

# Mejora en el uso de almacenamientos intermedios para la gestión de mercancía

**Raúl Pérez Muñiz**

*Este documento constituye un resumen extendido del Trabajo Fin de Máster titulado “Mejora en el uso de almacenamientos intermedios para la gestión de mercancía”, realizado por Raúl Pérez Muñiz bajo la dirección de Ángel Manuel González Rueda (profesor ayudante doctor de la Universidad de Santiago de Compostela) y Julio López Albín (responsable de investigación operativa y robótica de Industria de Diseño Textil, S.A., en adelante, Inditex). Esta versión ha sido adaptada específicamente para su difusión en el repositorio de acceso público del Máster en Técnicas Estadísticas, omitiendo información de carácter confidencial en cumplimiento de los compromisos de confidencialidad suscritos con Inditex.*

## Introducción y definición del problema

La logística representa un pilar estratégico del modelo de negocio de Inditex. En este contexto, los centros de distribución desempeñan un papel fundamental al canalizar el flujo de mercancía desde los proveedores hasta el cliente final, operando en ciclos temporales estrictos que permiten reabastecer simultáneamente todos los puntos de venta a escala global.

El interior de estas instalaciones opera como una compleja red de cintas transportadoras. La mercancía se almacena temporalmente en sistemas automatizados de almacenamiento que actúan como orígenes de la red, desde donde se incorpora a la infraestructura de cintas que la conduce hacia zonas de acumulación intermedia (*buffers*) y, finalmente, a los clasificadores (*sorters*) o al punto de expedición directa (*cross-dock*). El elemento crítico de esta infraestructura son los cruces: puntos de convergencia donde el solapamiento de flujos puede generar colas que se propagan en cascada y derivan en un colapso parcial o total del sistema.

Las decisiones sobre cuánta mercancía enviar desde cada origen a cada destino, y en qué momento inyectarla, se realizan actualmente de forma manual apoyándose en reglas heurísticas. Aunque este procedimiento permite en general satisfacer la demanda, carece de garantías de optimalidad y resulta rígido ante incidencias operativas. El presente trabajo aborda la formulación de este problema de planificación como un problema de programación matemática que determine, para cada ventana temporal del ciclo operativo, la cantidad de mercancía a inyectar desde cada origen hacia cada destino, respetando las restricciones físicas de la red y garantizando el cumplimiento de los plazos de entrega.

## Objetivos

El **objetivo general** del trabajo es desarrollar un modelo de optimización matemática que genere de forma automática planificaciones operativamente factibles, satisfaciendo la demanda dentro de cada ciclo operativo

mientras se mantiene la fluidez de la red. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- (1) Evitar la formación de atascos graves y congestiones persistentes en los cruces de la red.
- (2) Mantener la ocupación de los *buffers* dentro de un rango operativo predefinido, asegurando un suministro continuo a los clasificadores.
- (3) Penalizar la inyección prematura de mercancía, preservando la capacidad de la red hasta los instantes en que el flujo es operativamente necesario.
- (4) Garantizar la eficiencia computacional e implementar un simulador que permita validar los planes generados y asistir a los responsables de la instalación.

## Metodología

La metodología propuesta abstrae el problema mediante *redes expandidas en el tiempo* (*time-expanded networks*, TEN), que incorporan la dimensión temporal al problema clásico de flujos en red. La infraestructura física del centro se formaliza como un grafo dirigido sobre el que se proyecta un horizonte temporal discreto, de manera que cada instante del ciclo operativo representa el estado de la red en ese momento.

La aplicación directa de este marco al entorno de los centros de distribución de Inditex presenta particularidades que invalidan la formulación clásica: las cintas transportadoras poseen capacidad de almacenamiento físico en las propias aristas y existe una divergencia entre la escala de planificación operativa y los tiempos de tránsito de la red, que pueden ser inferiores a la duración del paso temporal. La solución adoptada modela la mercancía como un fluido continuo que se distribuye de forma proporcional a lo largo de las aristas, propagándose de manera determinista mediante fracciones de avance calculadas a partir de los tiempos de tránsito y la duración del paso.

Sobre esta base, se construye un simulador de flujo continuo que replica la dinámica operativa de la red. El simulador aplica lógicas diferenciadas por tipo de elemento, con especial atención a la redistribución de cuotas en los cruces. Esta herramienta no solo sirve como instrumento de validación, sino también como apoyo directo para los responsables de la instalación, al permitirles evaluar de forma inmediata cualquier plan de inyección y anticipar posibles incidencias operativas.

A partir del comportamiento capturado por el simulador, se formula el modelo de programación lineal de manera que exista una correspondencia entre cada restricción del modelo y su lógica equivalente en el simulador. Las variables de decisión recogen la inyección desde los orígenes, la descarga desde los *buffers* y la ocupación en cada elemento de la red. La función objetivo minimiza una combinación ponderada de penalizaciones por incumplimiento de plazos, desviación de los *buffers* fuera de su rango óptimo, congestión en las aristas, redistribución de cuotas en los cruces e inyección prematura. Las restricciones imponen la conservación del flujo, los límites de capacidad, los retardos de tránsito y el cumplimiento de la demanda total por destino. El modelo se implementa en Python, empleando Google OR-Tools para la construcción formal del

problema y Gurobi como *solver*.

## Resultados y validación

La validación se lleva a cabo sobre la topología de un centro de distribución real de Inditex. Se evalúan dos escenarios que comparten la misma topología y demanda, diferenciándose en los tiempos de tránsito de las aristas.

En el primer escenario, los tiempos de tránsito son compatibles con el paso temporal de planificación. El modelo presenta un orden de decenas de miles de variables y restricciones y obtiene la solución óptima global de forma eficiente. Los resultados son altamente satisfactorios: la solución no incurre en penalizaciones por incumplimiento de plazos ni por congestión, y la sincronización entre el optimizador y el simulador es completa en las métricas de flujo clave.

El segundo escenario considera tiempos de tránsito de orden muy inferior al paso temporal estándar. En esta configuración, la divergencia de escalas provoca que el optimizador agregue incorrectamente la capacidad de los cruces, generando un colapso que el simulador detecta y cuantifica. La solución consiste en reducir el paso temporal, lo que eleva la dimensionalidad del modelo a cientos de miles de variables y restricciones. Las decisiones resultantes se agregan en bloques de mayor duración para su aplicación operativa. Con este ajuste, la congestión desaparece prácticamente en su totalidad y se alcanza el cumplimiento de la demanda dentro del ciclo.

## Conclusiones y trabajo futuro

El trabajo demuestra la viabilidad de automatizar la planificación de los ciclos operativos en centros de distribución mediante un modelo de programación lineal formulado sobre redes expandidas en el tiempo con flujo continuo. El modelo genera planes de inyección óptimos que satisfacen la demanda completa dentro de los plazos establecidos, evitan la formación de atascos graves y mantienen los *buffers* en su rango de operación idóneo. La eficiencia computacional obtenida confirma la utilidad práctica de la herramienta, y el simulador de flujo continuo desarrollado constituye, por sí mismo, un producto de alto valor para los responsables de los centros.

Como principales líneas de trabajo futuro se identifican dos. En primer lugar, la **incorporación de estocasticidad en la inyección**: dado que el volumen exacto inyectado en cada instante puede desviarse del planificado, resulta necesario explorar formulaciones de optimización robusta que garanticen la viabilidad del plan ante estas desviaciones. En segundo lugar, la **transición al modelado a nivel de prenda**, que requeriría conectar directamente las decisiones del optimizador con las necesidades de expedición expresadas en unidades de producto, cerrando el ciclo de planificación logística de manera integral.