

9. Estrategia para la planeación de inventarios para nuevos productos en una red de centros de distribución y soporte mediante Industria 4.0

SANTIAGO OMAR CABALLERO MORALES*

DIANA SÁNCHEZ PARTIDA**

JOSÉ LUIS MARTÍNEZ FLORES***

MARÍA DEL ROSARIO SÁNCHEZ VEGA****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.235.09>

Resumen

El intenso cambio de las tendencias del mercado nacional e internacional representa un reto para la distribución eficiente de productos. Esto dada la necesidad de satisfacer en el menor tiempo posible y con las mejores condiciones los requerimientos de este. Si bien las estrategias de abastecimiento y planeación de centros y redes de distribución contribuyen a afrontar dicho reto, la complejidad actual dada por la globalización requiere de estrategias más avanzadas. En este contexto, la digitalización de la cadena de suministro mediante tecnologías de Industria 4.0 representan una oportunidad para productos y servicios de nueva creación que involucran riesgos específicos. En el presente capítulo se presenta una estrategia de integración de servicios tecnológicos para un esquema de centros de distribución colaborativos con el objetivo de reducir los riesgos de abastecimiento para nuevos productos. La validación, realizada mediante un análisis de caso, corro-

* Doctor en Ciencias Computacionales. Profesor-investigador, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9986-7768>

** Doctora en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro. Profesora-investigadora, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5771-1362>

*** Doctor en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro. Profesor-investigador, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2986-469X>

**** Maestra en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2103-0543>

boran la pertinencia de la estrategia y su posible aplicación en diversos ámbitos industriales y de servicios.

Palabras clave: *Inventarios, distribución, Industria 4.0.*

Introducción

Actualmente hay tres factores que representan un reto para la competitividad de las empresas: la globalización, el rápido desarrollo tecnológico, y el cambio continuo en las demandas de los mercados. Por ello, el disponer de los medios para presentar nuevos e innovadores productos y servicios es una de las principales prioridades para mantener y mejorar la competitividad de las empresas en los mercados regionales y globales (Liao y Marsillac, 2015).

No obstante, esto debe estar en concordancia con conocer las exigencias de los mercados y las nuevas plataformas de distribución para que la entrega y prestación de servicios sea rápida y eficiente. De igual manera, nuevos productos (NPs) y servicios requieren nuevas estructuras de conocimiento táctico para generar ideas y conceptos útiles para lograr su éxito (Park *et al.*, 2015).

En particular, este éxito depende de la colaboración interorganizacional de la cadena de suministro (CS) (Hashiba y Paiva, 2016; Chaudhuri y Boer, 2016). La administración eficiente de la CS es importante para reducir los costos y riesgos de producción, reducir tiempos de lanzamiento, analizar la sostenibilidad del diseño del NP, seleccionar los materiales más adecuados, y maximizar las tasas de servicio al cliente (Khan *et al.*, 2016; Parlings y Klingebiel, 2017).

De igual manera, NPs y la CS se sustentan en: (a) la infraestructura tecnológica que facilite el flujo de información a través de los diferentes procesos, y (b) la distribución física de los bienes requeridos. La investigación en gestión de innovaciones ha enfatizado la importancia de la flexibilidad de la CS para el desarrollo de NPs y servicios (Liao y Marsillac, 2015). En cuanto a distribución, su ejecución ineficiente puede generar diversos impactos negativos como retrasos en las fechas de lanzamiento, pérdida de

oportunidad de posicionamiento, costos de redistribución y administración adicional de inventarios. Nótese que la distribución incluye la ubicación de las plantas, los almacenes, los centros de distribución (Cedis) y las conexiones entre ellos, lo que determina el 80% del costo de la cs (Watson *et al.*, 2012). Recientemente, conceptos y tecnologías de la 4ª Revolución Industrial, o Industria 4.0, dan soporte a la planeación integrada de la cs para mantener la competitividad de las empresas, incluyendo la infraestructura tecnológica requerida y su integración con el proceso de distribución (Cardoso *et al.*, 2021).

El proceso de gestión y distribución de NPS no se puede abordar de la misma manera que se realiza con productos ya establecidos. Esto se debe a que los NPS tienen un alto grado de incertidumbre en sus demandas, costos y tendencias, lo que conduce a un mayor riesgo de falla. Se estima que aproximadamente el 40% de los NPS fallan en el lanzamiento (incluso después de todo el trabajo de desarrollo y prueba), solo el 10%-15% de los conceptos de NPS son un éxito comercial, y sólo el 13% de las empresas informan que sus NPS logran sus objetivos de ganancias anuales (Cooper, 2017).

Por lo tanto, la cs debe adaptarse a las características y riesgos específicos de los NPS. El presente capítulo contribuye con este objetivo mediante el desarrollo de una estrategia de gestión de cs adecuada para NPS integrada con Cedis. La estrategia se formula a través de los siguientes pasos:

- en primer lugar, se revisa un modelo de control de inventarios para NPS;
- en segundo lugar, se extiende dicho modelo para integrar los riesgos y costos asociados a la distribución entre Cedis centrales y Cedis regionales de NPS;
- en tercer lugar, se considera el concepto de agrupación de inventarios para consolidar los inventarios en los Cedis centrales en una única ubicación para reducir los riesgos de desabastecimiento en toda la cs;
- en cuarto lugar, los aspectos de la Industria 4.0 se consideran vitales para el éxito de esta estrategia, ya que la digitalización a través de la cs puede permitir una comunicación rápida y un flujo eficiente de decisiones de gestión.

Al probar la estrategia propuesta con datos de un estudio de caso, se determinó que la estrategia puede determinar los niveles de inventario adecuados considerando los riesgos de los NPS y las variaciones de su demanda en toda la red de Cedis. Estos hallazgos se describen en las siguientes secciones: en la Sección X.2 se presentan los aspectos de los Cedis y distribución que influyen en los niveles de inventario asociados a NPS; luego, en la Sección X.3 se presentan los riesgos asociados a los NPS; en la Sección X.4 se presenta la metodología para incorporar el modelo de control de inventarios de NPS dentro de la gestión de los Cedis y el soporte de infraestructura mediante tecnologías de Industria 4.0; la aplicación de la metodología en un estudio de caso se presenta en la Sección X.5; finalmente, las conclusiones se presentan en la Sección X.6.

Gestión de Cedis: aspectos para NPS

La cs está relacionada con todas las actividades asociadas al flujo y transformación de bienes y servicios, desde el suministro de materia prima hasta la entrega del producto terminado al cliente final. La administración de la cs integra actividades y flujos de información, mejorando la interacción entre ellos para lograr ventajas competitivas. Por tanto, para aumentar la eficiencia y productividad de la cs un diseño y gestión de red adecuados es la clave para lograr la satisfacción del cliente (Taki *et al.*, 2016).

Dentro de la red de cs, el Cedis centraliza las operaciones logísticas para el flujo eficiente de productos desde un punto de origen hasta el cliente final (Shu *et al.*, 2013). Debido a que el desempeño de un Cedis eficiente es necesario y crítico para el éxito comercial a largo plazo, su planificación y ubicación se han considerado estrategias importantes para aumentar el nivel de servicio (Yang *et al.*, 2010).

El desafío de gestionar las redes de distribución es mejorar el nivel de servicio y reducir el costo de gestión de los Cedis, encontrando un equilibrio entre los costos de transporte, la gestión de inventarios y los gastos operativos. Para esto es necesario tener controles sobre los niveles de inventario en cada Cedis y sobre su frecuencia de envíos (Kumar y Tiwari, 2013).

Dentro de las estrategias de control, la agrupación de inventarios, o *inventory-pooling*, consiste en la consolidación del inventario a través de los Cedis en una única ubicación (real o virtual) desde la cual se abastecen las demandas de los Cedis (Berman y Mahdi-Tajbakhsh, 2011). Esto puede generar beneficios cuando la variabilidad de la demanda de cada Cedis es alta (Benjaafar, Cooper y Kim, 2005).

Para el caso específico de NPs, los aspectos de planificación de redes, inventarios y Cedis pueden diferir de los productos ya establecidos debido a la incertidumbre de los volúmenes, sus tendencias de demanda y los riesgos asociados:

- Por lo general, para productos ya establecidos su demanda es conocida o con bajo nivel de incertidumbre. Por ello, las empresas tienen más flexibilidad para satisfacer su demanda mediante técnicas de control de inventarios y reducir los riesgos de desabasto en concordancia con sus costos operativos, de almacenamiento y de reposición de inventario (Shu *et al.*, 2013; Schmitt *et al.*, 2015). Para los NPs su total disponibilidad en el lugar correcto es crítica para lograr el impacto inicial requerido en el mercado.
- Los niveles de inventario de seguridad se determinan considerando la incertidumbre en la demanda y los tiempos de entrega a los Cedis (Taki *et al.*, 2016). Si bien hay técnicas para estimar sus niveles óptimos incluso cuando hay información incompleta asociada a la demanda (Edirisinghe y Atkins, 2017), la mayoría no consideran la incertidumbre y riesgos específicos de NPs.
- La agrupación de inventarios centralizados y descentralizados se ha determinado como vital para la gestión de la incertidumbre, reducir las interrupciones en el suministro, y mejorar la gestión de la red de distribución (Mak y Shen, 2012). Sin embargo, existen pocos que aborden la gestión de las innovaciones y las características de los NPs.

Como enfoque para compensar las limitantes identificadas, el presente trabajo propone un modelo que determina las cantidades óptimas de inventario (QNP) a ser enviadas a cada Cedis dentro de una red de distribución establecida, así como su frecuencia de envío y la estimación de sus niveles

de inventario de seguridad (SSNP). Estos parámetros pueden alimentar un sistema de planificación de requisitos de distribución (DRP) en un ambiente de Industria 4.0.

Riesgos en el abastecimiento de inventarios para NPS

Los riesgos dentro de la cs se pueden clasificar en internos y externos (Taki *et al.*, 2016). El estudio descrito por Sanchez-Vega *et al.* (2019) extiende sobre esta clasificación al diferenciar aquellos asociados con nivel de servicio, inventario y distribución. La tabla 9.1 presenta una descripción de estos y su cuantificación en función de su contribución al costo del NP. Note que estos riesgos están directamente relacionados con procesos internos y externos asociados a la cs.

Tabla 9.1. Contribución de riesgos al costo de inventario de NPS

<i>Riesgo</i>	<i>Contribución en el costo</i>
Impacto en el nivel de servicio (C_{INS})	36%
Desabastecimiento de producto (C_{DAP})	31%
Variación en el costo del producto (C_{CP})	27%
Impacto negativo en la producción (C_{INP})	26%
Sobreabastecimiento de inventario (C_{SAI})	25%
Obsolescencia de materiales (C_{OM})	21%
Retraso en lanzamiento (C_{RL})	20%
Descontinuación temprana (C_{DT})	19%
Distribución ineficiente del producto (C_{DIP})	17%
Fletes adicionales (C_{FA})	14%

Fuente: elaboración propia de la adaptación del modelo presentado en Sánchez-Vega *et al.* (2019).

De la tabla 9.1, los riesgos asociados al aspecto de distribución son los siguientes: Impacto en el Nivel de Servicio (C_{INS}), Desabastecimiento de Producto (C_{DAP}), Lanzamiento Tardío (C_{RL}), Descontinuación Temprana (C_{DT}), Distribución Ineficiente del Producto (C_{DIP}) y Fletes Adicionales (C_{FA}). Adicionalmente el estudio de Sanchez-Vega *et al.* (2019) identifica etapas del ciclo de vida de los NPS asociadas a estos

riesgos. La tabla 9.2 presenta estas etapas indicando el tipo de comportamiento en la demanda.

Tabla 9.2. *Impacto de los riesgos sobre los costos de inventario de NPS vs. Ciclo de vida y Demanda*

<i>Tipo de Demanda / Ciclo de vida</i>	<i>0-3 meses</i>	<i>3-6 meses</i>	<i>6-9 meses</i>	<i>9-12 meses</i>
Demanda con estacionalidad	100%	75%	Depende de la estación	Depende de la estación
Una sola demanda	100 % de los Riesgos			
Demandas continua y constante	100%	75%	Depende de la estación	Depende de la estación
Demanda con tendencia	100%	75%	50%	25%

Fuente: elaboración propia de la adaptación del modelo presentado en Sánchez-Vega *et al.* (2019).

Control de inventario para NPS en una red de Cedis

El modelo propuesto, denominado Control Estratégico de Inventario de Nuevos Productos en Centros de Distribución (Inpcedis), consiste en la adaptación de varias herramientas logísticas de control de inventario con la inclusión de los factores de riesgo asociados a los NPS. Con base en la tabla 9.1, los riesgos más importantes que se abordan son los siguientes:

- Impacto en el Nivel de Servicio (CINS): Una red de distribución de NPS que equilibra los costos de los riesgos con la cantidad óptima de inventario en cada Cedis puede mejorar la disponibilidad de NPS para satisfacer la demanda del cliente. La disponibilidad durante la fase de introducción de NPS es vital para el éxito de la innovación y la satisfacción del cliente.
- Desabastecimiento de Producto (CDAP): Las herramientas tradicionales de control de inventario no responden adecuadamente a la alta variabilidad e incertidumbre de las demandas de NPS en la fase de introducción en el mercado. Por ello, pueden ser ineficientes para reducir los riesgos de desabasto. En este caso, un modelo más adecuado es necesario para ajustarse a las características de demandas de los NPS en sus primeras fases, reduciendo el desabastecimiento y fortaleciendo su lanzamiento en el mercado.

- Retraso en la fecha de lanzamiento (CRL): No se puede hacer la distribución de NPS si no se encuentran disponibles en los Cedis de la cs. Esto se debe a que autorizar ventas sin disponibilidad del producto puede generar costos de pérdida de oportunidad de venta. Esta situación en la etapa de lanzamiento es más costosa porque implica altos costos de publicidad y marketing para dar a conocer el producto. Por lo tanto, la distribución adecuada de NPS puede garantizar que no haya retrasos en las fechas de lanzamiento ni pérdida de oportunidades de posicionamiento.
- Descontinuación temprana (CDT): Si bien el riesgo de lanzamiento se da en la etapa inicial, el riesgo de descontinuación temprana se da en la etapa posterior al lanzamiento. Un problema que contribuye a la suspensión temprana de NPS es la baja disponibilidad del producto durante las etapas de lanzamiento y crecimiento. Esto provoca que el mercado no se “conecte” con el producto, reduciendo su posición en un periodo de tiempo determinado, perdiendo su oportunidad por la aparición de competidores o sustitutos.
- Distribución ineficiente del producto (CDIP)/Fletes Adicionales (CFA): Estos riesgos surgen cuando las decisiones de inventarios y frecuencias de envíos a los Cedis dentro de la red se toman con herramientas estándar que no consideran los riesgos específicos de las NPS. Por tanto, el sistema no tiene la capacidad de reaccionar ante la incertidumbre de la demanda de NPS.

Dicho esto, el modelo Inpcedis propuesto integra dos factores fundamentales considerados para NPS: la demanda y el horizonte de planificación. En el caso de la distribución para cada Cedis, estos factores pueden determinar las cantidades a entregar durante cada fase o etapa de vida del NP (véase tabla 9.2). El modelo integra las siguientes herramientas:

- para determinar el horizonte de planificación, se consideró la adaptación del modelo descrito en (Sanchez-Vega *et al.*, 2019);
- para determinar el inventario en cada Cedis y reducir los riesgos de NPS considerados (véase tabla 9.1) se adaptó el modelo de revisión continua descrito en (Nagi, 2001; Diabat *et al.*, 2009).

Además, se considera que los costos de inventario (por ejemplo, costos de mantener y ordenar) cambian durante las diferentes etapas de la vida del producto y deben actualizarse de acuerdo con la tabla 9.2.

Horizonte de planeación, integración de riesgos, cantidad económica de pedido y costos totales

Como primer paso se determina el horizonte de planificación del NP para cada Cedis. Este se estima en base a las demandas acumuladas en los periodos que conforman los ciclos de vida del NP. Como se muestra en la tabla 9.2, esto lleva a definir $k = 1, \dots, 4$ horizontes de planeación de 3 meses para un ciclo anual.

Si la demanda acumulada en cada horizonte de planeación k para cada Cedis j se define como D_j^k , y los costos por ordenar y mantener inventario en dicho Cedis como Co_j^k y Ch_j^k respectivamente, se puede determinar la cantidad económica de pedido por periodo y Cedis como:

$$Q_j^k = \frac{2D_j^k Co_j^k}{Ch_j^k} \quad (1)$$

Nótese que (1) es la fórmula estándar para determinar la cantidad económica de pedido bajo el supuesto de demanda constante (Nagi, 2001). Por ello, como segundo paso, se procede a extender (1) siguiendo la metodología descrita en (Sanchez-Vega *et al.*, 2019) para integrar los costos de riesgos asociados a los NPs con demanda incierta:

$$Q_{NP_j^k} = \sqrt{\frac{2D_j^k [Co_{NP_j^k} + pNP_j^k \times A_{NP_j^k}]}{Ch_{NP_j^k}}} \quad (2)$$

Note que (2) es una extensión del modelo de revisión continua, también llamado (Q, R), para determinar la cantidad económica de pedido en presencia de demanda variable (Nagi, 2001; Diabat *et al.*, 2009; Sanchez-Vega *et al.*, 2019). De acuerdo con (2), $Co_{NP_j^k}$ es el costo integrado por ordenar

NPs para el Cedis j durante el periodo k considerando el transporte al Cedis y el sobrecosto asociado a las primeras entregas de productos. Esto se puede expresar como:

$$Co_NP_j^k = [Co_j^k + t_j] + [\text{incremento asociado a la primera entrega}] \times r^k. \quad (3)$$

En donde Co_j^k es el costo por ordenar estándar, t_j es el costo de transporte del pedido para el Cedis j , y r^k es el riesgo asociado al periodo k el cual, de acuerdo con la tabla 9.2, tendrá los valores de 1.0, 0.75, 0.50 y 0.25 para $k = 1, 2, 3$ y 4 respectivamente. De acuerdo con la investigación de campo, el costo del pedido tiene un aumento en las primeras entregas de aproximadamente el 30% del costo estándar (por ello, el incremento asociado a la primera entrega se estima como $0.30 \times Co_j^k$). Note que, de acuerdo con (2), este incremento al estar ponderado por r^k irá disminuyendo su valor a medida que el NP se convierta en un producto de línea estable en el mercado.

De manera similar, el costo por mantener se expresa como:

$$Ch_NP_j^k = Ch_j^k + [CSAI_j + COM_j] \times r^k. \quad (4)$$

En donde Ch_j^k es el costo estándar por mantener una unidad de producto en inventario en el Cedis j durante el periodo k , y $CSAI_j$ y COM_j son los costos por sobreabastecimiento y obsolescencia de materiales asociados a cada Cedis j .

Siguiendo con los elementos de (2), $p_NP_j^k$ es el costo de una unidad de NP no abastecida al Cedis j en el periodo k . Como se muestra a continuación, este costo se integra con los costos asociados al valor de unidad no abastecida (p), nivel de servicio ($CINS$), desabastecimiento de producto ($CDAP$), retraso en lanzamiento (CRL), discontinuación temprana (CDT) y distribución ineficiente ($CDIP$):

$$p_NP_j^k = p_j + [CINS_j + CDAP_j + CRL_j + CDT_j + CDIP_j] \times r^k. \quad (5)$$

Respecto a $A_NP_j^k$, este se define como el número estimado de unidades no abastecidas al Cedis j durante el periodo k . Esta variable se expresa como:

$$A_NP_j^k = \sigma LT_j^k \times L(z). \quad (6)$$

En (6) $L(z)$ es una probabilidad que se obtiene de la función de pérdida para un valor z de distribución normal estandarizada inversa asociada al nivel de servicio. Por ejemplo, para un nivel de servicio del 95%, $z = 1.64$, lo cual implica un valor $L(z = 1.64) = 0.020$. Por otro lado, σLT_j^k es la desviación estándar de la demanda durante el tiempo de entrega o *lead time* (LT) en el Cedis j en el periodo k .

Una vez definidos los costos y variables necesarios para estimar el tamaño de lote (o cantidad económica de pedido Q) como establece (2), se procede a determinar el punto de reorden R . Si bien Q determina “cuánto ordenar” para minimizar costos operativos, R determina “cuándo ordenar” para evitar el desabasto. De esta manera, R define el nivel de inventario que activa la alerta para ordenar el nuevo lote de tamaño Q que reabastecerá el inventario en el Cedis. El punto de reorden para cada Cedis j durante el periodo k se expresa como:

$$R_NP_j^k = \mu LT_j^k + z \times \sigma LT_j^k. \quad (7)$$

En (7), z es el valor de distribución normal estandarizada inversa asociada a un nivel de servicio requerido, y μLT_j^k es la demanda promedio durante el tiempo de entrega o *lead time* (LT) en el Cedis j en el periodo k .

Finalmente, se define el conjunto de ecuaciones de costos totales para evaluar de manera objetiva y tangible el beneficio y la efectividad del modelo INPCedis. El costo total $CT_NP_j^k$ para cada Cedis j durante el periodo k se expresa como la suma de los costos descritos en la tabla 9.3.

Tabla 9.3. Modelo de Costos de Revisión Continua con Riesgos Asociados a NPS

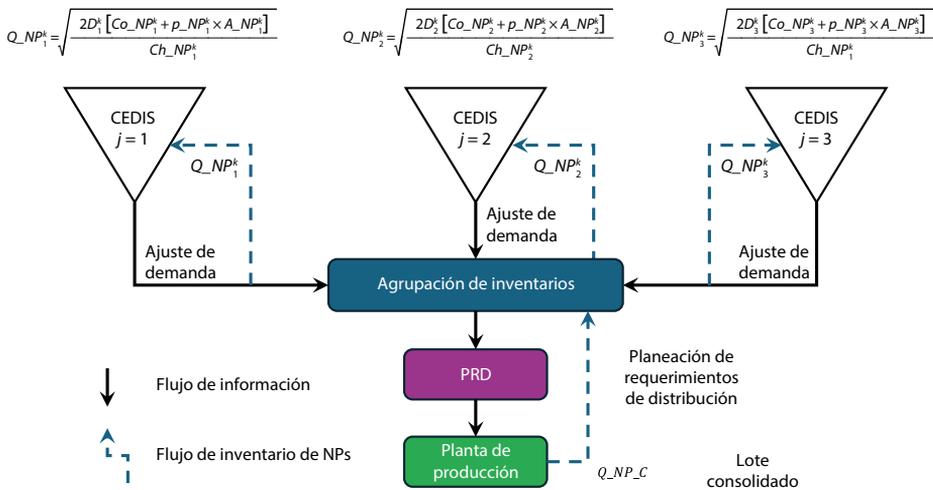
Descripción de Costo	Expresión
Costo Total por Ordenar	$TCo_NP_j^k = (Co_NP_j^k \times D_j^k) / Q_NP_j^k$
Costo Total por Mantener	$TCh_NP_j^k = (Ch_NP_j^k \times Q_NP_j^k) / 2$
Costo Total por Mantener Inventario de Seguridad	$TCh_SS_NP_j^k = Ch_NP_j^k \times [R_NP_j^k - m_{LT}^k + A_NP_j^k]$
Costo Total por Unidades No Abastecidas	$TSH_NP_j^k = p_NP_j^k \times A_NP_j^k \times (D_j^k / Q_NP_j^k)$

Fuente: elaboración propia de la adaptación del modelo presentado en Sánchez-Vega *et al.* (2019).

Consolidación de inventarios en red de Cedis Bajo Ambiente de Industria 4.0

La figura 9.1 presenta la conceptualización de la implementación del modelo Inpcedis. Dado que los retrasos son problemas inherentes a NPs, este modelo puede garantizar el cumplimiento de la fecha de lanzamiento, estableciendo niveles de inventario adecuados para cubrir todas las ubicaciones y centros de lanzamiento, lo cual es vital para la sostenibilidad de la innovación de NPs.

Figura 9.1. Integración del modelo INPCEDIS dentro de la red de distribución – Ejemplo con tres CEDIS ($j = 1, \dots, 3$)



Fuente: elaboración propia.

Como se presenta, el horizonte de planificación para cada Cedis j está determinado por las etapas del ciclo de vida del producto (trimestres). Luego, se estima el lote de inventario $Q_NP_j^k$ para abastecer cada Cedis j . Estos requisitos se envían al Cedis regional donde se realiza la agrupación de inventario. Con esta información se realiza una Planificación de Requerimientos de Distribución (PRD) para gestionar y coordinar los datos y frecuencias de suministro entre cada Cedis j y las plantas de producción.

Note que un flujo de información eficiente es importante para sincronizar las demandas en los diferentes Cedis con los requisitos de producción en el PRD y las plantas de producción. La interconexión, que es una característica principal en este caso, también lo es de la Industria 4.0 (I4). Como se informa en (Harshamali-Wijewardhana *et al.*, 2020), I4 está respaldado por tecnologías de flujo de información. Además, I4 ha sido identificado como un importante facilitador del desarrollo de NPs (De-Silva *et al.*, 2019). El uso de la tecnología RFID puede suponer un ahorro de hasta un 90% en costes y tiempos de procesamiento en cada Cedis (Unhelkar *et al.*, 2022; Efthymiou y Ponis, 2021).

Se pueden lograr mejoras en la agrupación del inventario mediante la digitalización completa de la cs. Esto se puede lograr mediante la implementación de Sistemas Ciberfísicos (CPS), que se definen como tecnologías transformadoras para gestionar sistemas interconectados entre sus activos físicos y capacidades computacionales (Baheti y Gill, 2011). En general, una CPS consta de dos componentes principales (Lee *et al.*, 2015):

- Conectividad avanzada para la adquisición de datos en tiempo real del mundo físico y la retroalimentación de información desde el ciberespacio;
- Gestión inteligente de datos, análisis y capacidad computacional que construye el ciberespacio.

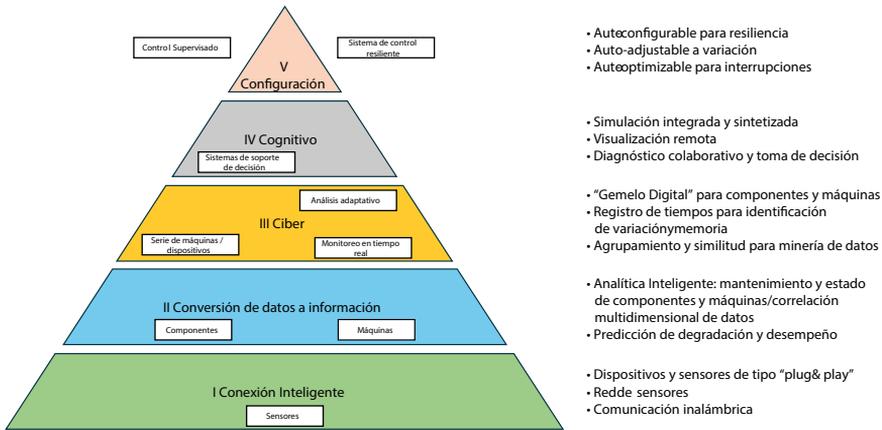
La arquitectura CPS de cinco niveles propuesta por Lee *et al.* (2015) puede considerarse como una guía para establecer un CPS para el sistema de agrupación de inventarios y otras actividades operativas dentro de los Cedis. Como se presenta en la figura 9.2, la arquitectura CPS comienza con la Conexión de Nivel I, donde se establece la red de sensores para conectar todos los dispositivos y máquinas dentro del sistema físico (es decir, inventarios, pallets, estantes de almacenamiento, bahías de entrega/envío, etc.). Luego, el Nivel II establece los sistemas de procesamiento de la información de estos sensores para realizar predicción, evaluación de riesgos de degradación y correlación de datos. Estos niveles forman la base para el Nivel III, donde realmente se construyen el CPS y el “gemelo digital” para todos los componentes físicos. Con este modelo virtual, los sistemas se pueden apli-

car para identificar variaciones en flotas o series de máquinas /dispositivos. Además, se puede realizar monitoreo en tiempo real y análisis de datos con fines de diagnóstico.

Hay que tener en cuenta que el CPS es el elemento clave para los procesos inteligentes de toma de decisiones que se realizan en los niveles IV y V. Como el inventario es importante para mantener una CS funcional, se requieren Cedis resilientes para autoajustar todas las operaciones y sistemas en presencia de eventos disruptivos en el mercado.

Finalmente, la optimización de las rutas de distribución entre cada Cedis puede proporcionar una mejora adicional a la red. Se puede considerar la optimización multiobjetivo de las rutas de distribución logística en I4 para lograr este objetivo. La planificación de rutas dentro de los Cedis también se puede implementar para optimizar la distribución dentro de los almacenes de los Cedis (Nguyen-Du *et al.*, 2020).

Figura 9.2. Arquitectura de cinco niveles para la implementación de Sistemas Ciber-físicos (CPS)



Fuente: elaboración propia basada en Lee *et al.* (2015).

Aplicación y resultados

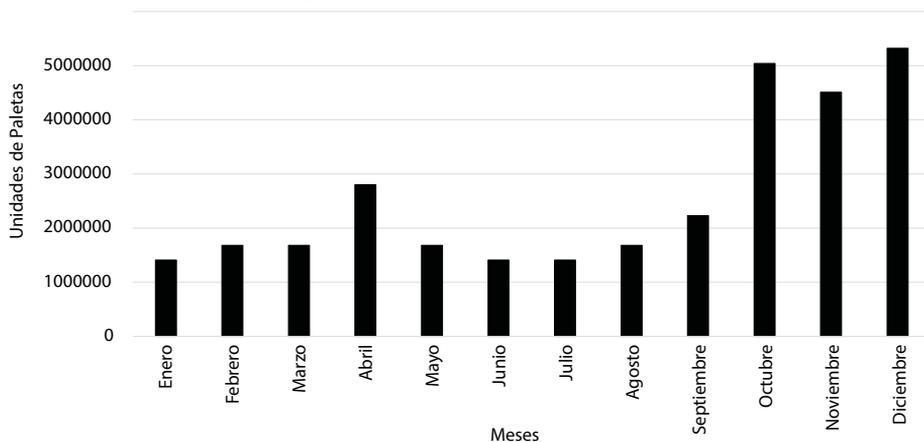
Para ejemplificar las ventajas del modelo Inpcedis, se realizó una aplicación teórica con una instancia de caso descrita por Sánchez-Vega *et al.* (2018). Este ejemplo consta de datos de una empresa que ha invertido una gran

cantidad de recursos en el desarrollo de NPs. Su familia de productos más rentable son paletas de caramelo en cuatro sabores.

La introducción de este NP ha implicado un cambio de tecnología y procesos dentro de la empresa, así como el consumo de nuevos y únicos materiales. Esto se debe a que se ha determinado que una paleta de múltiples sabores es una opción exitosa para el NP y la compañía está lista para comenzar con los planes de suministro y lanzamiento del NP.

Con base en los estudios de mercado realizados en meses anteriores, la empresa estimó un volumen de ventas de aproximadamente 30.82 millones de paletas en su primer año. Si la respuesta del mercado es favorable, el volumen de ventas representaría un incremento del 9% en las ventas anuales de la empresa. La figura 9.3 presenta la demanda mensual estimada para el primer año de vida de estos NPs. Como se presenta, en el último semestre la demanda presenta cierto grado de estacionalidad debido a las temporadas de Halloween y Navidad.

Figura 9.3. Volumen de ventas del NP



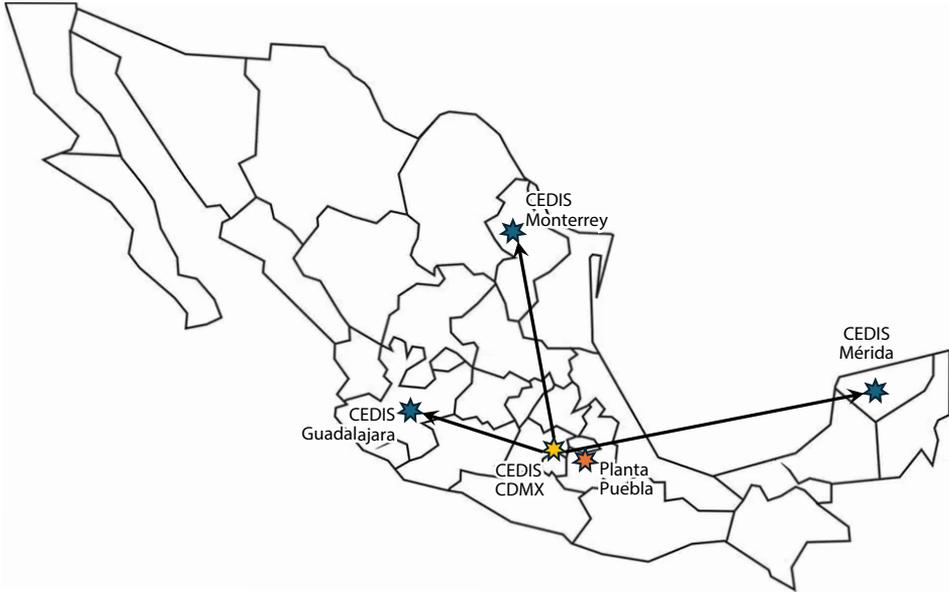
Fuente: elaboración propia.

La empresa cuenta con una red de distribución que consta de las siguientes instalaciones en México (véase figura 9.4):

- a) La planta de fabricación ubicada en la ciudad de Puebla
- b) Un Cedis principal ubicado en la Ciudad de México.

c) Tres Cedis regionales ubicados en Monterrey (Cedis 1), Guadalajara (Cedis 2) y Mérida (Cedis 3). La tabla 9.4 presenta la demanda mensual estimada de cada Cedis para el NP.

Figura 9.4. Instalaciones de la red de distribución



Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.4. Demanda mensual estimada para cada Cedis para el NP (millones de unidades)

Meses	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
Cedis 1 Monterrey	1.97	1.76	2.07	0.55	0.66	0.66
Cedis 2 Guadalajara	1.71	1.53	1.81	0.48	0.57	0.57
Cedis 3 Mérida	1.36	1.22	1.44	0.38	0.45	0.45
Meses	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Cedis 1 Monterrey	1.09	0.66	0.55	0.55	0.66	0.87
Cedis 2 Guadalajara	0.95	0.57	0.48	0.48	0.57	0.76
Cedis 3 Mérida	0.76	0.45	0.38	0.38	0.45	0.60

Fuente: elaboración propia.

Parámetros del modelo Inpcedis

La empresa tiene un calendario operativo de 52 semanas. El costo unitario del NP se estableció en un precio superior al de las paletas base debido al proceso de fabricación y materiales adicionales ($C = \$ 3.06$). Debido al proceso de producción específico del NP, la empresa estableció un plazo de entrega (LT) de 2 semanas que considera el tiempo de preparación de un pedido más los tiempos de transporte y recepción. Los LT para cada Cedis se presentan en la tabla 9.5.

Tabla 9.5. *Tiempos de entrega (LT) para cada instalación en la red de distribución*

<i>Desde / a</i>	<i>LT (semanas)</i>
Planta a Cedis CDMX	2
Cedis CDMX a Cedis 1	0.571
Cedis CDMX a Cedis 2	0.429
Cedis CDMX a Cedis 3	0.714

Fuente: elaboración propia.

Respecto a los costos asociados al inventario, la empresa definió lo siguiente para cada Cedis (estos costos son los mismos en cada Cedis): (a) costo base del pedido $Co = \$136.00$ (para los primeros tres meses se considera que el Co es 30% mayor debido a tareas de gestión adicionales); (b) costo estándar de mantenimiento $Ch = 0.05 \times C$. Además, la empresa ha establecido un nivel de servicio (ns) del 97% con un costo de unidad no suministrada (pérdida) $p = \$5.46$. Debido a lo descrito en las Secciones 2 y 3, existen riesgos latentes asociados a NPs que podrían generar un impacto monetario negativo. Por ello, en la tabla 9.6 se presentan los costos de riesgo estimados para NPs con base en su costo unitario C .

Tabla 9.6. Contribución de cada riesgo al costo unitario del NP

Riesgo	Costo unitario (\$)	Riesgo	Costo unitario (\$)
C_{INS}	1.10	C_{DIP}	0.52
C_{DAP}	0.95	C_{FA}	0.43
C_{SAI}	0.76	C_{RL}	0.61
C_{OM}	0.64	C_{DT}	0.58

Fuente: elaboración propia.

Resultados del modelo Inpcedis

Paso 1: Cálculo del tamaño de lote. Debido a la estacionalidad de la demanda (véase figura 9.3), los costos operativos por ordenar y mantener se ajustan considerando los riesgos en las diferentes etapas o periodos del ciclo de vida de los NP según lo definido por (3) y (4). Para los costos de transporte se consideran para cada Cedis: \$15.000 al Cedis 1, \$10.000 al Cedis 2 y \$21.000 al Cedis 3. Con estos datos, las tablas 9.7 y 9.8 presentan los costos por ordenar y mantener de cada Cedis durante las diferentes etapas de vida del NP.

Tabla 9.7. Co_NPkj por Cedis y ciclo de vida del NP

Cedis (j)	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	15176.8	15166.6	15156.4	15146.2
2	10176.8	10166.6	10156.4	10146.2
3	21176.8	21166.6	21156.4	21146.2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.8. Ch_NPkj por Cedis y ciclo de vida del NP

Cedis (j)	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	1.553	1.203	0.853	0.503
2	1.553	1.203	0.853	0.503
3	1.553	1.203	0.853	0.503

Fuente: elaboración propia.

Considerando la demanda mensual y las etapas de vida de los NP, la tabla 9.9 presenta las demandas totales acumuladas D_{kj} para cada Cedis.

Tabla 9.9. Demanda D_{kj} por Cedis y periodo de ciclo de vida de NP (millones de unidades)

Cedis (j)	0-3 meses ($k=1$)	4-6 meses ($k=2$)	7-9 meses ($k=3$)	10-12 meses ($k=4$)
1	1.87	2.30	2.08	5.80
2	1.62	2.00	1.81	5.05
3	1.28	1.59	1.43	4.02

Fuente: elaboración propia.

Basado en (5), el parámetro de costo $p_{NP_j^k}$ se calcula para todos los Cedis. Estos resultados se presentan en la tabla 9.10.

Tabla 9.10. Costo de pérdida unitario p_{NPkj} para cada Cedis

Etapas de Ciclo de Vida	0-3 meses ($k=1$)	4-6 meses ($k=2$)	7-9 meses ($k=3$)	10-12 meses ($k=4$)
p	9.22	7.97	7.13	6.30

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al cálculo del parámetro $A_{NP_j^k}$, (6) indica que son necesarios $\sigma_{LT_j^k}$ y $L(z)$. Para ello, de la información histórica (véase figura 9.3 y tabla 9.5), se calcula la desviación estándar durante el LT para cada etapa del ciclo de vida del NP. Note que el periodo sobre el cual la desviación estándar se calculan es de 3 meses (véase tabla 9.2), por lo que LT debe ser establecido en base al mismo periodo. Las tablas 9.11 y 9.12 presentan los ajustes del LT y el cálculo de $\sigma_{LT_j^k}$ respectivos.

Tabla 9.11. Tiempos de entrega (LT) para cada instalación en la red de distribución tomando como referencia periodos de 3 meses

Desde /A	LT (semanas)
Planta a Cedis CDMX	0.1667
Cedis CDMX a Cedis 1	0.0475
Cedis CDMX a Cedis 2	0.0357
Cedis CDMX a Cedis 3	0.0595

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.12. Desviación estándar sLT_j^k por Cedis y periodo de ciclo de vida de NP (número de unidades)

Cedis (j)	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	23995	107817	61428	59779
2	17017	81698	46813	46468
3	17075	85444	47487	47047

Fuente: elaboración propia.

Dado que el nivel de servicio es del 97%, esto equivale a un valor $z = 1.880$ para el cual $L(z) = 0.0116$. De esta manera, como se indica en (2), con la información descrita en las tablas 9.7 a 9.11 se puede calcular el tamaño de lote $Q_NP_j^k$.

Paso 2: Cálculo del punto de reorden. De acuerdo con (7), para el cálculo de $R_NP_j^k$ son necesarios μLT_j^k , z y σLT_j^k . Si bien z ya está dada por el caso de estudio ($z = 1.880$), σLT_j^k se ha calculado de los datos históricos y ya se presenta en la tabla 9.11, sólo es necesario el cálculo de μLT_j^k . Para ello se sigue el mismo procedimiento que se estableció para σLT_j^k . Los resultados se muestran en la tabla 9.13.

Tabla 9.13. Demanda promedio μLT_j^k por Cedis y periodo de ciclo de vida de NP (número de unidades)

Cedis (j)	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	88981	109442	98973	275983
2	57915	71500	64708	180538
3	76160	94605	85085	239190

Fuente: elaboración propia.

Con estos últimos parámetros, de acuerdo con (7) y la tabla 9.3, se pueden calcular R y los costos totales asociados al inventario para su evaluación.

Paso 3: Cálculo de costos totales. La tabla 9.14 presenta los cálculos realizados para el tamaño de lote ($Q_NP_j^k$), el punto de reorden ($R_NP_j^k$) y el inventario de seguridad ($SS_NP_j^k = z \times \sigma LT_j^k$). En tanto, la tabla 9.15 muestra el cálculo de los costos totales como se describen en la tabla 9.3.

Tabla 9.14. Resultados de tamaño de lote ($Q_{NP_j^k}$), punto de reorden ($R_{NP_j^k}$) y niveles de inventario de seguridad ($SS_{NP_j^k}$) para el caso de estudio de NPS (número de unidades)

Cedis (j)	$Q_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	206735	312495	315378	672163
2	158223	244818	245039	522599
3	194739	278710	290710	627629
Cedis (j)	$R_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	134110	312224	214506	388415
2	89920	225157	152753	267935
3	108274	255307	174399	327675
Cedis (j)	$SS_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	45130	202782	115533	112432
2	32005	153657	88046	87397
3	32114	160702	89314	88485

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.15. Resultados de costos totales para el caso de estudio de NPS (\$)

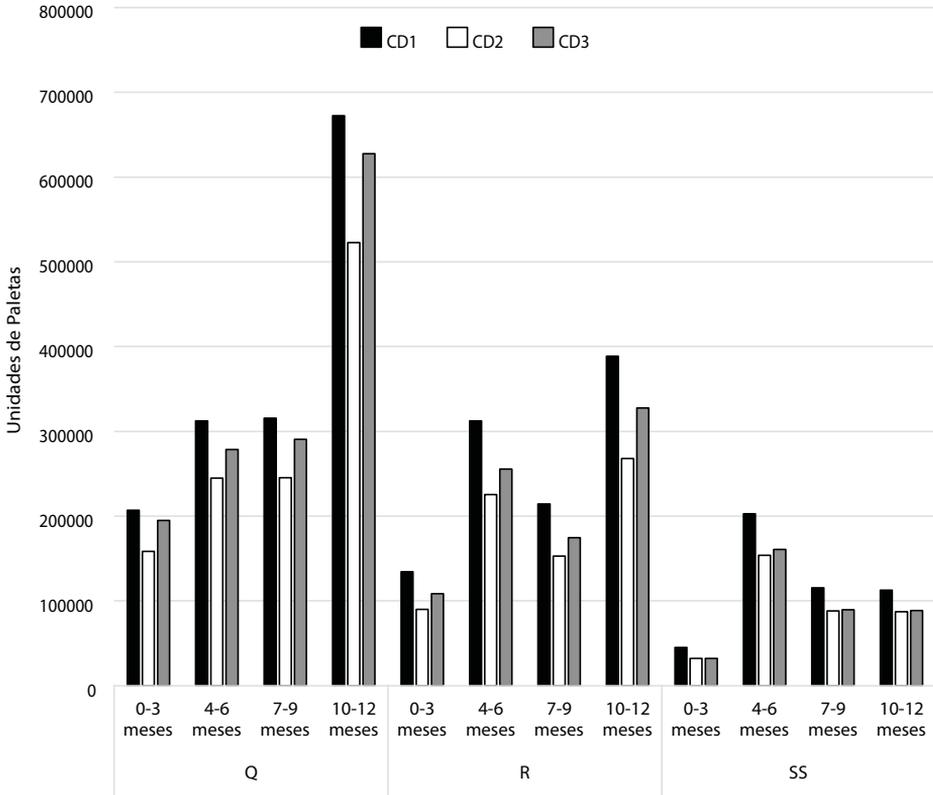
Cedis (j)	Costo total por ordenar $TCo_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	137280	111628	99960	130694
2	104197	83054	75021	98045
3	139193	120753	104068	135443
Cedis (j)	Costo total por mantener $TCh_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	160530	187966	134509	169049
2	122861	147258	104509	131434
3	151215	167644	123988	157849
Cedis (j)	Costo total por mantener inventario de seguridad $TCh_{SS_{NP_j^k}}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	70519	245454	99158	56902
2	50011	185991	75567	44232
3	50181	194519	76655	44783
Cedis (j)	Costo total por unidades no abastecidas $TSH_{NP_j^k}$			
	0-3 meses (k=1)	4-6 meses (k=2)	7-9 meses (k=3)	10-12 meses (k=4)
1	23250	76338	34548	38355
2	18663	64204	29488	33388

3	12022	46891	19920	22406
Costo total $CT_NP_j^k = TCo_NP_j^k + Tch_NP_j^k + Tch_SS_NP_j^k + TSH_NP_j^k$				
1	391579	621386	368176	395000
2	295732	480507	284585	307100
3	352611	529807	324631	360481

Fuente: elaboración propia.

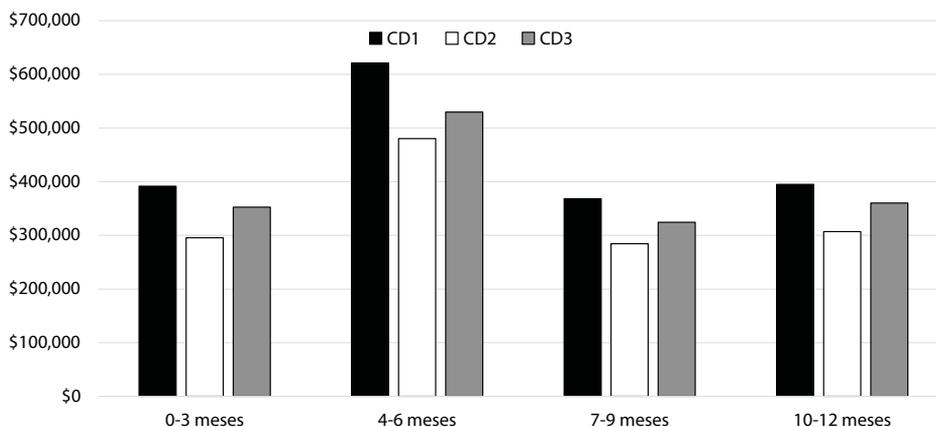
Finalmente, las figuras 9.5 y 9.6 muestran la visualización de los datos presentados en la tabla 9.14 y los costos totales $CT_NP_j^k$ de la tabla 9.15.

Figura 9.5. Visualización de resultados de $Q_NP_j^k$, $R_NP_j^k$ y $SS_NP_j^k$ para cada Cedis durante el ciclo de vida del NP (número de unidades)



Fuente: elaboración propia.

Figura 9.6. Visualización de resultados de CT_NP_k para cada Cedis durante el ciclo de vida del NP (\$)



Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

Compartir información en tiempo real en toda la cs ayuda a mitigar los riesgos y reducir los costos entre almacenes, centros de datos, proveedores y clientes. En este contexto, el modelo Inpcedis propuesto puede ayudar a reducir los tiempos de entrega y el tamaño de los lotes, y aumentar los niveles de servicio para hacer procesos logísticos más eficientes.

El modelo Inpcedis puede equilibrar el inventario entre el riesgo de NPs y la variación de la demanda a través de los Cedis en una red de distribución. Como se presenta en la figura 9.5, a medida que el NP alcanza la madurez en el mercado, el tamaño del lote $Q_NP_j^k$ aumenta en comparación con el tamaño durante los meses iniciales de su ciclo de vida. Esto se debe a la reducción de los costos de riesgo a medida que el NP se establece en el mercado y las condiciones se vuelven similares a las de los productos base.

Dado que para un NP en sus primeras etapas de lanzamiento es vital contar con un inventario adecuado en todos los puntos de la red de distribución, el modelo Inpcedis propone el cálculo de un inventario estratégico en cada Cedis de una red de distribución ya establecida. Este inventario equilibrado reduce el impacto de los riesgos más relevantes de un NP, como

son el impacto en el nivel de servicio, la escasez de productos y la discontinuación anticipada.

Además, la variabilidad de la demanda puede ser más significativa después del lanzamiento inicial del NP durante el período de 4 a 6 meses, lo que provocará un aumento en el $CT_NP_j^k$ (véase figura 9.6). Sin embargo, a medida que el NP se establece en el mercado, los costos de riesgo y la variabilidad de la demanda pueden reducirse. Así, con el modelo Inpcedis, incluso si la demanda aumenta, el $CT_NP_j^k$ se puede reducir debido a la mitigación de los costos de riesgo y la variabilidad.

Para la implementación como se describe en la figura 9.1 es necesario un sistema de información eficiente para la integración de este modelo en un sistema de PRD para consolidar pedidos para una planificación óptima entre el proveedor y los Cedis. Por lo tanto, es importante mantener actualizado el flujo de información en toda la cs. Actualmente, las tecnologías I4 y la estructura CPS de cinco niveles propuesta por Lee *et al.* (2015) pueden proporcionar los siguientes recursos para lograr este objetivo:

- Digitalización de todos los componentes, máquinas y procesos dentro de los centros de datos.
- Conexión entre todos los procesos y hardware dentro del Cedis.
- Conexión entre el sistema PRD y el sistema CPS.
- Autoajuste del sistema PRD y de los Cedis en colaboración con la gestión de alto nivel.
- Toma de decisiones inteligente a través de la cs para control de riesgos y operaciones resilientes.

Bibliografía

- Baheti, R. y Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. The Impact of Control Technology, 161-166.
- Benjaafar S., Cooper W. y Kim J. (2005). On the benefits of pooling in production-inventory systems. *Management Science*, 51(4), 548-565. doi: <https://www.jstor.org/stable/20110352>
- Berman O. y Mahdi-Tajbakhsh M. (2011). On the Benefits of Risk Pooling in Inventory

- Management. *Production & Operations Management*, 20(1), 57-71. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2010.01134.x>
- Cardoso M., Parreira R. y Morosini E. (2021). Integrated operational supply chain planning in Industry 4.0. *International Journal of Integrated Supply Management*, 14(1), 28-49. doi: <https://doi.org/10.1504/IJISM.2021.113566>
- Chaudhuri A. y Boer H. (2016). The impact of product-process complexity and new product development order winners on new product development performance: The mediating role of collaborative competence. *Journal of Engineering and Technology Management*, 42: 65-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2016.10.002>
- Cooper R. (2017). *Winning at new products: Creating value through innovation* (5th ed.). New York: Basic Books.
- De-Silva, R., Rupasingh, T. y Apeageyi, P. (2019). A collaborative apparel new product development process model using virtual reality and augmented reality technologies as enablers. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 12: 1-11. doi: <https://doi.org/10.1080/17543266.2018.1462858>
- Diabat A., Aouam T. y Al-Araidah O. (2009). The uncapacitated fixed-charge facility location problem with a multi-echelon inventory system. *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering* (pp. 803-807). Troyes, France: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223883>
- Edirisinghe C. y Atkins D. (2017). Lower bounding inventory allocations for risk pooling in two-echelon supply chains. *International Journal of Production Economics*, 187, 159-167. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.02.015>
- Efthymiou, O. y Ponis, S. (2021). Industry 4.0 Technologies and Their Impact in Contemporary Logistics: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13 (21): 1-27. doi: <https://doi.org/10.3390/su132111643>
- Harshamali-Wijewardhana, G.-E., Kumari-Weerabahu, S. y Don-Nanayakkara, J.-L. (2020). New product development process in apparel industry using Industry 4.0 technologies. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 1-22. doi: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2020-0058>
- Hashiba L. y Paiva E. (2016). Incorporating sustainability in the New Product Development process: An analysis based on the resource-based view. *BASE - Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos*, 13(3): 188-199. doi: <https://doi.org/10.4013/base.2016.133.01>
- Khan O., Stolte T., Creazza A. y Hansen Z. (2016). Integrating product design into the supply chain. *Cogent Engineering*, 3(1), 1-24. doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1210478>
- Kumar S. y Tiwari M. (2013). Supply chain system design integrated with risk pooling. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 580-588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.11.013>
- Lee, J., Bagheri, B. y Kao, H. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Liao Y. y Marsillac E. (2015). External knowledge acquisition and innovation: The role

- of supply chain network-oriented flexibility and organizational awareness. *International Journal of Production Research*, 53(18): 5437-5455. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1008106>
- Mak H. y Shen Z. (2012). Risk diversification and risk pooling in supply chain design. *IIE Transactions*, 44(8), 603-621. doi: <https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.635178>
- Nagi R. (2001). *Notes of IE 505 Production Planning and Control: Inventory Control (uncertain demand)*. University at Buffalo, Department of Industrial Engineering. New York: State University of New York.
- Nguyen-Du, D., Tran-Huu, T. y Nananukul, N. (2020). A Dynamic Route-Planning System Based on Industry 4.0 Technology. *Algorithms*, 13(12): 1-17. doi: <https://doi.org/10.3390/a13120308>
- Park H., Chang H. y Park Y. (2015). Firm's knowledge creation structure for new product development. *Cogent Business & Management*, 2(1): 1-19. doi: <https://doi.org/10.1080/23311975.2015.1023507>
- Parlings M, Klingebiel K. (2017). A framework for aligning the supply chain throughout a radical product innovation life cycle. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 31(1/2/3): 37-61. doi: <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2017.082011>
- Sanchez-Vega M., Caballero-Morales S.O., Sanchez-Partida D. y Martinez-Flores J. (2019). Risk-based Strategic Inventory Supply Model for New Products. In J. Garcia-Alcaraz, L. Rivera-Cadavid, R. Gonzalez-Ramirez, G. Leal-Jamil, y M. Chong-Chong (Eds.), *Best Practices in Manufacturing Processes* (pp. 75-95). Springer-Verlag. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99190-0_4
- Schmitt A., Sun S., Snyder L. y Shen Z. (2015). Centralization versus decentralization: Risk pooling, risk diversification, and supply chain disruptions. *Omega*, 52, 201-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.06.002>
- Shu J., Li Z. y Huang L. (2013). Demand selection decisions for a multi-echelon inventory distribution system. *Journal of the Operational Research Society*, 64(9), 1307-1313. doi: <http://www.jstor.org/stable/24501058>
- Taki P., Barzinpour F. y Teimoury E. (2016). Risk-pooling strategy, lead time, delivery reliability and inventory control decisions in a stochastic multi-objective supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 619-646. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2115-6>
- Unhelkar, B., Joshi, S., Sharma, M., Prakash, S., Krishna-Mani, A. y Prasad, M. (2022). Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in the industry 4.0 - A systematic literature review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(2): 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jjimi.2022.100084>
- Watson M., Lewis S., Cacioppi P. y Jayaraman J. (2012). *Supply Chain Network Design: Applying Optimization & Analytics to Global Supply Chain*. USA: Pearson Education.
- Yang L., Ng C. y Cheng T. (2010). Evaluating the effects of distribution centres on the performance of vendor-managed inventory systems. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 112-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.02.006>