.04 minutos. Este resultado sugiere que, si bien se resolvió la congestión en la entrega de semiacoplados vacíos, ahora el cuello de botella se traslada al momento de retorno de los semis cargados, posiblemente como consecuencia de una mayor presión sobre las plantas. De igual manera, este resultado tiene completo sentido, al tener 3 plantas y 4 camiones, por más que las 3 plantas tengan sus semiacoplados llenos, siempre hay un camión que se quedará esperando hasta que una de las plantas comience y termine el cargado de un nuevo semiacoplado.

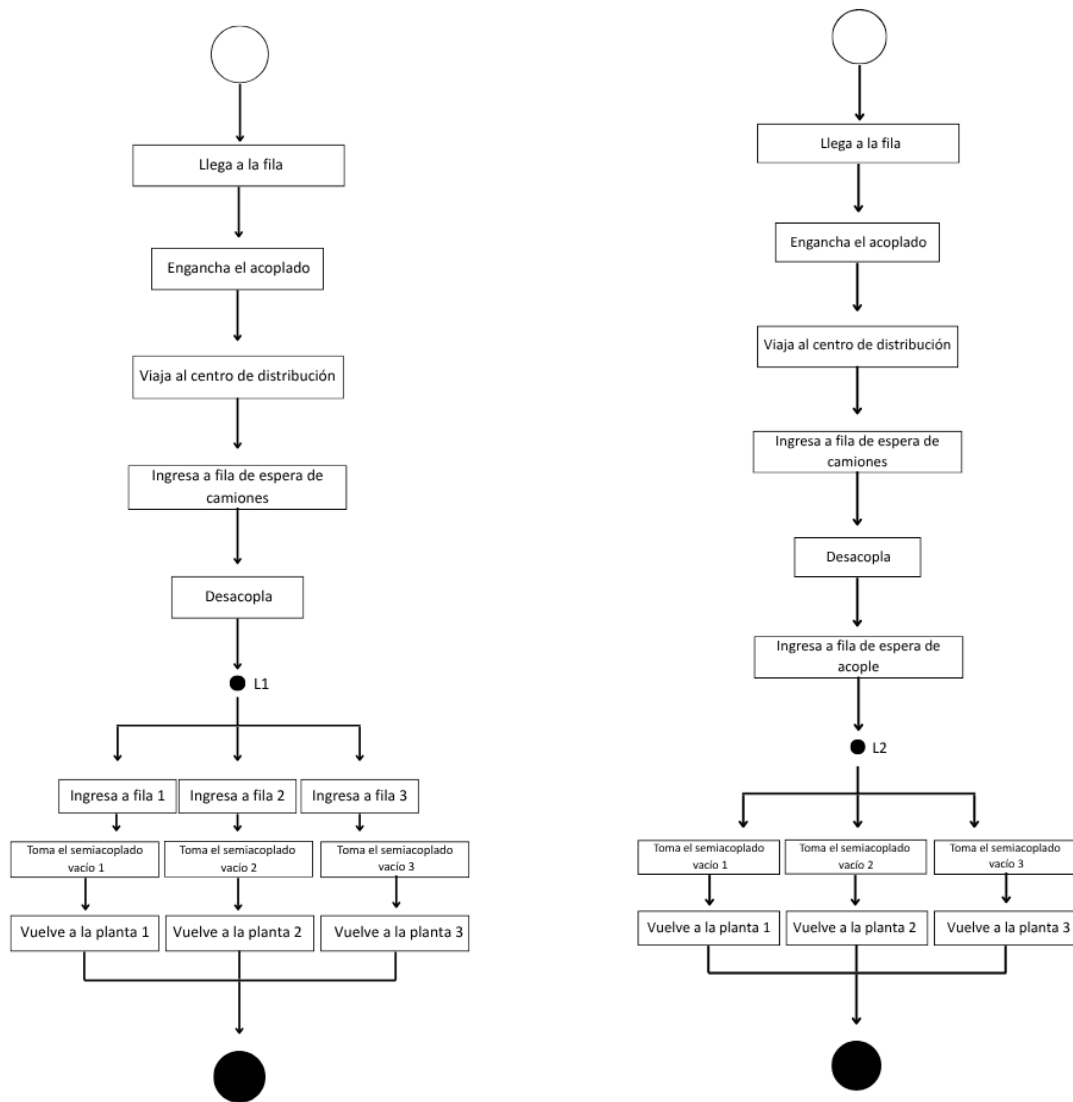
En cuanto a la utilización de los camiones, la heurística 1 muestra un nivel más alto (97.79 %), cercano a la saturación, mientras que en la heurística 2 se observa una reducción moderada (85.03 %). Esta diferencia indica una mejora en términos de robustez del sistema: la segunda heurística ofrece un uso intensivo, pero con margen suficiente para absorber variaciones sin comprometer la operación. En otras palabras, la utilización de camiones en heurística 1 es muy alta, lo que puede parecer eficiente, pero en la práctica también puede implicar poca tolerancia a fallas o variabilidad, mientras que la heurística 2 tiene más margen.

2 Modelo

2.1 Modelo conceptual

2.1.1 Diagrama de proceso

Se definieron dos diagramas de proceso, uno para cada heurística considerada. Los diagramas establecidos se presentan a continuación, siendo el primer diagrama el de la primera heurística y el segundo, al de la alternativa propuesta:



En el primer escenario, el simulador comienza cuando un camión llega a la fila de espera en la planta correspondiente, en donde se engancha un semiacoplado lleno, para así ser trasladado al centro de distribución. Una vez en el centro, se desacopla el semiacoplado del camión y se dispara la primera lógica, la cual designa la fila correspondiente al camión, cada fila independiente entre sí. En la misma, se asigna con un semiacoplado vacío al camión, el cual es exclusivo de cada planta. Una vez acoplado el camión, va de regreso a su planta.

Por otro lado, la segunda heurística sigue la misma lógica de la primera, el camión llega a la planta, engancha un semiacoplado cargado, se dirige al centro de distribución, espera su turno para descargar y desacopla el acoplado. Sin embargo, la diferencia se marca en la lógica aplicada en esta heurística: como los camiones no tienen una planta fija asignada, se define a qué planta deben dirigirse en función de la disponibilidad de semiacoplados vacíos por planta y un score calculado a partir del tiempo estimado de arribo y la cantidad de entregas acumuladas por cada planta (la lógica de esta asignación se detalla en la siguiente

sección). Una vez seleccionada la planta destino, el camión engancha un semiacoplado vacío y se dirige hacia esa planta.

2.1.2 Eventos destacados y lógicas

Para la planificación del modelo, se definieron las siguientes lógicas con el fin de establecer reglas claras que estructuran el comportamiento del simulador:

- **Lógica 1:** una vez que se desacopla el camión, se verifica la planta a la que pertenece: si pertenece a la planta 1. Lo mismo aplica para el camión de la planta 2 y la planta 3, que ingresarán a la fila en donde se espera un acoplado de su misma planta.
- **Lógica 2:** una vez que se desacopla el camión en el centro de distribución (CD), se activa la lógica, que evalúa a qué planta debe dirigirse el camión. La decisión se toma según una función de selección basada en una combinación del tiempo estimado de arribo (ETA) y la cantidad de entregas realizadas por planta, ponderada por un parámetro de equidad beta β :

$$Score_p = ETA_p + \beta \cdot Entregas_p$$

donde:

- ETA_p : tiempo estimado de arribo a la planta p ,
- $Entregas_p$: cantidad acumulada de entregas realizadas a la planta p ,
- β : parámetro de equidad que pondera la distribución de visitas entre plantas.

Se calcula este score para cada planta que tiene un semiacoplado vacío y, la planta que tenga el menor score será la que se le asigne al camión.

A tener en cuenta, al definir estas lógicas es posible que se generen filas en donde el camión deba esperar un determinado tiempo hasta tener un semiacoplado designado. En caso de que haya un solo semiacoplado disponible, sea de la planta que sea, este será asignado al camión que se encuentre esperando, caso contrario, se aplicará la lógica en la que se tenga en cuenta la planta con el mínimo score.

La fila de espera se desocupa cuando hay al menos un semiacoplado vacío disponible para ser asignado. En caso contrario, los camiones deberán permanecer en la fila hasta que se libere alguno.

Eventos destacados:

Se identificaron eventos especiales que marcan el inicio de las decisiones logísticas clave. Estos eventos actúan como disparadores de las lógicas de asignación y selección de plantas, y su ocurrencia está directamente relacionada con el flujo operativo del sistema. Los eventos identificados son:

- Evento Especial 1: Desenganche en planta asignada (Lógica 1)
- Evento Especial 2: Desenganche y activación de lógica de selección (Lógica 2)

El evento especial 1 ocurre cuando un camión finaliza una entrega y se desengancha. Este evento inicializa la lógica 1, que consiste en verificar a qué planta pertenece el camión. Es característico de la primera heurística, en el cual cada camión está fijado a una única planta. La asignación es estática, y no depende del estado del sistema ni de la disponibilidad de acoplados.

Por otro lado, en la segunda heurística, se introduce un modelo más dinámico en el que los camiones no tienen una asignación fija, sino que seleccionan su próximo destino en función del estado del sistema. Una vez que un camión se desengancha en el centro de distribución (CD), se activa la lógica 2, que evalúa a qué planta debe dirigirse el camión. Como se explicó anteriormente, la designación se basa en un score que penaliza las plantas que hicieron mayor cantidad de entregas y se elige la planta que tenga el menor puntaje.

2.2 Modelo de datos

2.2.1 Variables aleatorias, Parámetros y relación entre ellos

En el modelo de simulación desarrollado, también se identificaron y modelaron diversas variables aleatorias. Estas variables capturan la variabilidad natural del sistema y son fundamentales para reflejar su comportamiento realista a lo largo del tiempo. En este trabajo, se consideran las siguientes:

- Tiempo de viaje de centro a planta.
- Tiempo de llenado.
- Tiempo de vaciado.
- Tiempo de acople (enganche) y desacople (desenganche).

Estas variables fueron modeladas siguiendo una distribución uniforme (tiempo de acople, desacople y tiempo de llenado y vaciado del semiacoplado) y una distribución normal (tiempo de viaje). Las relaciones que se pueden identificar entre las variables son las siguientes:

- Mayor tiempo de llenado semiacoplado, mayor tiempo de espera camión en planta.
- Mayor tiempo de vaciado semiacoplado, mayor tiempo de espera en el centro de distribución.
- Mayor cantidad de camiones, mayor cantidad de pedidos completados.

2.3 Modelo operacional (simulador)

2.3.1 Simulador

El simulador se construyó en Python 3.11 sobre la librería salabim, que provee un framework de simulación de eventos discretos (SED) con soporte nativo para animación, trazas y recursos. A continuación se describe cómo el código implementa el modelo conceptual y de qué manera se instrumentan las métricas que luego se analizan en los experimentos.

Elemento	Implementación	Rol en el sistema
Entorno	<code>env = sim.Environment(time_unit="min utes", ...)</code>	Reloj maestro y scheduler de eventos. Maneja la animación y los parámetros de traza.
Parámetros estocásticos	Distribuciones <code>sim.Uniform</code> ,	Tiempos de carga, descarga,

	sim.Bounded(sim.Normal...)	enganche/desenganche y velocidades de viaje.
Recursos y colas	sim.Resource, sim.Store	Dock de descarga en CD (recurso con capacidad 1) y almacenes de tráileres (cargados / vacíos) en planta y en CD.
Componentes activos	Subclases de sim.Component (Loader, Unloader, Truck)	Ejecutan procesos autónomos que generan la dinámica del sistema.
Entidades pasivas	Objetos tráiler (función trailer(...))	Fluyen entre stores y se conectan/desconectan de los camiones.
Métricas	Atributos acumulados en cada Truck y listas globales delivered, etc.	Capturan tiempos de espera, utilización y conteos de eventos sin vacío / sin lleno.

El ciclo operativo del camión se compone de los siguientes pasos:

- Arranque:** Cada camión sale de su planta con un tráiler lleno (P_i_loaded) y viaja al CD.
- Descarga en CD
 - Solicita el recurso dock_cd (cap. 1).
 - Desengancha el tráiler cargado y lo deposita en loaded_cd.
 - El Unloader toma ese tráiler, simula el vaciado y lo mueve a empty_cd[i].
- Regreso con vacío:** El camión toma un tráiler vacío de empty_cd[i] (si no hay, acumula wait_cd y contabiliza sin vacío).
- Carga en planta**
 - Entrega el vacío en empty_pl[i]; el Loader lo carga y lo pasa a loaded[i].
 - El camión espera un tráiler lleno en loaded[i] (si no hay, acumula wait_pl y contabiliza sin lleno).
- Nuevo viaje a CD** → vuelve al paso 2: Se incrementa trips; el bucle continúa hasta que el horizonte temporal se cumple.

Las distribuciones y parámetros utilizados, descritos anteriormente en la sección de variables aleatorias, fueron implementadas de la siguiente manera:

Proceso	Distribución
Carga (load_t)	Uniforme (8,16)
Descarga (unload_t)	Uniforme (4,8)
Enganche/Desenganche (hook_t)	Uniforme (0.5,1)

Velocidad de viaje	Normal ($\mu = 40$ m/min, $\sigma = 3$) acotada a $[15, \infty)$
--------------------	--

Las tres plantas no están equidistantes del centro de distribución: en el simulador se las ubicó en coordenadas distintas dentro del plano (≈ 350 m, 650 m y 900 m sobre el eje horizontal), mientras que el CD se fijó en el centro superior de la escena. De este modo, la distancia recta $CD \leftrightarrow$ Planta varía entre ellas y, por ende, también el tiempo de viaje: la planta más cercana demanda alrededor de 2 min, la intermedia cerca de 3 min y la más alejada unos 4 min, según la velocidad sorteada en cada recorrido. Esta asimetría reproduce la disposición real de DISTRIMAX y permite que el modelo capte cómo la ubicación geográfica influye en la asignación de camiones, la formación de colas y la utilización de recursos.

2.3.2 Verificación y Validación

2.3.2.1 Verificación

“El propósito de la verificación del modelo es asegurar que el modelo conceptual esté representado con precisión en el modelo operacional. [...] La verificación plantea la siguiente pregunta: ¿Está el modelo conceptual representado con precisión por el modelo operacional?”- *Jerry Banks, Discrete-Event System Simulation*. La verificación se centra en comprobar que el modelo ha sido implementado correctamente, es decir, que el código y los procedimientos computacionales reflejan fielmente las ideas, suposiciones y lógica del modelo conceptual. No se trata de contrastar con la realidad, sino de garantizar que “lo que se quiso modelar” se ha trasladado correctamente al “modelo que corre”.

Para poder llevar a cabo el proceso de verificación, se recurrió a dos herramientas fundamentales: El seguimiento de 3 entidades a lo largo del proceso (junto con todos los recursos que están involucrados en él) y tests unitarios para comprobar que los invariantes se cumplan durante toda la ejecución. A partir de ambos, se puede evaluar qué tan preciso es el simulador con respecto al modelo conceptual sobre el cual fue construido. A continuación se propone una forma compacta y comentada de presentar el log dentro del informe. La idea es mostrar sólo las primeras interacciones de cada camión (≈ 0 - 10 min) porque en ellas ya se verifica el ciclo completo «vacío \rightarrow cargado \rightarrow viaje \rightarrow vacío» y la conservación de cada entidad.

[0.0] T1 SALE P1 \rightarrow CD con P1_loaded \leftarrow Estado inicial: cada camión parte con un trailer cargado.

[0.0] T2 SALE P2 \rightarrow CD con P2_loaded

[0.0] T3 SALE P3 \rightarrow CD con P3_loaded

[0.0] Loader P1 \leftarrow P1_emptyPL \leftarrow El loader toma el semi vacío que estaba en planta.

[0.0] Loader P2 \leftarrow P2_emptyPL

[0.0] Loader P3 \leftarrow P3_emptyPL

[2.5] Loader P1 \rightarrow cargado P1_loaded \leftarrow Trailer P1_emptyPL pasa a estado cargado.

[3.8] T1 TRIP #1 \leftarrow Fin del primer viaje del camión 1.

[3.8] Unloader \checkmark P1_loaded \leftarrow Descarga del trailer cargado en el CD.

[3.8] T1 SALE CD \rightarrow P1 con P1_emptyCD \leftarrow Vuelve a planta con un vacío.

El fragmento elegido resulta suficiente porque en él ya se recorre íntegramente el proceso diseñado para el sistema. Se observa cómo cada camión parte con su semirremolque cargado, cómo el loader de la planta toma de inmediato el vacío disponible, lo llena y lo despacha, y cómo el unloader del CD descarga el

cargado y libera el vacío correspondiente, que a su vez regresa a planta para reiniciar el ciclo. Todos los eventos aparecen en el orden esperado, con la nomenclatura de identificadores (por ejemplo, P1_loaded / P1_emptyCD) conservada sin saltos ni duplicaciones, y los intervalos de tiempo coinciden con los rangos de viaje especificados en el modelo conceptual (entre dos y cuatro minutos según la planta).

Pytest es un framework de pruebas de software flexible y fácil de usar. Permite a los desarrolladores escribir conjuntos de pruebas sencillos y compactos admitiendo y ofreciendo un conjunto completo de funciones para optimizar el proceso de pruebas pruebas unitarias, pruebas funcionales y pruebas de API.

Las pruebas cubren distintos aspectos estructurales y funcionales del sistema, buscando asegurar que la lógica implementada cumpla con las restricciones y supuestos definidos en el diseño del modelo. A continuación se detallan las pruebas realizadas y el objetivo de cada una, dejando indicado el resultado obtenido para cada caso.

1. Conservación de semiacoplados en el sistema
 - a. **Objetivo:** Verificar que no haya "pérdidas" de semiacoplados. La suma de los semiacoplados en cola (en plantas y centro de distribución) debe mantenerse dentro del rango esperado, teniendo en cuenta que un máximo de 6 pueden estar en uso simultáneo (3 enganchados, más los que están en carga/descarga).
 - b. **Parámetros:** Simulación de 4 horas, con semillas [1, 42, 123].
2. Cantidad positiva de viajes por camión
 - a. **Objetivo:** Asegurar que todos los camiones realizaron al menos un viaje durante la simulación, validando que la lógica de asignación y despacho esté activa para todos.
 - b. **Parámetros:** Simulación de 4 horas, con semillas [5, 99].

Estas pruebas permiten garantizar que el modelo se comporta de manera coherente bajo diferentes condiciones de entrada, y son fundamentales para detectar errores sutiles de lógica o implementación. Todas las pruebas fueron superadas exitosamente, lo que refuerza la confiabilidad del modelo desarrollado.

2.3.2.2 Validación

“La validación es el proceso general de comparar el modelo y su comportamiento con el sistema real y su comportamiento.”- *Discrete-Event System Simulation*, Banks, Carson II, Nelson, Nicol (Quinta edición). La validación consiste en evaluar si el modelo desarrollado representa adecuadamente el sistema real que se busca simular. Es decir, se trata de comparar el comportamiento del modelo con el comportamiento observado del sistema real, asegurando que las salidas del modelo sean coherentes con la realidad dentro de un nivel aceptable de precisión.

En este sentido, la validación corresponde a responder la pregunta: ¿el modelo refleja adecuadamente la realidad logística de DISTRIMAX? Existen distintos métodos para validar los simuladores, sin embargo, dado que no se cuentan con datos reales de la operación, se recurrió al Face Validity, el cual valida el simulador observando su estructura, comportamiento y resultados. No implica pruebas cuantitativas ni estadísticas, sino una evaluación cualitativa basada en la intuición y la experiencia.

En este sentido, se recurrió primero a una validación visual sobre cómo se comportan los camiones en ambas modalidades. Los camiones siguen el recorrido Planta ↔ Centro, por lo que son adecuados a la lógica que se planteó en un comienzo.

Además, se validó que la velocidad fuese coherente. Para ello, se probó el modelo con dos distribuciones de velocidad diferentes, en donde tiene una media 50% menor que la otra.

Ejecución con velocidad $\mu=35$

T1: viajes 29 | cargados 28

T2: viajes 24 | cargados 23

T3: viajes 21 | cargados 21

Ejecución con velocidad $\mu=17.5$

T1: viajes 17 | cargados 16

T2: viajes 11 | cargados 11

T3: viajes 11 | cargados 10

Es razonable que la cantidad de viajes no baje exactamente a la mitad, dado que no están solamente yendo de un lugar a otro: hay otros procesos involucrados que afectan la cantidad de viajes, como por ejemplo, el tiempo de carga y vaciado de los semi acoplados.

3 Bibliografía, referencias y Anexos

3.1 Bibliografía

Zaki, R. (2022, 15 de diciembre). *Tutorial de Pytest: una guía práctica para pruebas unitarias*. DataCamp. <https://www.datacamp.com/es/tutorial/pytest-tutorial-a-hands-on-guide-to-unit-testing>

3.2 Referencias

Libro de Banks et al.

Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2013). *Discrete-event system simulation* (5th ed.). Pearson Education.

Documento de Averill M. Law

Law, A. M. (n.d.). *How to validate your models and simulations* [Manuscript].

3.3 Descripción teórica de temas desarrollados que exceden los temas tratados en el curso

La métrica β fue ideada en el contexto de la simulación logística de la empresa DISTRIMAX. La necesidad de definir qué camión debía ir a cada planta para optimizar la asignación de recursos fue el punto de partida para el desarrollo de esta métrica. Inicialmente, se requería una forma de gestionar dinámicamente los camiones, ya que, en el modelo tradicional, cada planta tenía un camión asignado de forma exclusiva, lo que generaba ineficiencias y tiempos de espera innecesarios.

En este contexto, se exploró la posibilidad de que los camiones pudieran moverse entre las plantas, lo cual introdujo la necesidad de establecer un criterio para decidir a cuál planta enviar cada camión. Así, se

propuso una regla basada en un parámetro de ponderación, denominado β , que equilibrara dos objetivos clave: la minimización del tiempo de entrega y la distribución equitativa de los recursos entre las plantas.

La métrica β se definió como un factor de ponderación que ajusta la influencia de la cantidad de semiacoplados entregados por cada planta. Al introducir este parámetro, se logró controlar el equilibrio entre las plantas, asegurando una distribución más equitativa de los recursos, especialmente para aquellas plantas que inicialmente acumulaban mayor carga operativa. De esta manera, β permitió que la simulación adaptara la asignación de camiones de forma flexible y eficiente, optimizando la logística general del sistema.

3.4 “Dificultades y Aprendizajes” (Gestión del conocimiento)

En términos de dificultades y aprendizajes, el mayor reto fue dominar la métrica β y comprender cómo su ajuste afectaba la lógica de asignación dinámica. Ajustar β sin una guía empírica previa nos obligó a iterar numerosas veces, comparar escenarios y constatar que pequeñas variaciones podían mover drásticamente los cuellos de botella entre el CD y las plantas. Otro obstáculo importante fue familiarizarnos con Salabim: la curva de aprendizaje incluyó entender su esquema de componentes, stores y recursos, así como depurar animaciones y trazas sin comprometer el rendimiento de la simulación.

Finalmente, descubrimos que la verificación debía ir mucho más allá de los invariantes básicos (conservación de tráileres y viajes positivos). Aprendimos a contrastar los tiempos generados por las distribuciones (Uniforme, Normal acotada) con los resultados observados, verificando que la media y la varianza simuladas se mantuvieran dentro de intervalos esperados en diferentes horizontes. También incorporamos chequeos de tiempos intermedios (viaje, carga, descarga) para asegurarnos de que el flujo temporal completo respetara la lógica conceptual. Este proceso, aunque demandante, fortaleció nuestra confianza en el modelo y nos dotó de herramientas valiosas para validar simuladores con mayor rigor en futuros proyectos.