DISEÑO DE LOS MODELOS DE ABASTECIMIENTO PARA ELEMENTOS COMPRADOS EN UNA EMPRESA QUE ENSAMBLA CARROCERÍAS PARA BUSES

DAVID VALENCIA OSPINA

Trabajo de grado

Asesor
Rodrigo Restrepo Suárez

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

Agradecimiento

Agradezco a Dios por cumplir sus promesas al permitirme alcanzar esta meta. Gracias también por la vida de mi esposa Karem, quien fue mi mayor apoyo durante este proceso. Su amor, paciencia y compromiso me dieron fuerzas en todo momento, asumiendo con valentía nuevas responsabilidades mientras yo contaba con poco tiempo libre. Este logro también es suyo.

CONTENIDO

pág.

0. INTRODUCCIÓN 13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
2. JUSTIFICACIÓN 16
3. OBJETIVOS 17
3.1. GENERAL 17
3.2. ESPECÍFICOS 17
4. MARCO TEÓRICO 18
4.1. LA IMPORTANCIA DE UN CORRECTO MODELO DE ABASTECIMIENTO 18
4.2. LOS BENEFICIOS DE GENERAR UNA SEGMENTACIÓN DEL INVENTARIO 18
4.3. SEGMENTACIÓN POR INTERMITENCIA Y VARIACIÓN DE LA DEMANDA 19
4.4. MODELOS DE ABASTECIMIENTO 21
4.4.1. MRP 21
4.4.2. JIT…. 21
4.4.3. VMI.. 21
4.4.4. Máximos y Mínimos 21
4.4.5. Revisión Continua (s, Q). 21
4.4.6. Revisión Continua (s, S) 21
4.4.7. Revisión Periódica (R, S). 22
4.4.8. Revisión Periódica con Punto de Reorden (R, s, S) 22
4.4.9. DDMRP 22
4.4.10. Modelos de Simulación para la Gestión de Inventarios 22
4.4.11. Modelos de Optimización de Inventarios 23
4.4.12. Integración de Simulación y Optimización 23
4.5. BENEFICIOS DEL DDMRP FRENTE A LOS OTROS MODELOS 23
4.5.1. Reducción de la Variabilidad 24
4.5.2. Mejora en la Visibilidad y Contro 24
4.5.3. Flexibilidad y Adaptabilidad 24
4.5.4. Reducción de costos y mejora en el servicio al cliente. 24

4.6. METODOLOGÍA DDMRP Y SUS CÁLCULOS 24
4.6.1. Diseño de la metodología DDMRP 25
5. DISEÑO METODOLÓGICO 30
5.1. RECOLECCIÓN DE DATOS 30
5.2. ALCANCE DEL PROYECTO 30
5.3. PASOS METODOLÓGICOS 30
6. MATERIALES Y MÉTODOS 32
6.1. IDENTIFICACIÓN DE REFERENCIAS COMUNES POR CARROCERÍA 32
6.2. MATRIZ DE INTERMITENCIA Y VARIABILIDAD EN EL CONSUMO 35
6.3. MODELOS DE ABASTECIMIENTO ACTUALMENTE UTILIZADOS 38
6.4. ÍTEMS COMUNES QUE SE VAN A REABASTECER POR UN MODELO PTS 40
6.5. SELECCIÓN DE MODELO DE REABASTECIMIENTO 40
6.6. DISEÑO DEL MODELO DDMRP 42
6.6.1. Posicionamiento estratégico del inventario 43
6.6.2. Buffer de planeación 44
6.6.3. Cálculo del buffer de planeación 47
6.6.4. Planeación basada en la demanda 48
6.6.5. Cálculo del buffer de ejecución. 49
6.6.6. Cálculo del buffer de análisis. 50
6.7. COMPONENTES COMUNES PTO 52
6.8. RÉPLICA DESEMPEÑO DEL MODELO 52
6.8.1. Integridad de la señal. 54
6.8.2. Integridad del punto de desacople 55
6.8.3. Velocidad del punto de desacople 56
7. RESULTADOS 57
7.1. ANÁLISIS POR LT 57
7.1.1. Rango de LT entre 15 y 20 días 57
7.1.2. Rango de LT entre 25 y 30 días. 60
7.1.3. Rango de LT entre 35 a 50 días 62
7.1.4. Rango de LT de 60 días o superior 63
7.2. ANÁLISIS POR VARIABILIDAD 66
7.2.1. Factor de variabilidad baja 66
7.2.2. Factor de variabilidad media 68
7.2.3. Factor de variabilidad alta 69

7.3. AJUSTES PARAMETROS DE LA RÉPLICA 71
8. CONCLUSIONES 72
9. RECOMENDACIONES 73
REFERENCIAS 74
ANEXOS 77

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Rangos del %LT 26
Tabla 2. Rangos %Variación 26
Tabla 3. Cantidad EP por carrocería 33
Tabla 4. Muestra de coincidencias de ítems en las EP por carrocería 33
Tabla 5. Porcentaje de participación de los ítems que coinciden al 100% por carrocería 34
Tabla 6. Ítems que logran cubrir el 75% de los componentes en la carrocería Busstar 380 S2 34
Tabla 7. Ítems que logran cubrir el 75% de los componentes en la carrocería Busstar DD S2 34
Tabla 8. Ítems por coincidencia entre EP que logran la meta de cobertura por carrocería 35
Tabla 9. Ítems comunes compartidos entre las carrocerías 35
Tabla 10. Categorización de patrones de demanda 36
Tabla 11. Ítems comunes con su modelo de abastecimiento 39
Tabla 12. Ítems comunes PTO segmentados por intermitencia y variabilidad del consumo 40
Tabla 13. Cantidad de ítems que migran a PTS 40
Tabla 14. Resultado implementación DDMRP en los consumibles 42
Tabla 15. Categoría del LT y factor de LT 45
Tabla 16. Categoría de variabilidad y factor de variabilidad 46
Tabla 17. Combinaciones básicas del perfil de buffer 46
Tabla 18. Perfil completo ítem 234814 47
Tabla 19. Ejemplo de alerta de inventario físico actual 49
Tabla 20. Información día 1 ítem 211301 para el ejemplo de la alerta de inventario físico proyectado 50
Tabla 21. Estado de la alerta del inventario proyectado físico por día del ítem 211301 50
Tabla 22. Medición integridad de la señal para el ítem 12 55
Tabla 23. Frecuencia de pedido para el ítem 12 56
Tabla 24. Nivel de servicio ítems con LT entre 15 a 20 días 57
Tabla 25. Demanda ítem 3395 59
Tabla 26. Valor inventario en exceso ítems con LT entre 15 a 20 días 60
Tabla 27. Nivel de servicio ítems con LT entre 25 a 30 días 60
Tabla 28. Comportamiento demanda ítem 200706 60
Tabla 29. Comportamiento demanda ítem 12 61
Tabla 30. Nivel de servicio ítems con LT entre 35 a 50 días 62
Tabla 31. Valor inventario en exceso ítems con LT entre 35 a 50 días 63
Tabla 32. Nivel de servicio ítems con LT de 60 días o superior 64
Tabla 33. Valor inventario en exceso ítems con más de 60 días de LT 65
Tabla 34. Valor del inventario en exceso ítems réplica 65
Tabla 35. Nivel de servicio con el factor de variabilidad baja 66
Tabla 36. Valor del inventario en exceso de los ítems con variabilidad baja 68
Tabla 37. Nivel de servicio con el factor de variabilidad media 68

Tabla 38. Valor del inventario en exceso de los ítems con variabilidad media..... 69
Tabla 39. Nivel de servicio para el factor de variabilidad alta..... 69
Tabla 40. Valor del inventario en exceso para los ítems con variabilidad alta..... 70
Tabla 41. Valores inventario con ajustes del DDMRP..... 71
Tabla 42. Proporción de los ítems PTO y PTS por carrocería antes y después del modelo diseñado 72

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 Cuadrantes matriz intermitencia y variabilidad. 20
Figura 2 Resumen cálculos de los Buffers del DDMRP 27
Figura 3Valores de corte para los patrones de demanda ADI= 1.5 LT y CV^2 = 0.49. 37
Figura 4 Matriz de intermitencia VS variabilidad en el consumo. 37
Figura 5 Estructura del flujo de materiales donde el trapecio invertido representa los inventarios. 43
Figura 6 Ejemplo uso del ítem 234814 en las EP 1737, EP1789 y EP1742. 44
Figura 7 Posicionamiento de los buffers del ítem 234814 en las EP 1737, EP1789 y EP1742. 44
Figura 8 Tiempo de entrega referencias comunes 45
Figura 9 Histograma del CV en los 744 ítems comunes. 46
Figura 10 Zonas de buffer del ítem 234814 48
Figura 11 PFN en el buffer del ítem 234814. 49
Figura 12 Desempeño del inventario físico del ítem 12 en los meses de junio y julio 2024. 51
Figura 13 Ejemplo de una referencia con lead time y las zonas de alerta de lead time. 52
Figura 14 Resultados de la réplica del modelo para el ítem 12 de junio a noviembre del 2024. 54
Figura 15 Frecuencia de la posición del inventario físico de junio a noviembre para el ítem 12. 56
Figura 16 Buffer de análisis del ítem 211301. 58
Figura 17 Integridad del punto de desacople de junio a noviembre de 2024 para el ítem 211301. 58
Figura 18 Buffer de planeación y análisis del ítem 3395. 59
Figura 19 Buffer de planeación del ítem 200706 61
Figura 20 Buffer de análisis del ítem 12. 61
Figura 21 Buffer de análisis del ítem 5400. 62
Figura 22 Buffer de análisis del ítem 9316. 63
Figura 23 Buffer de análisis del ítem 235707. 64
Figura 24 Buffer de análisis del ítem 424760. 65
Figura 25 Buffer de análisis del ítem 468130. 67
Figura 26 Buffer de planeación del ítem 468130. 67
Figura 27 Buffer de análisis del ítem 76258. 67
Figura 28 Buffer de planeación del ítem 293802. 68
Figura 29 Buffer de análisis del ítem 244034. 69
Figura 30 Buffer de análisis del ítem 2885. 70
Figura 31 Buffer de análisis del ítem 6343. 70

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1 Cálculo del ADI 19
Ecuación 2 Cálculo del coeficiente de variación al cuadrado 19
Ecuación 3 Cálculo demanda promedio 19
Ecuación 4 Cálculo de la ZR 25
Ecuación 5 Cálculo de la ZR base 25
Ecuación 6 Cálculo de la ZR seguridad 25
Ecuación 7 Cálculo de la ZA 26
Ecuación 8 Cálculo de la ZV 26
Ecuación 9 Cálculo de la PFN 27
Ecuación 10 Cálculo del pedido de reposición 27
Ecuación 11 Cálculo de la cantidad de ítems comunes 35
Ecuación 12 Cálculo del ADI simplificado 36
Ecuación 13 Cálculo del CV^2 simplificado 36
Ecuación 14 Cálculo de la ZA para el ítem 234814 47
Ecuación 15 Cálculo de la ZV para el ítem 234814 47
Ecuación 16 Cálculo de la ZR para el ítem 234814 48
Ecuación 17 Cálculo de la PFN para el ítem 234814 48

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

ADI *Average demand Interval.*

ADU *Average daily usage.*

BOM *Bill of materials.*

CV *Coeficiente de variación.*

DDI *Demand driven institute.*

EP *Estructura de producto.*

ERP *Enterprise resource planning.*

JIT *Just in time.*

LT *Lead time.*

MOQ *Minimum order quantity.*

MPS *Master production schedule.*

MRP *Material requirements planning.*

MTO *Make to order.*

OH *On hand.*

PFN *Posición de flujo neto.*

PTO *Purchase to order.*

PTS *Purchase to stock.*

PVO *Plan de venta y operaciones*

SC *Solicitud de compra.*

SNP *Solicitud nuevo proyecto.*

TDA *Tope de amarillo.*

TDR *Tope de rojo.*

TDV *Tope de verde.*

TOC *Theory of constraints.*

VMI *Vendor managed inventory.*

ZA *Zona amarilla.*

ZR *Zona roja.*

ZV *Zona verde.*

LISTA DE ANEXOS

pág.

Anexo A. Información de las EP y tablas para su análisis 77
Anexo B. Tablas de coincidencia por EP para Busstar DD S2 y Busstar 380 S2 respectivamente 77
Anexo C. Resultado calculo ADI y CV^2 para la matriz de variabilidad 78
Anexo D. Resultado selección aleatoria de ítems para la réplica del modelo DDMRP 78
Anexo E. Hoja de cálculo de la réplica 78

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un modelo de abastecimiento basado en DDMRP para una empresa ensambladora de carrocerías de buses. La empresa opera bajo un sistema MTO, lo que exige una estrategia eficiente de suministro que garantice la disponibilidad de materiales sin generar excesos de inventario.

El estudio inicia con la revisión de diferentes modelos de abastecimiento utilizados en la industria, analizando sus ventajas y limitaciones. Con base en este análisis se selecciona la metodología DDMRP por su enfoque orientado a la demanda y su capacidad para gestionar la variabilidad en la cadena de suministro. Se identifican los ítems de uso común en la producción y se clasifican según su intermitencia y variabilidad, utilizando una matriz basada en los parámetros ADI y CV^2. Con lo anterior, se incrementa el porcentaje de elementos que se abastecen PTS, pasando del 23% al 76% aproximadamente.

Los resultados de la réplica indican que DDMRP mejora la disponibilidad de materiales para producción aumentando el nivel de servicio del 80% al 91%, aunque incrementa el valor del inventario en 81%.

Este estudio demuestra que DDMRP mejora la gestión de inventarios y el abastecimiento, pero requiere monitoreo continuo y ajustes estratégicos, debido a cambios repentinos de la demanda no se ajusta automáticamente lo que genera excesos o faltantes de inventario.

Palabras clave: DDMRP, abastecimiento, inventario, manufactura bajo pedido, buffers dinámicos, PTO, PTS, análisis de variabilidad, ADI, CV.

0. INTRODUCCIÓN

La fabricación de buses para el transporte masivo de pasajeros en Colombia opera bajo un modelo MTO. Este proceso involucra diversas etapas de manufactura, tales como la fabricación en fibra de vidrio, trabajos metalmecánicos, aplicación de pintura y el ensamblaje de las piezas. Para asegurar el abastecimiento de los componentes necesarios que permitan cumplir con la demanda se han implementado distintas políticas de suministro, utilizando modelos como: MRP, Revisión Periódica, Revisión Continua, JIT, VMI y DDMRP. Estos modelos tienen como objetivo mejorar la gestión de materiales y recursos, impactando así positivamente las métricas operacionales y financieras de la organización [1].

Este proyecto de grado describe el diseño de un modelo de abastecimiento para los elementos comprados en la empresa Busscar de Colombia S.A.S., empleando un enfoque cuantitativo. La importancia de este estudio radica en la exigencia de los clientes de recibir los buses en el menor tiempo posible; el modelo actual de abastecimiento tiene un nivel de servicio promedio de disponibilidad de materiales del 60%, lo cual no permite cumplir con el plan maestro de producción.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En [1] se destaca la importancia del flujo eficiente de información y materiales dentro de una cadena de suministro, fundamento esencial para diversas metodologías y prácticas empresariales modernas. Una empresa que manufactura carrocerías para el transporte masivo de pasajeros, como Busscar de Colombia S.A.S., puede beneficiarse significativamente de la implementación de buenas prácticas, en particular mediante el uso de modelos de abastecimiento [2].

En Busscar de Colombia S.A.S. las referencias compradas se clasifican en familias como metales, químicos, silletería, vidrios, consumibles, accesorios y elementos de sujeción, entre otras. Cada familia se gestiona con metodologías de planeación que la empresa ha ido ajustando con el tiempo, basadas principalmente en principios de MRP y políticas de máximos y mínimos.

Las listas de materiales o estructuras de producto (EP) que se utilizan para los requerimientos de compra incluyen todos los elementos comprados y manufacturados necesarios para la fabricación de una carrocería. En ellas se indican las cantidades requeridas y la operación del proceso productivo en la que se utilizan. Estas listas son elaboradas por el área técnica con base en la información registrada en una SNP generada por el área comercial, donde se consignan las características de la carrocería acordadas con el cliente. Algunas de las opciones que el cliente puede personalizar son la longitud del bus, los colores, el tipo de sillas, el aire acondicionado, la calefacción, la distribución de sillas y el sistema de entretenimiento. Con esta información el área técnica inicia el proceso de diseño y estructuración del proyecto, siendo la EP uno de los entregables resultantes.

El proceso de abastecimiento se activa con la liberación de la EP y la fecha de inicio del bus en el plan maestro de producción. A partir de esto, el modelo de abastecimiento debe atender tanto las partes compradas contra demanda (PTO) como los materiales gestionados bajo un esquema de compra para inventario (PTS), como los metales y los químicos. Por tanto, el proceso de abastecimiento depende de la información contenida en la EP y en el plan maestro de producción.

En 2022 se implementó la metodología DDMRP para todas las referencias compradas, buscando mejorar la disponibilidad de materiales en el proceso productivo. No obstante, la ejecución no siguió los lineamientos del modelo, lo que afectó los resultados esperados en la reducción de faltantes y excesos de

inventario. Sin embargo, se desarrolló un software que mejoró la velocidad en la generación de la explosión de materiales. A partir de esta experiencia, la empresa optó por retomar el sistema MRP complementado con prácticas empíricas que han ofrecido resultados aceptables.

La principal causa de los faltantes en producción radica en que el tiempo de abastecimiento de los componentes, posterior a la liberación de la EP, supera el plazo requerido para su utilización en el proceso productivo. Esta situación ha impactado negativamente la disponibilidad promedio de materiales que se ha ubicado en un 60% según los informes semanales de abastecimiento. Además en las reuniones de planeación de ventas y operaciones se identifica que las metas mensuales de entrega de carrocerías se cumplen en un promedio del 81%, lo que ha generado desviaciones negativas en los resultados financieros alcanzando hasta un 10%.

Ante esta situación surge el interrogante sobre qué modelos de abastecimiento deben diseñarse para los componentes y materias primas compradas, con el fin de mejorar su disponibilidad y asegurar el cumplimiento del plan de producción.

Las variables para trabajar son:

- **Variable independiente**: plan de producción.
- **Variable dependiente**: abastecimiento de componentes y materias primas compradas.

2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto surge de la necesidad de mejorar los modelos de abastecimiento para los elementos comprados en Busscar de Colombia S.A.S., empresa reconocida por la fabricación de carrocerías para el transporte masivo de pasajeros en Colombia. Dada la complejidad de su cadena de suministro y la variedad de componentes requeridos para la producción de un bus, contar con un modelo de abastecimiento eficiente es clave para asegurar la continuidad de las operaciones. Una mejor gestión de inventarios y abastecimiento no solo permite una respuesta más ágil a los requerimientos de producción, sino que también reduce los costos operativos al minimizar excesos de inventario y prevenir faltantes que podrían interrumpir la línea de ensamble.

El desarrollo y aplicación de un modelo de abastecimiento alineado con las necesidades específicas de Busscar contribuirá a mejorar las métricas operacionales y financieras de la empresa. Esto se reflejará en una mayor competitividad al facilitar el cumplimiento de los tiempos de entrega. A nivel académico, el estudio aporta elementos valiosos sobre la aplicación de teorías de gestión de inventarios en contextos industriales complejos.

Este proyecto busca resolver un problema operacional relacionado con el papel de los modelos de abastecimiento en la transformación de las prácticas empresariales en la industria automotriz. Su objetivo es promover un enfoque más dinámico y adaptativo frente a los desafíos del mercado.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Diseñar modelos de abastecimiento que incrementen la disponibilidad de los componentes y materias primas compradas para el proceso de ensamble de carrocerías en la empresa Busscar de Colombia S.A.S. y reduzcan la inversión en el capital de trabajo. Estos modelos estarán basados en los atributos específicos que caracterizan cada ítem, tales como la variabilidad en la demanda, los tiempos de entrega y la importancia del componente dentro del proceso productivo.

3.2. ESPECÍFICOS

- Revisar las fuentes de información relevantes para identificar las mejores prácticas en el diseño de políticas de abastecimiento.
- Clasificar los inventarios de componentes y materias primas según sus atributos para comprender mejor el comportamiento de la demanda.
- Diseñar políticas de abastecimiento basadas en la clasificación de los inventarios de componentes y materias primas, adaptadas a las necesidades operativas de Busscar de Colombia S.A.S.
- Estimar el impacto del diseño de los nuevos modelos de abastecimiento en el valor del inventario y en el nivel de servicio, definido como la relación de los días con cobertura de inventario respecto al total de días en el horizonte de tiempo observado.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. LA IMPORTANCIA DE UN CORRECTO MODELO DE ABASTECIMIENTO

El modelo de abastecimiento es clave en la gestión de la cadena de suministro, pues influye directamente en la eficiencia operativa y los resultados financieros. Un modelo bien estructurado mejora la disponibilidad de materiales, reduce costos y optimiza los tiempos de respuesta [3]. Permite disponer de los recursos necesarios en el momento justo y en la cantidad correcta, minimizando excesos y faltantes de inventario.

En la industria automotriz esta gestión adquiere mayor relevancia por la complejidad del proceso productivo y la necesidad de coordinar múltiples proveedores [4]. Un modelo de abastecimiento ineficiente puede generar retrasos, sobrecostos y afectar el cumplimiento del plan maestro de producción.

Diversos estudios han señalado que una gestión de abastecimiento proactiva y planificada mejora la resiliencia y flexibilidad de la cadena de suministro[5]. Además fortalece la visibilidad y el control de los flujos de materiales, permitiendo una mejor respuesta ante cambios en la demanda y en las condiciones operativas [6]. Disponer de un modelo de abastecimiento estructurado no solo responde a una necesidad operativa, sino que representa una ventaja estratégica en mercados exigentes y cambiantes.

4.2. LOS BENEFICIOS DE GENERAR UNA SEGMENTACIÓN DEL INVENTARIO

La segmentación del inventario es una herramienta clave para mejorar la eficiencia en la gestión de materiales. Clasificar los ítems según criterios como valor, rotación, criticidad, intermitencia o variabilidad permite mejorar el reabastecimiento, reducir costos y asegurar la disponibilidad de los componentes más relevantes [7].

Uno de los principales beneficios de la segmentación del inventario es la posibilidad de priorizar la gestión de los ítems clave. Por ejemplo, los artículos de alta rotación y valor pueden recibir mayor atención, reduciendo el riesgo de faltantes que afecten la producción [8], mientras que los de menor rotación pueden manejarse con estrategias más simples, mejorando el uso de recursos.

La segmentación del inventario mejora la planificación y previsión, al permitir una estrategia de compras y almacenamiento más precisa, que reduce excesos y costos innecesarios [9]. Esto incrementa la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda. También favorece un mejor uso del espacio y del capital de trabajo. Al agrupar ítems con comportamientos similares es posible aplicar políticas diferenciadas de almacenamiento, reduciendo costos y liberando recursos para otras áreas estratégicas [10].

4.3. SEGMENTACIÓN POR INTERMITENCIA Y VARIACIÓN DE LA DEMANDA

El método ABC es una herramienta común para clasificar ítems según su valor o frecuencia de uso, agrupándolos en categorías A, B y C. Aunque este método es útil por su simplicidad, presenta limitaciones en entornos con alta variabilidad o demanda poco predecible [11]. Como alternativa se implementa la segmentación por intermitencia y variabilidad, utilizando las métricas ADI y CV^2 [12].

- ADI: mide la frecuencia de consumo. Se calcula como el número total de periodos dividido por los periodos con demanda mayor a cero [13].

$$ADI = \frac{\sum_{i-1}^{N} t_i}{N} \quad (1)$$

  Donde:

  - N representa el número periodos seleccionados
  - t_i es el intervalo entre demanda consecutivas

- CV^2: representa la variabilidad, calculada como el cuadrado del coeficiente de variación de la demanda [13] [14].

$$CV^2 = \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_i - \varepsilon)^2}{N}}}{\varepsilon}\right]^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i}{N} \quad (3)$$

  Donde:

  - N representa el número periodos diferentes a cero
  - n es el número total de periodos
  - ε_i es la demanda en el periodo
  - ε es el promedio de los periodos diferentes a cero

Con base en estos parámetros los ítems se clasifican en una matriz de cuatro cuadrantes: suave, errático, intermitente e irregular [15], según se observa en la figura 1.

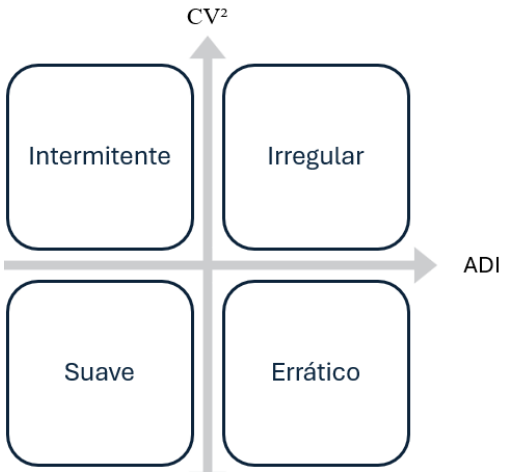


Fig 1. Cuadrantes matriz intermitencia y variabilidad.

Donde:

- Suave: demanda estable y continua.
- Errático: consumo frecuente pero con variaciones en cantidad.
- Intermitente: demanda esporádica con cantidades estables.
- Irregular: variabilidad alta tanto en frecuencia como en cantidad.

A partir de lo argumentado por los autores en [16] y debido a que el entorno de operación presenta variaciones en la demanda y tiempo de abastecimiento limitado, se adopta un modelo PTS para los ítems categorizados en los cuadrantes suave y errático según la figura 1. Para los ítems ubicados en los cuadrantes intermitente e irregular se utiliza un modelo PTO cuando el tiempo de entrega del proveedor permite reaccionar ante los requerimientos de la demanda sin comprometer la fecha de entrega pactada con el cliente final. Sin embargo, si el ítem presenta un LT largo, se opta por un modelo PTS para evitar rupturas de inventario.

En este proyecto se aplica la segmentación basada en ADI y CV^2, adecuada para un entorno dinámico donde los ítems pueden cambiar de cuadrante según su patrón de consumo. Esta clasificación permite ajustar las estrategias de reabastecimiento al comportamiento real de cada ítem y permite tomar decisiones más alineadas con su demanda.

4.4. MODELOS DE ABASTECIMIENTO

Existen múltiples modelos para garantizar la disponibilidad de materiales; a continuación se describen los más representativos, destacando sus principales características y aplicaciones.

4.4.1. MRP. Es un modelo ampliamente utilizado para planificar y programar materiales. Calcula necesidades a partir del inventario actual, la lista de materiales, las órdenes en proceso y los LT [17] [18], aunque es robusto, puede enfrentar dificultades en entornos con alta variabilidad y pronósticos imprecisos [19].

4.4.2. JIT. Busca minimizar inventarios, asegurando que los materiales lleguen justo cuando se requieren [20][21]. Utiliza el sistema Kanban, el cual regula visualmente el flujo de materiales mediante señales de reabastecimiento [22][23]. Su efectividad disminuye en contextos con alta variabilidad o interrupciones en el suministro [21].

4.4.3. VMI. En este modelo el proveedor gestiona el inventario del comprador, facilitando el reabastecimiento y reduciendo la carga operativa. Su éxito depende de la colaboración y capacidad del proveedor para anticipar la demanda [24].

4.4.4. Máximos y Mínimos. Define un nivel mínimo que activa el reabastecimiento y un nivel máximo que evita excesos [25]. Es simple y poco efectivo en entornos con alta variabilidad.

4.4.5. Revisión Continua (s, Q). Se realiza un pedido de una cantidad fija Q tan pronto el inventario cae por debajo del nivel de reorden s. Es particularmente útil en entornos con alta variabilidad en la demanda, debido a que permite una respuesta rápida a las fluctuaciones [26] [18].

4.4.6. Revisión Continua (s, S). Una vez el inventario está por debajo del nivel de reorden s, se activa el pedido de reposición por la cantidad necesaria para que el inventario efectivo llegue a un nivel máximo S [18].

4.4.7. Revisión Periódica (R, S). El inventario se revisa a intervalos regulares de tiempo R y se ordena la cantidad necesaria para subir el inventario al valor S. Este modelo es útil en entornos donde la demanda es relativamente estable y las revisiones periódicas son viables [27] [18].

4.4.8. Revisión Periódica con Punto de Reorden (R, s, S). Combina características de los modelos de revisión continua y periódica. En este sistema el inventario se revisa a intervalos regulares de tiempo R y si el nivel de inventario está por debajo del punto de reorden s, se coloca un pedido suficiente para reabastecer hasta un nivel máximo S [18].

4.4.9. DDMRP. Integra elementos de MRP, JIT y TOC. Utiliza puntos de desacoplamiento y buffers dinámicos para gestionar el flujo de materiales según la demanda real, reduciendo variabilidad y mejorando la capacidad de respuesta [28].

4.4.10. Modelos de Simulación para la Gestión de Inventarios. Permiten replicar el comportamiento de los sistemas de inventarios en entornos controlados, facilitando la experimentación sin alterar las operaciones reales. Estos modelos son útiles para analizar escenarios de alta incertidumbre en la demanda, tiempos de entrega variables y limitaciones de recursos. Entre los principales enfoques se destacan:

- Monte Carlo: este método se utiliza para evaluar la variabilidad de la demanda y los tiempos de entrega, modelando distribuciones probabilísticas que representan estos comportamientos. Su implementación permite estimar el riesgo asociado a decisiones de inventarios, como los niveles de stock óptimos para minimizar costos y evitar faltantes. En el estudio presentado en [29] se muestra una solución que logró reducir los gastos por concepto de compra en un 10%, aplicada en un centro de distribución de tarjetas de recarga de saldo móvil.
- Algoritmos Genéticos: estos algoritmos optimizan el control de inventarios al buscar soluciones en espacios complejos de múltiples dimensiones. Combinan conceptos de evolución biológica y aprendizaje automático para identificar configuraciones óptimas de inventarios, incluso en sistemas con grandes volúmenes de datos y restricciones dinámicas [29], [30].

4.4.11. Modelos de Optimización de Inventarios. La optimización busca reducir costos asociados al inventario (almacenamiento, pedidos, faltantes) y maximizar la disponibilidad de productos en el momento adecuado. En [30] se muestra que estos modelos logran disminuir los costos totales de los inventarios en un 10.38%, manteniendo un nivel de servicio del 100%, en una empresa de confecciones. Los enfoques comunes incluyen:

- Cantidad Económica de Pedido (EOQ): este modelo calcula el volumen de pedido óptimo que minimiza los costos totales, considerando costos de almacenamiento, pedidos y demanda constante [29].
- Optimización basada en red: analiza las ubicaciones óptimas de almacenes y rutas logísticas para minimizar costos y mejorar la confiabilidad de la cadena de suministro. Este enfoque es particularmente efectivo en cadenas de abastecimiento complejas y distribuidas.
- Algoritmos heurísticos e híbridos: los métodos como Tabú Search y combinaciones de EOQ y punto de reorden, introducen flexibilidad frente a la incertidumbre. Esto incluye optimización en entornos con restricciones dinámicas, como almacenamiento limitado y demanda intermitente[30].

4.4.12. Integración de Simulación y Optimización. El uso combinado de técnicas de simulación y optimización permite probar escenarios y ajustar políticas antes de su aplicación. Por ejemplo:

- Monte Carlo + Genéticos: estudios muestran reducciones de costos del 10% en modelos de abastecimiento móvil [29].
- Planeación Integrada: permite ajustar inventarios de productos terminados y materias primas frente a variaciones en demanda y LT [31].

4.5. BENEFICIOS DEL DDMRP FRENTE A LOS OTROS MODELOS

La metodología DDMRP destaca por su capacidad para adaptarse a la variabilidad de la demanda y a las fluctuaciones en la cadena de suministro, ofreciendo una gestión más flexible y eficaz [32].

4.5.1. Reducción de la Variabilidad. Mediante puntos de desacoplamiento estratégicos y buffers dinámicos, el modelo estabiliza el flujo de materiales y permite una rápida adaptación a los cambios en la demanda, reduciendo la variabilidad e incrementando la disponibilidad [33].

4.5.2. Mejora en la Visibilidad y Control. DDMRP facilita la supervisión del inventario mediante la actualización continua de la PFN y un sistema visual basado en ZR, ZA y ZV [34].

- Buffers dinámicos: segmentan el inventario y permiten un monitoreo visual sencillo en tiempo real.
- PFN: integra inventario disponible, en tránsito, demanda pendiente y picos de demanda, ofreciendo una visión precisa del estado real de la planeación del abastecimiento.
- Revisión dinámica: ajusta automáticamente los buffers según la demanda histórica o en firme, permitiendo respuestas ágiles.
- Alertas proactivas: se generan cuando el inventario cae por debajo de umbrales definidos, anticipando posibles interrupciones.

4.5.3. Flexibilidad y Adaptabilidad. El modelo ajusta automáticamente el ADU según la demanda real y las condiciones de suministro, mejorando la capacidad de respuesta ante cambios en el mercado [35].

4.5.4. Reducción de costos y mejora en el servicio al cliente. DDMRP ha mostrado impactos positivos como una reducción del 31% en inventarios y una mejora del 13% en el cumplimiento de pedidos [36]. En la industria automotriz, se han reportado reducciones del 25% en costos de almacenamiento y del 22% en tiempos de ciclo [37].

4.6. METODOLOGÍA DDMRP Y SUS CÁLCULOS

El DDMRP es un modelo de gestión de inventarios basado en la demanda real diseñado por el DDI. Combina elementos de MRP, Lean, Six Sigma y TOC. El DDMRP busca mejorar la visibilidad, flexibilidad y control en la cadena de suministro.

La metodología DDMRP se basa en cinco componentes fundamentales [38]:

- Posicionamiento estratégico del inventario: establece puntos de desacoplamiento para estabilizar el flujo de materiales.
- Perfiles y niveles de buffer: define y ajusta los buffers según la demanda real.
- Ajustes dinámicos: adaptan la planificación a condiciones cambiantes.
- Planeación basada en demanda: genera órdenes de reabastecimiento según el flujo de materiales.
- Ejecución visible y colaborativa: permite actuar rápidamente ante cambios en la demanda.

Este modelo se basa en varios componentes esenciales [39]:

- Puntos de desacoplamiento: separan etapas clave del proceso mediante buffers para reducir la dependencia entre ellas. La ubicación de los buffers basada en la variabilidad de la demanda, tiempos de entrega y riesgos de interrupción, estabiliza el flujo de materiales y mejora la flexibilidad.
- Buffers dinámicos: se ajustan automáticamente según la demanda histórica y/o en firme, a medida que esta varía, los tamaños de la ZR, ZA y ZV se recalculan para absorber fluctuaciones y asegurar la disponibilidad de materiales.
- Planificación basada en la demanda: cuando la demanda varía los buffers se recalculan automáticamente considerando el ADU y el LT, ajustando la ZR, ZA y ZV.

4.6.1. Diseño de la metodología DDMRP. La definición de los buffers es fundamental en esta metodología, por eso se inicia con el cálculo de cada una sus zonas.

ZR: es la medida de protección incluida dentro del buffer. A medida que aumenta la variabilidad asociada con el artículo, también se incrementa el tamaño de la zona roja para proporcionar un mayor nivel de seguridad [1]. Se calcula con (4).

$$ZR = ZR\ base + ZR\ seguridad \quad (4)$$

$$ZR\ base = LT\ x\ ADU\ x\ \%LT \quad (5)$$

$$ZR\ seguridad = ZR\ base\ x\ \%Variabilidad \quad (6)$$

Donde:

- ZR base: parte de la zona roja que se calcula con dependencia del LT.
- ZR seguridad: es la porción de la zona roja que se calcula con el factor de variabilidad.
- LT es el tiempo total requerido para obtener un artículo comprado, desde la emisión del pedido hasta que está disponible en el almacén [40].
- ADU: es la cantidad promedio que se consume o utiliza por día.

- %LT o factor del LT: es un factor de ajuste que varía en función del LT, entre mayor es el LT menor es el factor. El DDI sugiere los sugiere los rangos de la tabla 1.

Tabla 1. Rangos del %LT

Categoría de LT	%LT
Largo (L)	20% - 40%
Medio (M)	41% - 60%
Corto (S)	61% - 100%

Fuente: con base en [1].

- %Variabilidad o factor de variabilidad: es un factor de ajuste que se utiliza para calcular el nivel de seguridad esperado en el inventario, el cual puede definirse a partir del coeficiente de variación del consumo por referencia o de la confiabilidad en las entregas del proveedor. El DDI sugiere los rangos de la tabla 2.

Tabla 2. Rangos %Variación

Categoría de variabilidad	% variabilidad
Variabilidad alta (H)	61% - 100%
Variabilidad media (M)	41% - 60%
Variabilidad baja (L)	0% - 40%

Fuente: con base en [1].

Zona Amarilla (ZA): establece la cobertura del abastecimiento en el buffer y contiene el punto donde se activa la reposición [1], su tamaño se estable con (7).

$$ZA = LT\ x\ ADU \quad (7)$$

Zona Verde (ZV): define la frecuencia promedio de los pedidos y su tamaño; se determina con base en tres criterios, el de mayor valor establece su magnitud [1]. Su cálculo se expresa en (8).

$$ZV = \max\ (\ LT\ x\ ADU\ x\ \%LT, MOQ, Frecuencia\ de\ compra\ x\ ADU) \quad (8)$$

Donde:

- MOQ: mínima cantidad que se pide o produce.

- Frecuencia de compra: número mínimo de días entre cada generación de pedido de abastecimiento.

Las ecuaciones del cálculo para cada una de las zonas se representan en la figura 2.

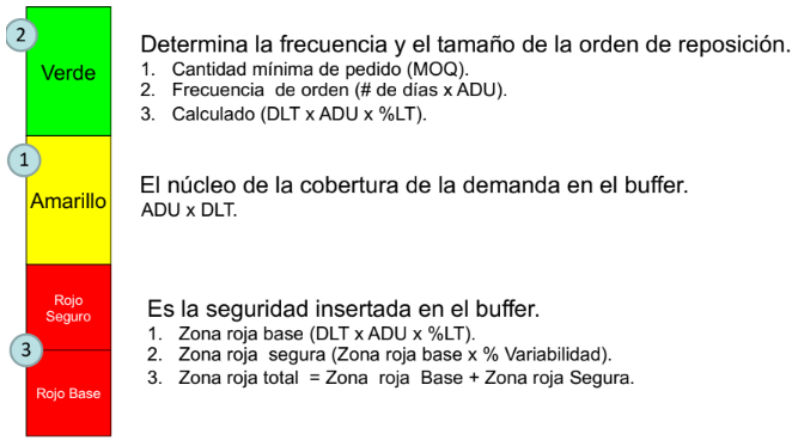


Fig 2. Resumen cálculos de los Buffers del DDMRP [1]

PFN: proporciona una visión precisa de los niveles de inventario y cuánto reabastecer, según las políticas de inventario definidas a través de los buffers. La PFN considera el inventario físico, el inventario en tránsito y la demanda calificada [1] y se calcula con (9).

$$PFN = Inventario\ fisico + Inventario\ en\ transito - Demanda\ calificada \quad (9)$$

Donde:

- Inventario físico: es el inventario en almacén.
- Inventario en tránsito: es la cantidad de inventario que se ha solicitado, pero no ha llegado.
- Demanda calificada: es la suma de los requerimientos vencidos, los que se deben entregar hoy y los futuros picos calificados. Los picos se originan del valor diario de demanda conocida y se denominan calificados cuando la demanda en un día supera un umbral, el cual para las implementaciones iniciales del DDMRP se sugiere sea un 50% de la zona roja, en un horizonte igual a un LT o hasta donde se tenga demanda conocida [1].

Pedido de reabastecimiento del inventario: el pedido se activa cuando la PFN está por debajo de la sumatoria de la ZR y ZA también identificado como TDA. Se calcula con (10).

$$Pedido\ de\ reposición = Max\{ ZR + ZA + ZV - PFN; 0\} \quad (10)$$

El pedido de reposición es cero si el PFN es mayor el TDA. En caso de que la PFN sea superior a la suma de las tres zonas, denominado TDV, significa que la PFN está en exceso.

Buffer de ejecución: ofrece una forma rápida e intuitiva de alinear los esfuerzos para proteger el inventario. Las alertas de ejecución del buffer no usan la posición de flujo neto, utilizan los valores del inventario físico. Esto separa las actividades dedicadas a la generación de órdenes de suministro de las actividades dedicadas a la ejecución del abastecimiento [1].

El buffer de ejecución está representado por tres colores: rojo, amarillo y verde, cada uno de los cuales indica un estado específico:

- Rojo: representa una condición crítica cuando el inventario físico es menor o igual al 50% de la ZR.
- Amarillo: indica una situación de alerta cuando el inventario físico es superior al 50% de la ZR y menor o igual al 100% de su valor.
- Verde: indica que no hay novedades y se presenta cuando el inventario físico supera el valor de la ZR.

Alertas del buffer de ejecución: la metodología DDMRP contempla cuatro componentes clave para el seguimiento de las órdenes de suministro. Estos permiten una ejecución visible y colaborativa a lo largo del modelo operacional:

- Alerta del inventario físico actual: se basa en el buffer de ejecución y genera una alerta cuando el inventario cae en la zona roja o presenta valores negativos.
- Alerta del inventario físico proyectado: se basa en los buffers de ejecución y proyecta el estado del inventario en un horizonte de tiempo específico, utilizando la demanda en firme o el ADU.
- Alertas de sincronización de materiales: en los procesos que incluyen una BOM con múltiples buffers se puede presentar alguna novedad en el suministro de un componente intermedio con o sin buffer, el sistema genera una alerta indicando problemas para cumplir con la demanda del ítem padre.
- Alertas de lead time: para los ítems PTO se genera una alerta en el último tercio de su tiempo de llegada, llamado horizonte de alerta. Este se divide en tres partes iguales con los colores verde, amarillo y rojo. Funciona como una cuenta regresiva hasta la fecha esperada de entrega. Estas alertas permiten monitorear referencias críticas que no

mantienen inventario, anticipar problemas de sincronización y evitar interrupciones en el suministro. [1].

Buffer de análisis: con el buffer de análisis se identifican diferentes estados del inventario que generan una visual histórica para monitorear el desempeño del modelo y obtener los elementos requeridos para una mejora continua. Las zonas del buffer de análisis se construyen de la siguiente forma:

- ZR baja: es la mitad inferior de la ZR.
- ZA baja: es la mitad superior de la ZR.
- ZV: tiene el mismo tamaño de la ZV.
- ZA alta: es la diferencia entre la ZA y la ZV.
- ZR alta: tiene el mismo tamaño de la ZV.
- ZR oscuro (agotados): cuando el inventario es negativo.
- ZR oscuro (inventario excesivo): cuando el inventario sobrepasa la ZR alta.

Con este buffer se monitorea el desempeño del modelo DDMRP. En [1] se presentan métricas, conceptos y reportes clave para este propósito:

- Integridad de la señal: evalúa si las órdenes de suministro recomendadas por el modelo DDMRP se generan de forma oportuna y precisa, validando así el cumplimiento de sus recomendaciones.
- Integridad del punto de desacople: garantiza que los puntos de acople se mantengan y mejoren, monitoreando el comportamiento de los buffers en relación con los límites de control definidos.
- Velocidad del punto de desacople: mide la diferencia entre la frecuencia de pedido planeada y la frecuencia real. El índice de flujo es otra métrica utilizada para hacer seguimiento a la frecuencia de pedido en referencias con buffer [1].

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Este trabajo de grado es un caso empresarial con enfoque cuantitativo desarrollado en la empresa Busscar de Colombia S.A.S. El objetivo principal del proyecto es diseñar modelos de abastecimiento que incrementen la disponibilidad de los componentes y materias primas compradas para el proceso de ensamble de carrocerías en la empresa Busscar de Colombia S.A.S. y reduzcan la inversión en el capital de trabajo. Estos modelos estarán basados en los atributos específicos que caracterizan cada ítem, tales como la variabilidad en la demanda, los tiempos de entrega y la importancia del componente dentro del proceso productivo

5.1. RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos necesarios para la ejecución del proyecto se obtendrán de diversas fuentes internas, incluyendo:

- Un software de planificación de recursos empresariales (ERP), Siesa[41], que proveerá datos históricos sobre la demanda, niveles de inventario, tiempos de entrega, y órdenes de compra.
- Software de Planeación de Materiales [42]: herramienta que proporcionará información detallada sobre el MRP, permitiendo un análisis preciso de los requerimientos de abastecimiento actuales.

5.2. ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto se enfoca en los componentes y materias primas compradas que se utilizan en el proceso de ensamble de los modelos de carrocerías vigentes. Estos insumos son fundamentales para garantizar la continuidad y eficiencia de la producción.

5.3. PASOS METODOLÓGICOS

Los pasos metodológicos que se seguirán en la elaboración del proyecto son:

- Revisión de bibliografía y estado del arte: se realizará una revisión de la literatura existente y del estado del arte relacionado con los modelos de abastecimiento y la gestión de inventarios, especialmente en el contexto de la industria automotriz.

- Recolección de la información: se recolectará información relevante desde el ERP para caracterizar la demanda y realizar la segmentación de inventarios.
- Descripción de los modelos de abastecimiento actuales: explicación de cómo se gestiona actualmente el abastecimiento de los componentes comprados.
- Conversión de datos en información relevante: los datos recolectados se transformarán en información útil y procesable, identificando patrones, tendencias y áreas de mejora.
- Análisis de los modelos de abastecimiento aplicables: se evaluarán los diferentes modelos de abastecimiento que podrían ser aplicables a las necesidades de Busscar de Colombia S.A.S., considerando las características de la demanda, la variabilidad en los tiempos de entrega, las capacidades del sistema y conocimiento de los planeadores.
- Selección de los modelos de abastecimiento: con base en el análisis anterior, se seleccionarán los modelos de abastecimiento que mejor se adapten a las condiciones y objetivos de la empresa.
- Diseño de modelos de abastecimiento: se diseñarán modelos de abastecimiento específicos adaptados a las necesidades de Busscar de Colombia S.A.S. Estos modelos estarán acompañados de recomendaciones para su implementación y seguimiento, con el fin de asegurar un suministro eficiente y alineado con los requerimientos productivos de la empresa.
- Estimación de las mejoras en el nivel de servicio y en el capital de trabajo mediante una réplica en hojas de cálculo del comportamiento del modelo sobre una muestra.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. IDENTIFICACIÓN DE REFERENCIAS COMUNES POR CARROCERÍA

Desde el ERP cada EP se exporta en un archivo de texto y la información se organiza en una hoja de cálculo aplicando los siguientes pasos:

- Eliminar las referencias manufacturadas, conservando únicamente los ítems comprados.
- Mantener los campos número de EP, ítem, descripción, unidad de inventario y cantidad requerida.
- Consolidar la información mediante una tabla dinámica, agrupando las líneas repetidas de un mismo ítem por EP en una sola fila. Esto permite obtener por cada EP una tabla simplificada con los datos necesarios.

A continuación se segmentan todas las EP según el tipo de carrocería, dado que cada modelo presenta características particulares. Esta clasificación facilita la identificación de elementos comunes que pueden conformar una EP base, entendida como una estructura sin variaciones por personalización del cliente. Los modelos de carrocería considerados son:

- Optimuss
- Urbanuss Pluss
- Urbanuss Pluss S5
- Urbanuss Turibus
- Busstar 360 S2
- Busstar 380 S2
- Busstar DD S2

Solo se consideran las tipologías de carrocería activas a la fecha de este proyecto según el MPS. En consecuencia el análisis se centra en los siguientes modelos: Busstar 380 S2, Busstar DD S2, Urbanuss Turibuss y Urbanuss Pluss S5. En la tabla 3 se muestra la distribución de las EP por modelo de carrocería.

En la línea Urbanuss las EP se libera con suficiente anticipación, permitiendo abastecer oportunamente los materiales comprados y evitando interrupciones en la producción. Por esta razón no sé incluirá dentro

del alcance del proyecto. En cambio, en la línea Busstar los listados de materiales no están disponibles con la antelación requerida, lo que compromete el cumplimiento del plan de producción. Por ello, el ejercicio se enfocará en las carrocerías Busstar 380 S2 y Busstar DD S2. Se agrupan un total de 27 EP correspondientes a estas líneas: nueve para el Busstar 380 S2 y dieciocho para el Busstar DD S2.

Tabla 3. Cantidad EP por carrocería

Tipo de carrocería	Cuenta de EP
Busstar 380 S2	9
Busstar DD S2	18
Urbanuss Pluss S5	15
Urbanuss Turibuss	2
Total general	**44**

La EP corresponde al listado detallado de materiales requeridos para fabricar una carrocería específica. Cada carrocería cuenta con una EP propia, compuesta por los ítems necesarios para su ensamble, los cuales pueden variar según el modelo y la personalización del cliente.

La agrupación de los listados de materiales por tipo de carrocería permite identificar los ítems que se repiten entre las distintas EP, los cuales se denominan ítems comunes. Para determinar su grado de recurrencia, se utiliza el porcentaje de coincidencia, que indica en cuántas EP de una misma carrocería aparece un mismo ítem. Esta métrica es fundamental para definir qué componentes pueden ser planificados de forma anticipada, sin depender de la liberación individual de cada EP.

En la tabla 4 se presenta un resumen con la coincidencia de ítems entre las EP, diferenciando aquellos que aparecen en el 100% de las estructuras de aquellos se repiten en menor porcentaje. La información completa se encuentra en los anexos A y B.

Tabla 4. Muestra de coincidencias de ítems en las EP por carrocería

BUSSTAR 380 S2	**% coincidencia entre EP**	**100%**	**89%**	**78%**	**67%**	**56%**	**44%**	**33%**
	EP coincidencia / Cantidad EP Total	9/9	8/9	7/9	6/9	5/9	4/9	3/9
	Cantidad Ítems	613	95	13	105	25	29	100
BUSSTAR DD S2	**% coincidencia entre EP**	**100%**	**94%**	**89%**	**83%**	**78%**	**72%**	**67%**
	EP coincidencia / Cantidad EP Total	18/18	17/18	16/18	15/18	14/18	13/18	12/18
	Cantidad Ítems	680	17	56	37	11	17	20

En la tabla 4 se observa que 613 ítems coinciden en el 100% de las EP del Busstar 380 S2 y 680 ítems en el Busstar DD S2. En la tabla 5 se presenta la participación de estos ítems en el total de componentes de cada carrocería.

Tabla 5. Porcentaje de participación de los ítems que coinciden al 100% por carrocería

	Busstar 380 S2	**Busstar DD S2**
% de participación por carrocería	70%	67%
Cantidad Ítems	613	680

Con el propósito de mejorar la disponibilidad de materiales la empresa definió que los ítems comunes deben cubrir al menos el 75% de los componentes de cada carrocería. Sin embargo, los ítems identificados con coincidencia del 100% no alcanzan esta cobertura.

Para cumplir con esta política fue necesario ampliar la cantidad de ítems comunes incluyendo aquellos que aunque no están presentes en todas las EP, tienen un alto porcentaje de coincidencia. Las tablas 6 y 7 presentan los resultados.

Tabla 6. Ítems que logran cubrir el 75% de los componentes en la carrocería Busstar 380 S2

			Total
% coincidencia entre EP	100%	89%	
EP coincidencia / Cantidad EP Total	9/9	8/9	
% acumulado promedio ítems por EP	70%	80%	
Cantidad Ítems	613	95	708

Tabla 7. Ítems que logran cubrir el 75% de los componentes en la carrocería Busstar DD S2

					Total
% coincidencia entre EP	100%	94%	89%	83%	
EP coincidencia / Cantidad EP Total	18/18	17/18	16/18	15/18	
% acumulado promedio ítems por EP	67%	69%	73%	77%	
Cantidad Ítems	680	17	56	37	790

En el caso del Busstar 380 S2 se consideraron aquellos con al menos un 89% de coincidencia entre EP, mientras que para el Busstar DD S2 la coincidencia se redujo hasta un 77%. La tabla 8 presenta el resumen en cantidad de ítems.

Tabla 8. Ítems por coincidencia entre EP que logran la meta de cobertura por carrocería

Carrocería	Cantidad de ítems comunes	% cubrimiento total ítems por carrocería
Busstar 380 S2	708	80%
Busstar DD S2	790	77%

Hasta este punto la recolección de datos se ha realizado por tipo de carrocería buscando alcanzar el 75% de cobertura de materiales por modelo; no obstante para los siguientes pasos del proyecto es necesario unificar la información. En la tabla 9 se identifican los componentes compartidos entre ambas carrocerías.

Tabla 9. Ítems comunes compartidos entre las carrocerías

Carrocería	Cantidad Ítems	Ítems compartidos
BUSSTAR 380 S2	708	462
BUSSTAR DD S2	790	462

A partir de la información de la tabla 9, se evidencia que ambas carrocerías comparten 462 ítems comunes. Para calcular la cantidad de ítems sobre los que se va a desarrollar el caso de estudio, se procede con (11).

$$Cantidad\ Items\ comunes = Items\ Busstar\ DD\ S2 + Items\ Busstar\ DD\ 380\ S2 - Items\ compartidos$$

$$Cantidad\ Items\ comunes = 708 + 790 - 462 = 1036 \quad (11)$$

Se identificó que entre las dos carrocerías existen 1036 ítems comunes.

6.2. MATRIZ DE INTERMITENCIA Y VARIABILIDAD EN EL CONSUMO

El primer paso consiste en definir el rango de tiempo para obtener los datos de consumo desde el ERP. Se establece un horizonte de seis meses, iniciado en enero de 2024, cuando se fabrica la primera carrocería de la línea Busstar con la versión S2. Este criterio garantiza que exista historial de consumo para los ítems comunes seleccionados.

Seguidamente se descarga del ERP el histórico de consumo de los componentes durante los últimos seis meses. Los datos se depuran excluyendo las salidas por ajustes de inventario y traslados entre bodegas y

se consideran únicamente las bodegas que están directamente vinculadas al proceso productivo. Con esta información se analiza el comportamiento de consumo de cada ítem.

Basándose en la frecuencia y las cantidades consumidas se construye una matriz de intermitencia y variabilidad para segmentar los materiales. La matriz se construye de la siguiente forma:

- La intermitencia o ADI: inicialmente se considera (1); sin embargo, para simplificar los cálculos se opta por utilizar (12) la cual ha sido aplicada en [43]. En (13) se expresa como se calcula el ADI para este trabajo.

$$ADI = \frac{Cantidad\ días\ muestra\ de\ datos}{Cantidad\ días\ donde\ el\ consumo\ es\ mayor\ a\ cero} \quad (12)$$

- La variabilidad o CV^2: en (13) se describe el cálculo presentado en (2) en función de los consumos.

$$CV^2 = \left(\frac{Desviacion\ estandar\ consumo\ de\ los\ días\ diferentes\ a\ cero}{Promedio\ cantidad\ consumida\ de\ los\ días\ diferentes\ a\ cero}\right)^2 \quad (13)$$

En [16] y [44] se propone una clasificación de los componentes con base en los parámetros ADI y CV^2, los cuales permiten caracterizar la demanda según su frecuencia e irregularidad. En la literatura se sugieren umbrales como ADI = 1,32 y CV^2 = 0,49, y estos valores surgieron de una agregación mensualmente. En este proyecto, sin embargo, se trabaja con información de consumo diario, por lo que se requiere una adaptación del enfoque original.

Dado que los consumos no ocurren todos los días para cada referencia, debido a la naturaleza del proceso productivo, se propone ajustar el umbral del ADI con base en el LT de cada ítem. Este enfoque permite relacionar la intermitencia del consumo con la frecuencia esperada de reposición. En consecuencia si el ADI de un ítem es mayor a 1,5 veces su LT, se clasifica como intermitente o irregular; si es menor o igual se ubica como suave o errático. Con relación al CV^2 el cálculo se realizó a partir de la variación diaria excluyendo los días en los que no hubo consumo, con el propósito de reflejar la naturaleza de la operación. La figura 3 y la tabla 10 presentan esta clasificación adaptada, propuesta específicamente para el entorno industrial de este proyecto, manteniendo la lógica conceptual del método referenciado.

Tabla 10. Categorización de patrones de demanda

Patrón	ADI	CV^2	Descripción
Errático	≤ 1,5 LT	> 0,49	Consumo con elevada variabilidad y baja intermitencia.
Irregular	> 1,5 LT	> 0,49	Variabilidad del consumo e intermitencia altas.
Suave	≤ 1,5 LT	≤ 0,49	Variabilidad del consumo e intermitencia bajas.
Intermitente	> 1,5 LT	≤ 0,49	Alta intermitencia y baja variabilidad.

Fuente: con base en [45].

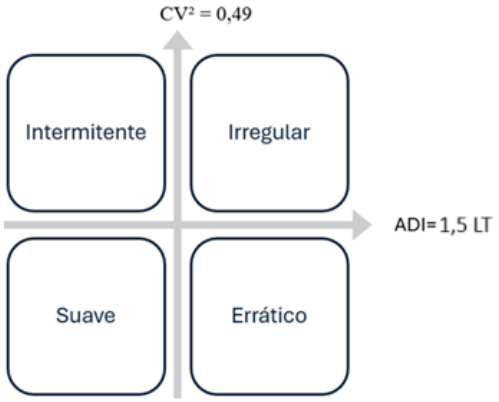


Fig 3.Valores de corte para los patrones de demanda ADI= 1.5 LT y CV^2 = 0.49 [45].

El resultado de la segmentación de los 1036 ítems se presenta en la figura 4 y en el anexo C.

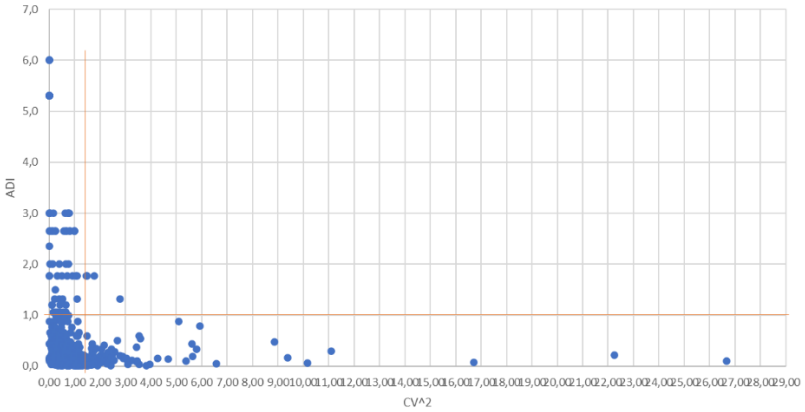


Fig 4. Matriz de intermitencia VS variabilidad en el consumo.

Los elementos ubicados en los cuadrantes suave y errático representan el 93% del total de ítems y pueden gestionarse con un modelo de reabastecimiento PTS, dado su consumo más regular. Por su parte, los ítems clasificados como irregulares o intermitentes se gestionarán mediante un modelo PTO o PTS, según el LT tal como se definió en el capítulo 4.3.

6.3. MODELOS DE ABASTECIMIENTO ACTUALMENTE UTILIZADOS

Actualmente el abastecimiento de materiales se gestiona mediante diferentes modelos que han sido implementados con base en la experiencia de los involucrados en el proceso, tomando como referencia las características comunes de los materiales. Los modelos utilizados son los siguientes:

- Restricción de espacio: se realiza un monitoreo del inventario físico cada 3 días para activar nuevos pedidos cuando sea necesario. El modelo de abastecimiento implementado para estos ítems es el MRP.
- Reposición de stock: se utiliza un modelo de reposición de inventarios con un período de revisión de 7 días. El stock es definido por el cliente interno y ajustado según el comportamiento de la demanda. Este grupo incluye la dotación y algunos elementos necesarios para la producción.
- Consumibles: son elementos utilizados en el proceso de fabricación de la carrocería que no se instalan en los vehículos, como lijas, brocas, entre otros. Para su gestión, se emplea el modelo DDMRP.
- Elementos de Protección Personal (EPP): el reabastecimiento de los elementos de protección personal se gestiona mediante dos modelos de abastecimiento: VMI y DDMRP. En el caso del VMI el proveedor es responsable de gestionar y mantener los niveles de inventario necesarios en la planta de producción principal, asegurando un suministro continuo y minimizando la intervención interna. Por otro lado, el DDMRP se implementa en las bodegas y plantas periféricas donde el inventario se gestiona de manera más dinámica y ajustada a la demanda histórica real de cada ubicación, mediante el uso de buffers que se actualizan en función del consumo y los tiempos de entrega.
- Químicos: los químicos utilizados en el proceso productivo se gestionan bajo el modelo DDMRP. Este enfoque permite ajustar los niveles de inventario de manera dinámica, basándose en la demanda real histórica producción. Gracias al uso de buffers en puntos estratégicos se asegura que los químicos estén disponibles en el momento adecuado, evitando excesos de inventario y reduciendo el riesgo de interrupciones en el suministro.
- Bodega partes metálicas: esta bodega almacena las láminas y tuberías metálicas estructurales utilizadas en la fabricación de las carrocerías. Se mantienen niveles de stock suficientes para cubrir 3 semanas de producción para asegurar la continuidad del proceso. Los pedidos de reabastecimiento se gestionan mediante el modelo DDMRP.
- Vidrios: los vidrios utilizados en las carrocerías requieren un almacenamiento y manipulación especial debido a sus características físicas y gran parte de las referencias son específicas por EP. El

aprovisionamiento de estos ítems se realiza mediante el modelo MRP coordinando varias entregas semanales con el proveedor. Esta estrategia permite minimizar el tiempo de almacenamiento y reducir el riesgo de daños, asegurando que el material esté disponible cuando se necesite sin generar sobrecostos y excesos de inventario.

- Baños: estos componentes debido a su alto valor y gran volumen de almacenamiento requieren una gestión cuidadosa; además cada EP suele tener una referencia particular para los baños. Su aprovisionamiento se gestiona mediante el modelo MRP garantizando que se realicen pedidos a tiempo para cumplir con las especificaciones de cada carrocería, mejorando el uso del espacio de almacenamiento.
- Aires Acondicionados: elementos de alto valor y gran volumen de almacenamiento. Estos componentes tienen un LT extenso y requieren una gestión rigurosa. El abastecimiento se realiza mediante el modelo MRP ajustado según el plan de ventas para garantizar que los materiales estén disponibles en el momento adecuado sin generar excesos en el inventario, mejorando los costos como el uso del espacio de almacenamiento.
- Elementos de sujeción: estos componentes incluyen tornillería, tuercas, arandelas, remaches y pernos, se gestionan mediante el modelo VMI.
- Otros componentes: para los elementos restantes se utiliza el modelo MRP como método de aprovisionamiento. Estos componentes se identificarán como PTO para diferenciarlos de los otros componentes abastecidos también por MRP, facilitando su análisis.

Tabla 11. Ítems comunes con su modelo de abastecimiento

Modelo abastecimiento	Cantidad Ítems
DDMRP	133
MRP	46
PTO	754
VMI	103
Total	**1036**

En la tabla 11 se presenta la distribución de los ítems comunes por su modelo de abastecimiento actual. Los ítems gestionados bajo los modelos MRP, DDMRP o VMI, continuarán operando bajo estos esquemas, dado que sus condiciones de abastecimiento son adecuadas para las necesidades actuales de la cadena de suministro.

El proyecto se centrará en los 754 componentes clasificados a la fecha de este proyecto como PTO, para evaluar su migración a un modelo de abastecimiento PTS. Esta definición busca garantizar la disponibilidad de materiales.

6.4. ÍTEMS COMUNES QUE SE VAN A REABASTECER POR UN MODELO PTS

Es necesario definir la política de abastecimiento del inventario según el comportamiento del consumo para los 754 ítems mencionados arriba. Para ello, a cada ítem se le asigna una categoría según la matriz de intermitencia y variabilidad del capítulo 6.2, obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 12. Ítems comunes PTO segmentados por intermitencia y variabilidad del consumo

Modelo abastecimiento	**Clasificación matriz de intermitencia y variabilidad**				**Total**
	Errático	**Intermitente**	**Irregular**	**Suave**	
PTO	378	5	5	366	754

Los elementos que se encuentran en los cuadrantes suave y errático se van a gestionar bajo el modelo de abastecimiento PTS; los ítems en los cuadrantes irregular e intermitente se van a abastecer bajo el modelo PTO porque son de origen nacional y con LT corto, tal como se definió en la sesión 4.3.

Tabla 13. Cantidad de ítems que migran a PTS

Aplica para PTS	**Cantidad Ítems**
NO	10
SI	744
Total	**754**

Se concluye con la tabla 13 que 744 ítems pueden cambiar a un modelo de abastecimiento PTS. Los 10 ítems restantes se abastecerán a través de un modelo PTO.

6.5. SELECCIÓN DE MODELO DE REABASTECIMIENTO

La selección del modelo de reabastecimiento adecuado es un paso clave para garantizar la disponibilidad de los materiales en la producción de las carrocerías en Busscar de Colombia SAS. Estos fueron evaluados en función de su capacidad para responder a las necesidades específicas de la empresa y las características de su cadena de suministro.

El MRP se consideró por su enfoque basado en el MPS y la planificación detallada de los materiales. En este sistema la liberación de la EP por parte del área técnica desencadena el proceso de abastecimiento, generando retrasos en el cumplimiento del MPS por los largos tiempos de entrega requeridos para obtener los materiales necesarios.

El modelo JIT se implementó con el proveedor de arneses eléctricos aprovechando su proximidad a menos de 2 horas para las entregas y la alta criticidad de este elemento para la planta de producción; sin embargo, no fue posible sostener esta metodología a largo plazo debido a los siguientes motivos:

- Los arneses eléctricos están sujetos a actualizaciones constantes en sus diseños, implicando ajustes frecuentes en los medios de fabricación, afectando su tiempo de entrega.
- Estos componentes se fabrican bajo pedido, con diseños personalizados y específicos para cada proyecto, lo cual genera la aparición frecuente de nuevas referencias que requieren desarrollo y los tiempos de entrega son más largos que para los productos estándar.
- Las variaciones en la demanda, sumadas a los factores anteriores, dificultaban la entrega oportuna de la mercancía, afectando la eficiencia del modelo JIT.

Estos motivos no permiten una adecuada implementación del modelo JIT para los ítems comunes.

Por definición de la empresa el modelo VMI se implementa cuando un grupo de materiales tienen las siguientes características:

- El volumen de referencias y cantidad de unidades es alto y el valor del inventario es bajo, como lo son los elementos de sujeción y los EPP.
- Se requiere un conocimiento técnico alto y puede ser suministrado por un único proveedor, como lo es la pintura de los buses.

Considerando esas dos características, los elementos identificados como comunes no cumplen dichos requerimientos, se descarta el modelo VMI.

Seguidamente se consideró el modelo DDMRP implementado en Busscar de Colombia SAS para los elementos clasificados como consumibles. Estos componentes son gestionados a través de una plataforma propia de Busscar de Colombia SAS, donde se puede visualizar si el material fue entregado al solicitante o está pendiente. Adicionalmente se pueden identificar las causas del pendiente.

Se compara en la tabla 14 la información antes de la implementación y tres meses después de la implementación con el DDMRP.

Tabla 14. Resultado implementación DDMRP en los consumibles

Novedad	Antes	Tres meses después
Faltantes por planeación	21%	1%
Disponibilidad de materiales	64%	89%
Faltantes por compras	15%	10%

Donde:

- Faltantes por planeación: se presenta cuando la solicitud de abastecimiento por parte de planeación no se genera a tiempo.
- Disponibilidad de materiales: materiales que están disponibles en la bodega y muestran existencia en el ERP.
- Faltantes por compras: no se tiene inventario disponible en el almacén, pero los componentes tienen órdenes de compra con el LT vencido.

Los modelos de simulación y optimización representan una alternativa viable en el futuro, pero su implementación requiere un nivel de madurez avanzado en los procesos de planeación de abastecimiento, los cuales están en etapa de estructuración con este proyecto. Además, su diseño y aplicación demandan conocimientos técnicos especializados que actualmente no están disponibles en la empresa. Estas consideraciones indican que aún no es el momento para explorar estas alternativas.

Los modelos de máximos y mínimos, así como los de revisión periódica no fueron considerados en este proyecto dado que el enfoque actual se orienta al fortalecimiento de la metodología DDMRP, la cual ha evidenciado resultados positivos en otros grupos de materiales en Busscar de Colombia.

6.6. DISEÑO DEL MODELO DDMRP

El diseño del modelo DDMRP en Busscar de Colombia S.A.S. se enfocó en los componentes comprados que intervienen en el proceso de producción. La estructura del flujo de abastecimiento, mostrada en la figura 5, presenta como se gestionan los materiales desde los proveedores hasta su integración en la cadena de producción.

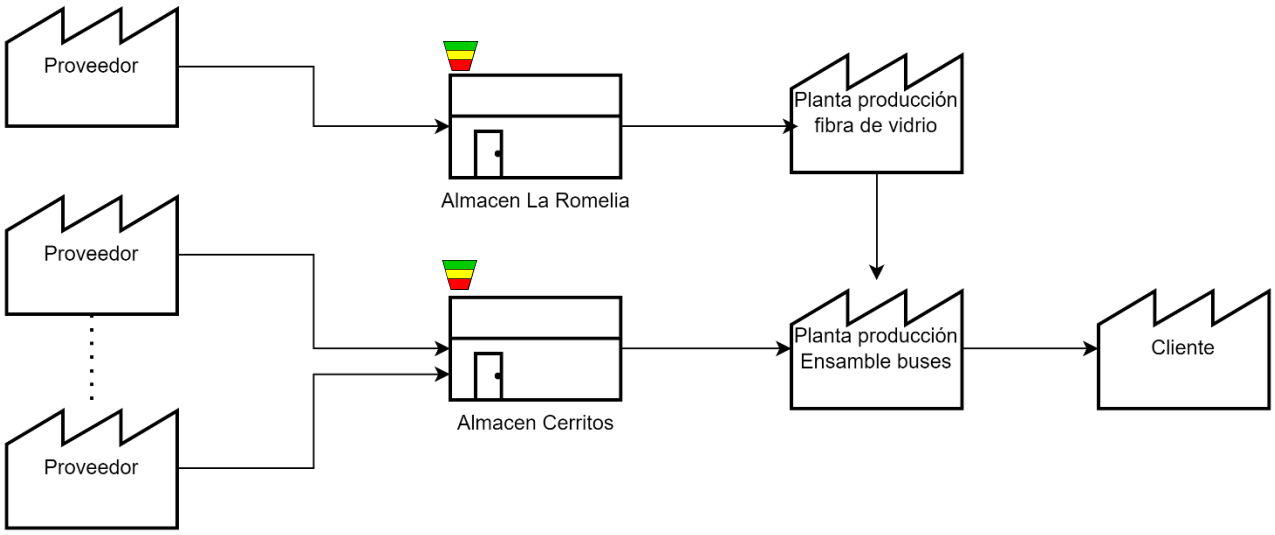


Fig 5. Estructura del flujo de materiales donde el trapecio invertido representa los inventarios.

Las bodegas de La Romelia y Cerritos reciben el material comprado requerido para el proceso productivo. Desde estas ubicaciones se abastecen tanto la planta de fibra de vidrio como la planta de ensamble de las carrocerías. Las piezas de fibra de vidrio se trasladan hacia el proceso de ensamble.

Es importante destacar que los almacenes funcionan como puntos estratégicos donde se implementan los buffers diseñados por el modelo DDMRP. Estos buffers permiten la creación de inventarios dinámicos, los cuales absorben la variabilidad en la demanda y aseguran la continuidad del suministro, alineándose con las necesidades operativas de cada planta.

6.6.1. Posicionamiento estratégico del inventario. En la sección 6.4 se identificaron los ítems comprados que se migrarán de un modelo PTO a uno PTS. Los cuales están ubicados en los procesos iniciales para el ensamble de la carrocería, puesto que se transforman o hacen parte de los montajes de todos los productos manufacturados.

En la lista de materiales de la figura 6 del ítem 234814 para las EP1737, EP1789 y EP1742, se observa que este componente se encuentra en los niveles inferiores, lo cual aplica para todos los componentes comprados. A partir de lo anterior, en la figura 7 se ubican los buffers de componentes comprados en los niveles inferiores de la BOM.

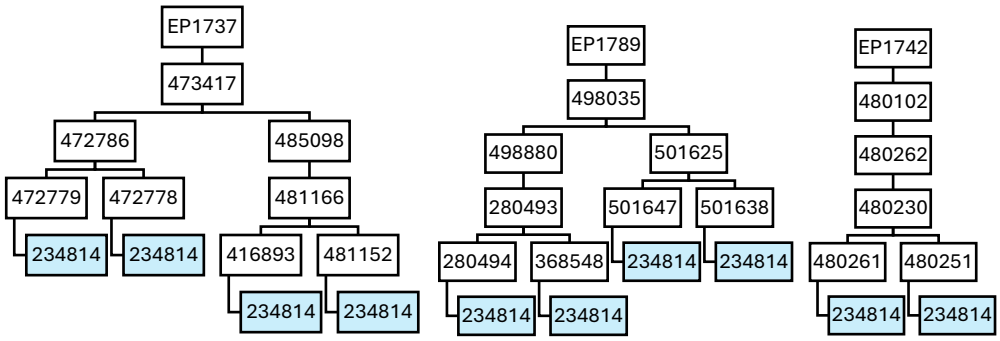


Fig 6. Ejemplo uso del ítem 234814 en las EP 1737, EP1789 y EP1742.

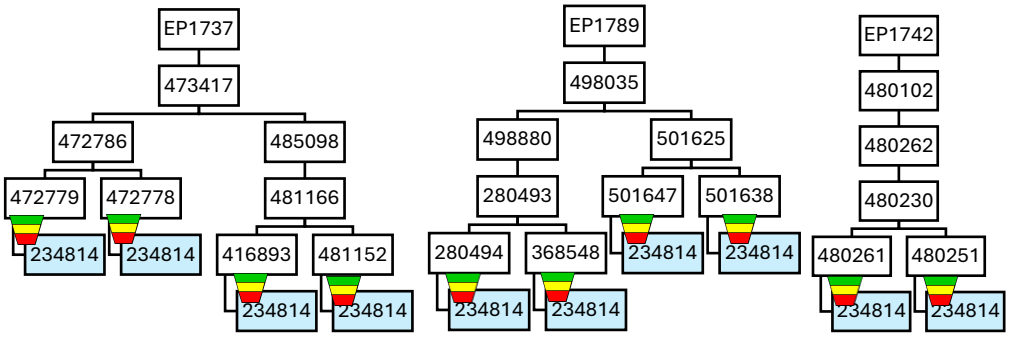


Fig 7. Posicionamiento de los buffers del ítem 234814 en las EP 1737, EP1789 y EP1742.

6.6.2. Buffer de planeación. Para el cálculo del tamaño de los buffers es necesario definir los perfiles de los ítems, los cuales corresponden a grupos de referencias con características similares. Estos perfiles permiten una gestión global práctica y efectiva de grandes volúmenes de referencias. Cada perfil se define a partir de un conjunto de atributos que se pueden aplicar de manera uniforme a todos los elementos del grupo.

El primer atributo es el origen del componente, es decir si es comprado, fabricado o distribuido. En este proyecto solo se gestionan ítems comprados, los cuales se identificarán con la letra 'P'. En caso que existieran piezas manufacturadas o distribuidas, se identificarían con las letras 'M' y 'D', respectivamente.

El segundo atributo se utiliza para definir el factor de lead time en función del LT, el cual se segmenta para este ejercicio en tres categorías: corto, medio y largo. Los ítems comunes y se agruparon por LT, como se representa en la figura 8.

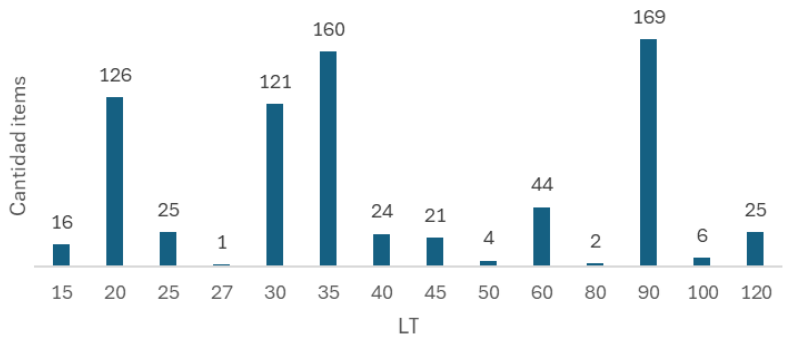


Fig 8. Tiempo de entrega referencias comunes

Según la metodología DDMRP la segmentación para el factor del LT depende del entorno específico de la empresa y del tipo de componente. Por lo tanto, se definen los siguientes criterios para su clasificación:

- Corto: todos los ítems cuyo LT sea menor o igual a 15 días.
- Medio: los componentes que tengan un LT entre 20 y 35 días. En este rango se encuentra el 58% de los ítems.
- Alto: el LT es superior a 35 días. Representan en su mayoría componentes importados y por los riesgos asociado a la logística internacional como catástrofes climáticas, disturbios en los diferentes países, escasez de contenedores y demás, se busca tener varios pedidos en tránsito para reducir el riesgo.

En la tabla 15 se presentan los factores del LT, para los cuales se utilizó la tabla 1 como referente.

Tabla 15. Categoría del LT y factor de LT

Categoría LT	Rango LT	% LT
Largo (L)	Mayor a 35 días	25%
Medio (M)	Mayor a 15 días y menor o igual a 35 días	50%
Corto (S)	Menor igual a 15 días	75%

La última característica para definir el perfil de cada ítem está relacionada con la variabilidad, utilizada para establecer el factor de variabilidad, el cual se determina en función del CV calculado en la Sección 6.2.

La segmentación se basa en [46], donde se establece que la variabilidad es baja si el CV es inferior a 0,75, media si está entre 0,75 y 1,33 y alta si es superior a 1,33. Aunque los autores

utilizan esta clasificación para tiempos de procesamiento en sistemas de producción, se considera válido aplicarla en este estudio, debido a que el comportamiento del consumo de componentes está directamente relacionado con el proceso de ensamble de las carrocerías.

En la Figura 9 se presenta el histograma con la distribución de los 744 ítems analizados.

Los valores del porcentaje de variabilidad de la tabla 16 se determinan por los sugeridos por el modelo DDMRP, presentados en la tabla 2.

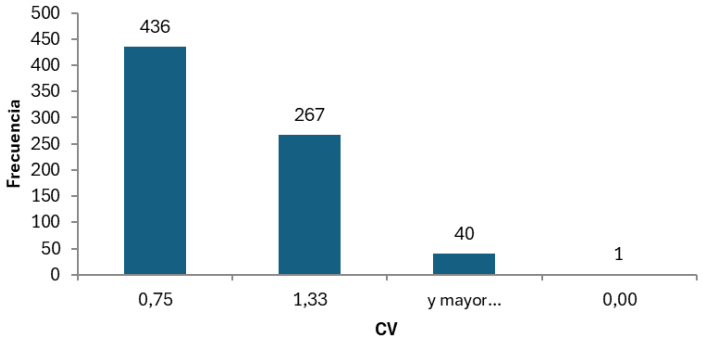


Fig 9. Histograma del CV en los 744 ítems comunes.

Tabla 16. Categoría de variabilidad y factor de variabilidad

Categoría de variabilidad	CV	% Variabilidad
Alta (H)	Mayor a 1,33	75%
Media (M)	Mayor a 0,75 y menor o igual a 1,33	50%
Baja (L)	Menor o igual a 0,75	25%

Una vez establecidas las tres características para los buffers de los ítems (tipo de artículo, categoría de LT y variabilidad), se procede a definir los perfiles de buffer en la tabla 17.

Tabla 17. Combinaciones básicas del perfil de buffer

		Tipo de articulo		
		Comprado		
Categoría de LT	Corto (S)	PSL	Baja (L)	Categoría de variabilidad
		PSM	Media (M)	
		PSH	Alta (H)	
	Medio (M)	PML	Baja (L)	
		PMM	Media (M)	
		PMH	Alta (H)	
	Largo (L)	PLL	Baja (L)	
		PLM	Media (M)	
		PLH	Alta (H)	

Fuente: con base en [1].

6.6.3. Cálculo del buffer de planeación. Utilizando las combinaciones presentadas en la tabla 17, se construye el perfil de buffer de todos los ítems. Para ilustrar se utilizará como ejemplo el ítem 234814.

- Tipo de componente comprado, se identifica como “P”.
- El LT es de 35 días, se clasifica como “M”.
- El CV es de 0,63, se categoriza como “L”.

Por lo tanto, el perfil completo del ítem 234814 es PML (Comprado, tiempo de entrega medio, baja variabilidad), como se presenta en la tabla 18.

El ADU se calcula utilizando el promedio de los consumos registrados en dos meses de información histórica. Este horizonte es establecido en consenso entre las áreas de producción, comercial y logística, permitiendo incluir la información de diferentes EP.

Tabla 18. Perfil completo ítem 234814

Ítem #234814	
ADU	31 unidades
Perfil de buffer	PML
MOQ	1 unidades
Frecuencia de orden	7 días
LT	35 días

El siguiente paso consiste en calcular el valor de cada zona de inventario. Referenciando la figura 2, se procede con los cálculos del modelo DDMRP para el ítem 234814.

- Cálculo zona Amarilla

$$ZA = LT\ x\ ADU = 35x31=1084 \text{ unidades} \quad (14)$$

- Cálculo zona verde

$$ZV = \max(\ LT\ x\ ADU\ x\ \%LT;\ MOQ;\ Frecuencia\ de\ compra\ x\ ADU) \quad (15)$$

$$ZV = \max(35x31x0{,}5; 1;\ 7x31) = \max(542; 1; 217) = 542 \text{ unidades}$$

- Cálculo zona roja

$$ZR\ base = LT\ x\ ADU\ x\ \%LT\ (16)$$

$$ZR\ base = 35x31x0{,}5 = 542\ unidades$$

$$ZR\ seguridad = ZR\ base\ x\ \%Variabilidad = 542x0{,}25 = 136 \text{ unidades}$$

$$ZR = ZR\ base + ZR\ seguridad = 542+240 = 677 \text{ unidades}$$

Con las tres zonas del buffer calculadas se construye el buffer completo de la figura 10:

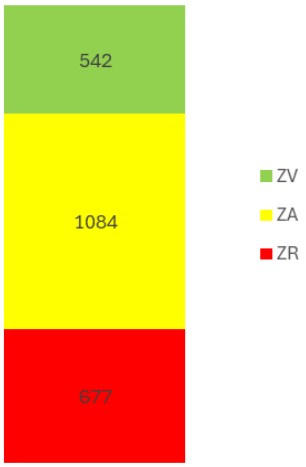


Fig 10. Zonas de buffer del ítem 234814.

6.6.4. Planeación basada en la demanda. Continuando con el ítem 234814 para presentar los cálculos detallados del cálculo de la PFN, se tienen los siguientes valores:

- Inventario físico: 2300 unidades.
- Inventario en tránsito: 216 unidades en orden de compra.
- Demanda calificada: 461 unidades (información obtenida del MRP, en un LT de demanda ningún día supera el 50% de la ZR, por esto solo se incluyen los consumos vencidos por 406 unidades y de hoy por 55 unidades)

Utilizando (9) se calcula el valor de la PFN para el ítem 234814

$$PFN = 2300 + 216 - 461 = 2055\ unidades\ (17)$$

El siguiente paso es identificar en que posición dentro del buffer se encuentra la PFN:

- Tope de Rojo (TDR) o ZR: 813 unidades, es inferior al PFN.
- TDA: 1761 unidades, es inferior al PFN.
- TDV: 2303 unidades, superior al PFN

En la figura 11 la PFN está entre el TDA y el TDV, es decir en la zona verde.

En este caso no se realiza pedido dado que la PFN es mayor al TDA.

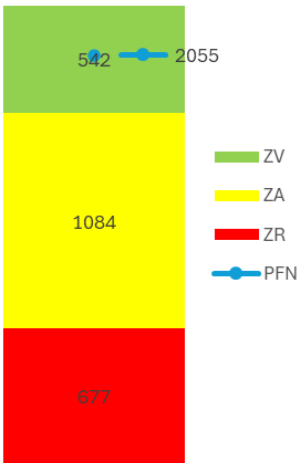


Fig 11. PFN en el buffer del ítem 234814.

6.6.5. Cálculo del buffer de ejecución. Las alertas de estado del buffer de ejecución no usan la posición de flujo neto, utilizan los valores del inventario físico.

En la tabla 19 se calculan los buffers de ejecución para diferentes ítems comunes; se evidencia que los ítems 6278, 234342 y 242301 el inventario físico está en alerta roja, mientras que los ítems 22342 y 468115 están en alerta amarilla. Por otra parte, en los ítems 293801, 427641 y 218927 el inventario físico se encuentra con cobertura en la zona verde.

Tabla 19. Ejemplo de alerta de inventario físico actual

		Buffer PFN		Buffer ejecución				
Ítem	**INV**	**ZR**	**ZV**	**Rojo**	**Amarillo**	**Verde**	**Zona buffer ejecución**	**% cobertura**
6278	1	48,07	32,05	24,03	48,07	112,16	Rojo	2%
234342	9	49,22	32,81	24,61	49,22	114,84	Rojo	18%
252301	4	8,63	10,00	4,31	8,63	36,24	Rojo	46%
22342	4	7,95	6,36	3,98	7,95	20,68	Amarillo	50%
468115	18	34,20	40,00	17,10	34,20	143,63	Amarillo	53%
293801	54	50,50	40,40	25,25	50,50	212,09	Verde	107%
427641	129	118,57	94,86	59,29	118,57	498,00	Verde	109%
218927	75	68,31	45,54	34,15	68,31	159,39	Verde	110%

La prioridad en la gestión de la ejecución se determina con base en el porcentaje de cobertura del inventario físico. La alerta del inventario físico actual indica que el ítem con mayor prioridad es el 6278 con una cobertura del 2%; le siguen los ítems 234342 y 2522301 con coberturas del 18%, y el 46% respectivamente.

Para el cálculo de la alerta del inventario físico proyectado se utiliza el ADU. En las tablas 20 y 21 se presentan los resultados de esta alerta, donde se evidencia que para el día 10 se proyecta un quiebre de inventario.

Tabla 20. Información día 1 ítem 211301 para el ejemplo de la alerta de inventario físico proyectado

ítem	Estado buffer ejecución	Inventario físico	Inventario transito	Demanda calificada	PFN	Fecha solicitada	TDR	TDA	TDV	ADU
211301	Amarillo - 76%	22	56	6	72	día 15	14,5	29	31	2,05

Tabla 21. Estado de la alerta del inventario proyectado físico por día del ítem 211301

	ADU	Suministro esperado	Inventario físico proyectado	Estado proyectado
día 2	2,05		16	Amarillo 55%
día 3	2,05		13,95	Rojo 48%
día 4	2,05		11,9	Rojo 41%
día 5	2,05		9,85	Rojo 34%
día 6	2,05		7,8	Rojo 27%
día 7	2,05		5,75	Rojo 20%
día 8	2,05		3,7	Rojo 13%
día 9	2,05		1,65	Rojo 6%
día 10	2,05	27	-0,4	Rojo -1%
día 11	2,05		24,55	Amarillo 85%
día 12	2,05		22,5	Amarillo 78%
día 13	2,05		20,45	Amarillo 71%
día 14	2,05		18,4	Amarillo 63%
día 15	2,05	29	16,35	Amarillo 56%

6.6.6. Cálculo del buffer de análisis. Con el buffer de análisis se evalúa el desempeño del modelo DDMRP para obtener los elementos requeridos para una mejora continua.

La figura 12 muestra el comportamiento del ítem 12 en los meses de junio y julio del 2024, sin presentar ruptura ni exceso de inventario y oscilando entre la zona amarilla alta y baja. En este caso el buffer de análisis indica que el modelo de abastecimiento está reaccionando de la manera correcta con la demanda. Sin embargo se tiene que seguir monitoreando y haciendo los ajustes necesarios para que permanezca la mayor parte del tiempo en la zona verde.

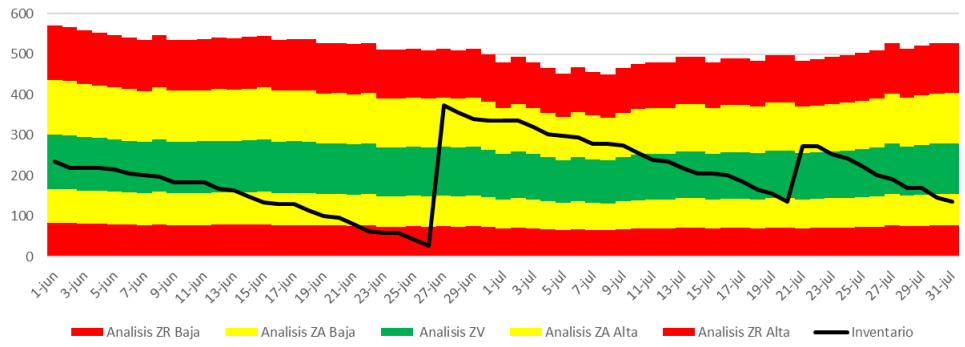


Fig 12. Desempeño del inventario físico del ítem 12 en los meses de junio y julio 2024.

Si el buffer de análisis presenta que el inventario físico permanece en las zonas rojas, se procede con los siguientes ajustes:

- Ajuste horizonte para el ADU: el rango seleccionado para el ADU puede influir significativamente en la respuesta del modelo. Si el horizonte es demasiado extenso puede suavizar excesivamente las variaciones en la demanda reduciendo la capacidad de reacción. Por el contrario, si es demasiado corto, cualquier fluctuación en los consumos generará cambios abruptos en los cálculos. Se puede evaluar el uso de un ADU mixto que combine la demanda en firme con el historial de consumo. Este ajuste debe realizarse mediante un análisis del comportamiento del producto a lo largo del tiempo y aplicando modificaciones manuales cuando sea necesario.
- Factor de ajuste de la demanda (FAD): este ajuste consiste en una modificación controlada del ADU dentro de un período específico para mejorar la capacidad de reacción del modelo ante cambios repentinos en la demanda. Dado que el ADU interviene en todos los cálculos del modelo DDMRP, cualquier ajuste debe realizarse con un LT de anticipación para minimizar impactos no deseados en el abastecimiento y asegurar una respuesta eficiente.
- Factor de ajuste de zona (FAZ): este factor se usa para cambiar manualmente las zonas del buffer de planeación:
    - Ajuste de la zona verde: la zona verde determina la frecuencia y tamaño del pedido, este ajuste se realiza para incrementar la cantidad pedida y la periodicidad del pedido.
    - Ajuste de la zona amarilla: en esta zona se administra el cubrimiento de la demanda, cuando se interviene puede ser para cubrir un paro en el suministro del proveedor (vacaciones, festivos, mantenimiento) o cambios en la demanda en un corto periodo de tiempo.

- Ajuste de la zona roja: la zona roja es la seguridad del buffer y se ajusta cuando se identifica un incremento en la volatilidad del suministro, como puede ser cambio de un proveedor.

- Factor de ajuste del LT: este ajuste se aplica cuando se identifica una circunstancia que modificará temporalmente los tiempos de suministro del proveedor, por ejemplo, cambios en la ruta logística o interrupciones operativas.

Estas alertas y los conceptos que las soportan están diseñados para generar una ejecución visible y colaborativa a lo largo del Modelo Operacional Demand Driven [1].

6.7. COMPONENTES COMUNES PTO

El modelo DDMRP ofrece una forma de hacer seguimiento a aquellas referencias que abastecen bajo pedido. En este proyecto 10 referencias clasificadas como comunes se abastecerán a través de un modelo PTO a partir de lo mencionado en la sesión 6,4.

En la figura 13 se presenta un ejemplo de una referencia con un LT de 9 días. El tercer día previo al vencimiento se activa una alerta visual tipo cuenta regresiva. El cambio a color rojo oscuro indica que el tiempo de entrega no se cumplió, permitiendo identificar incumplimientos y priorizar acciones.

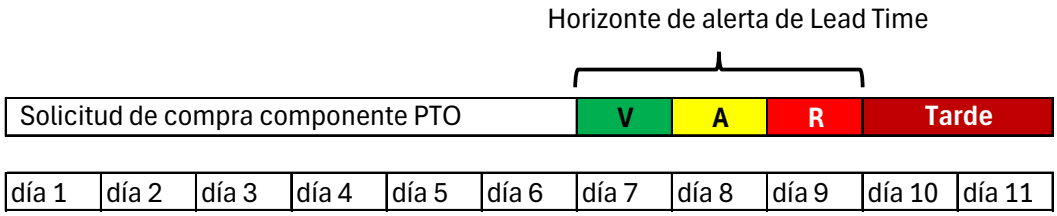


Fig 13. Ejemplo de una referencia con lead time y las zonas de alerta de lead time

6.8. RÉPLICA DESEMPEÑO DEL MODELO

Para evaluar el desempeño del modelo de abastecimiento bajo DDMRP se replicó su comportamiento en hojas de cálculo utilizando datos de la demanda desde abril hasta diciembre de 2024. Se seleccionó una muestra de los 744 ítems a los que se alude en la tabla 13.

El tamaño de la muestra se obtuvo a través de un procedimiento aleatorio para evitar sesgos y garantizar la representatividad del modelo, con la premisa que los ítems en cada rango tienen características similares.

1. En la figura 8 se identificaron 14 rangos de tiempo de entrega (LT) dentro del grupo de ítems comunes.
2. Se asignó un número aleatorio a cada ítem utilizando la función de generación aleatoria en hojas de cálculo.
3. Por cada rango de LT se eligieron los dos ítems con los números más bajos.

Cabe destacar que este método es equivalente a seleccionar cualquier otro criterio basado en una asignación aleatoria, porque la distribución de los números generados es uniforme. Esto significa que todos los ítems dentro de un mismo rango de LT tienen la misma probabilidad de ser elegidos, asegurando una selección imparcial. Los ítems seleccionados se detallan en el anexo D.

La selección de dos ítems por rango de LT responde a dos razones principales:

- Representatividad: cada rango de LT constituye un subconjunto con características similares dentro de la población total, asegurando que todos los intervalos estén reflejados en la muestra.
- Viabilidad del estudio: limitar la selección a dos ítems para cada rango facilita el análisis sin comprometer la rigurosidad, manteniendo la muestra en 27 referencias (pues el rango del LT de 27 días solo tiene un ítem).

A cada uno de los 27 ítems seleccionados se le aplica los cálculos de los buffers de planeación, ejecución y análisis desde el 01/06/2024 hasta el 30/11/2024, considerando lo siguiente:

- El ADU se calcula con dos meses de consumos históricos.
- La demanda calificada según [1], se sugiere sea revisada en un rango equivalente al LT o hasta donde exista demanda en firme. Para la réplica se considera un horizonte de 30 días de demanda en firme, porque este es el rango de tiempo con demanda en firme disponible en la empresa.
- El MOQ se aplica solo para cumplir la cantidad mínima de pedido y una vez alcanzado este requisito, el pedido puede incrementarse de a una unidad.

La réplica del comportamiento de los 27 ítems se detalla en el anexo E. Como ejemplo en la figura 14 se presenta el comportamiento de los buffers de planeación, ejecución y análisis para el ítem 12.

Para este mismo ítem se revisa el desempeño del modelo DDMRP en la réplica, usando las métricas informadas en la sección 4.6.1.

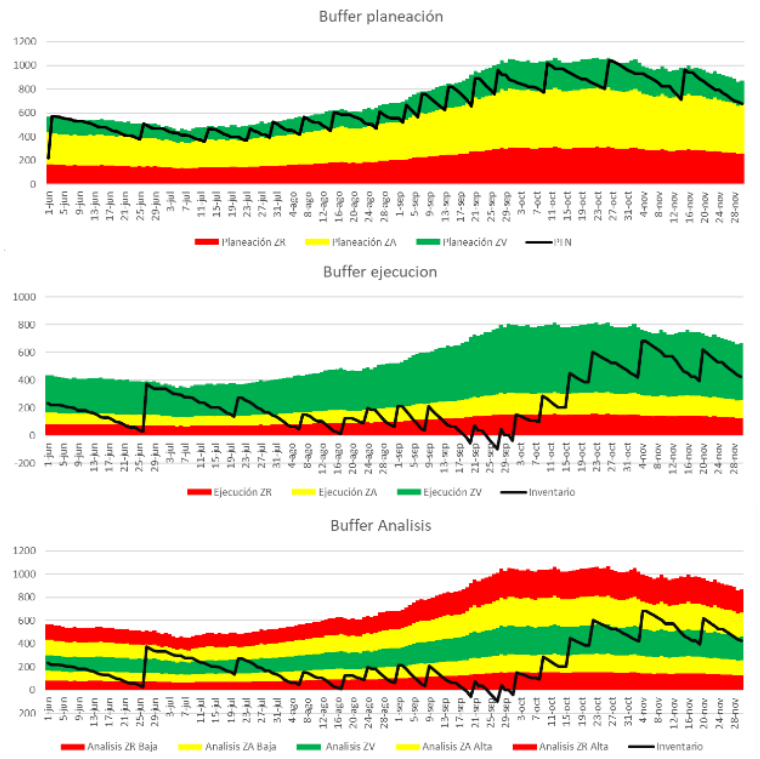


Fig 14. Resultados de la réplica del modelo para el ítem 12 de junio a noviembre del 2024.

6.8.1. Integridad de la señal. Con esta métrica se revisa que las señales que genera el modelo DDMRP se estén activando en el momento y la cantidad sugerida.

La tabla 22 ilustra que al día siguiente de la sugerencia de pedido el buffer de planeación cambia de amarillo a verde, lo que indica que el pedido ha sido incorporado en la PFN; en dos días se registra un exceso debido a la variación en el valor del ADU.

6.8.2. Integridad del punto de desacople. Se evalúa el desempeño del buffer a lo largo del tiempo, buscando que la mayoría de los días se concentren en las zonas verde y amarilla del buffer de análisis. La presencia en la zona roja indica posibles alertas en el modelo, mientras que si se alcanza la zona roja oscuro, se requiere realizar intervenciones manuales en el modelo DDMRP. En la figura 15 se muestra la distribución de días en los que el inventario físico se ubicó dentro del buffer de análisis.

Tabla 22. Medición integridad de la señal para el ítem 12

Fecha	ítem	Pedido	Buffer planeación
1/06/2024	12	350	Amarillo
2/06/2024	12		Exceso
25/06/2024	12	136	Amarillo
26/06/2024	12		Verde
12/07/2024	12	124	Amarillo
13/07/2024	12		Verde
23/07/2024	12	125	Amarillo
24/07/2024	12		Verde
29/07/2024	12	125	Amarillo
30/07/2024	12		Verde
6/08/2024	12	149	Amarillo
7/08/2024	12		Exceso
14/08/2024	12	170	Amarillo
15/08/2024	12		Verde
26/08/2024	12	171	Amarillo
27/08/2024	12		Verde
2/09/2024	12	175	Amarillo
3/09/2024	12		Verde
6/09/2024	12	204	Amarillo
7/09/2024	12		Verde
13/09/2024	12	206	Amarillo
14/09/2024	12		Verde
20/09/2024	12	269	Amarillo
21/09/2024	12		Verde
26/09/2024	12	240	Amarillo
27/09/2024	12		Verde
9/10/2024	12	261	Amarillo
10/10/2024	12		Verde
25/10/2024	12	250	Amarillo
26/10/2024	12		Verde
14/11/2024	12	266	Amarillo
15/11/2024	12		Verde

En la figura 15 el modelo se mantuvo principalmente en la zona verde y amarilla, aunque con una presencia significativa en la zona roja baja. Esto indica la necesidad de ajustar el modelo para reducir el riesgo de quiebre de inventario.

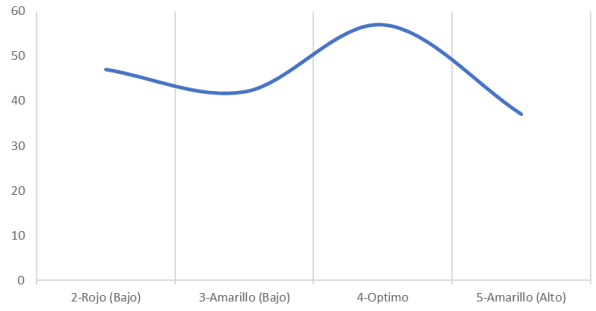


Fig 15. Frecuencia de la posición del inventario físico de junio a noviembre para el ítem 12.

6.8.3. Velocidad del punto de desacople. El sistema DDMRP utiliza una medida llamada variación de la frecuencia de pedido, la cual consiste en comparar la frecuencia de pedido planeada con la real.

Tabla 23. Frecuencia de pedido para el ítem 12

ítem	Frecuencia pedido modelo	Frecuencia pedido réplica	Variación frecuencia de pedido
12	13	12	-1

En la tabla 23 se muestra la frecuencia con la que el modelo sugiere realizar los pedidos. Esta frecuencia se calculó dividiendo la zona verde por el ADU, obteniendo un valor de 13 días. La frecuencia resultante de la réplica del modelo fue de 12 días, calculada dividiendo el número total de días del periodo analizado (junio a noviembre de 2024) por el número total de órdenes emitidas en ese mismo periodo.

7. RESULTADOS

El modelo desarrollado a lo largo de este proyecto tiene dos parámetros que tuvieron un alto impacto para su definición, los cuales son el LT y la variabilidad en la demanda.

7.1. ANÁLISIS POR LT

Los 27 ítems cuya demanda fue replicada se van a analizar en 4 grupos segmentados por su LT de la siguiente forma:

- De 15 y 20 días.
- De 25 a 30 días.
- De 35 a 50 días.
- De 60 días o superior.

Se comparó el comportamiento del inventario físico del modelo diseñado con el inventario real durante el mismo periodo, con el fin de evaluar la eficacia del modelo en la gestión de inventarios. Esta comparación permitió identificar diferencias en la cobertura y analizar el impacto de la metodología aplicada frente al modelo de abastecimiento actual.

7.1.1. Rango de LT entre 15 y 20 días.

El nivel de servicio para cada ítem se calcula dividiendo la cantidad de días con cobertura de inventario entre el total de días del periodo analizado. Esta métrica permite evaluar la capacidad del modelo para garantizar la disponibilidad de materiales requeridos por el plan de producción.

Tabla 24. Nivel de servicio ítems con LT entre 15 a 20 días

LT	Ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
15	211301	171	54	183	93%	30%
15	2885	183	168	183	100%	92%
20	244034	167	146	183	91%	80%
20	3395	156	158	183	85%	86%

En la tabla 24 se muestra que los cuatro ítems analizados presentan un nivel de servicio promedio del 92% en la réplica, mientras que en la operación real es del 72%. El ítem 211301 presenta la mayor diferencia entre ambas mediciones. La figura 16 compara el comportamiento del inventario calculado y real de este ítem, evidencia que el modelo DDMRP logra reaccionar con rapidez gracias a su corto LT. Sin embargo, el modelo actual de suministro no abasteció a tiempo los requerimientos de material para cumplir con la demanda de producción.

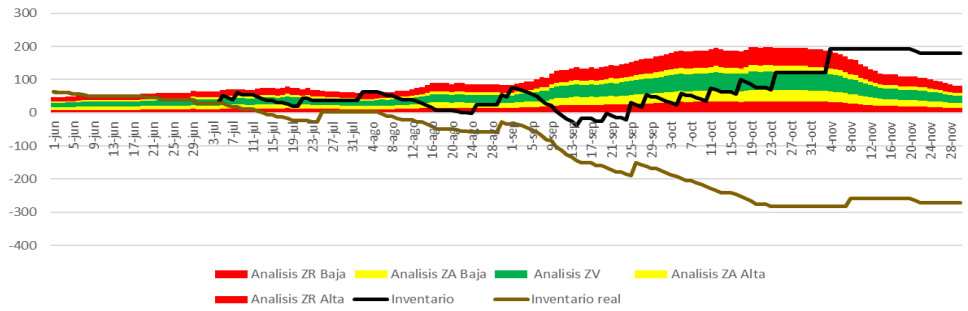


Fig 16. Buffer de análisis del ítem 211301.

En la métrica de integridad del punto de desacople del ítem 211301, entre junio y noviembre de 2024, se presenta una alerta de rojo oscuro por exceso de inventario. Como se muestra en la figura 17, esta condición se debe a la disminución de los requerimientos en el mes de noviembre.

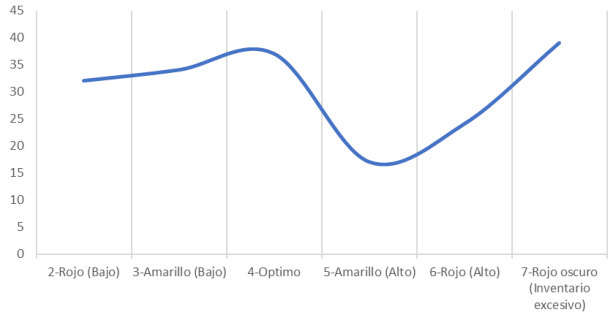


Fig 17. Integridad del punto de desacople de junio a noviembre de 2024 para el ítem 211301.

Esta situación se puede corregir utilizando las siguientes herramientas del DDMRP:

- Uso del FAD: permite reducir el ADU en función de la disminución de la demanda.
- ADU mixto: incorpora un rango de tiempo de demanda en firme para un ajuste más preciso.

- Reducción de la zona amarilla: similar al FAD pero sin afectar el cálculo de la zona verde y roja de planeación.

En la tabla 24 el ítem 3395 presenta un nivel de servicio del 85% en la réplica y del 86% en el comportamiento real. Esta situación se explica por los cambios significativos en la demanda, como se muestra en la tabla 25. El modelo generó el primer pedido de abastecimiento el 6 de agosto, 10 días antes del quiebre de inventario ocurrido el 16 de agosto y el ítem tiene un LT de 20 días, como se observa en la figura 18. Para mitigar este impacto se sugiere ajustar el ADU incluyendo también la demanda futura.

Tabla 25. Demanda ítem 3395

Mes	Cantidad demanda	Variación por mes
jun	44	
jul	16	-64%
ago	92	475%
sep	12	-87%
oct	44	267%
nov	144	227%

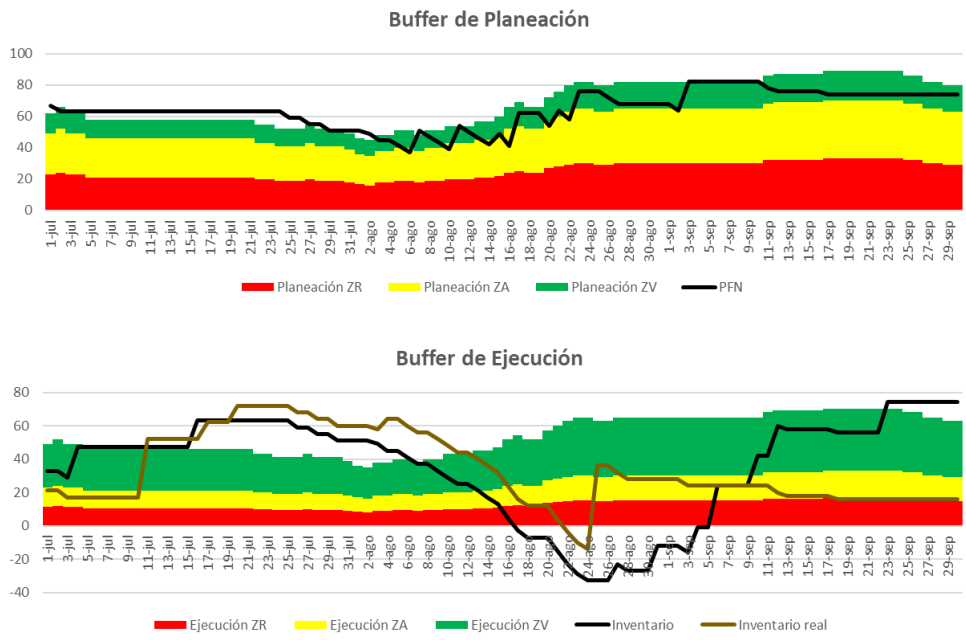


Fig 18. Buffer de planeación y análisis del ítem 3395.

En relación con el valor de los inventarios en exceso en este rango de LT, se visualiza en la tabla 26 que el modelo DDMRP lo incrementa.

Tabla 26. Valor inventario en exceso ítems con LT entre 15 a 20 días

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 564.164	COP 564.164
30/11/2024	COP 2.527.892	COP 209.318

7.1.2. Rango de LT entre 25 y 30 días. Al igual que en el rango de LT anterior se compara el nivel de servicio obtenido en la réplica con el real.

Tabla 27. Nivel de servicio ítems con LT entre 25 a 30 días

LT	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
25	409743	173	183	183	95%	100%
25	12	181	140	183	99%	77%
27	56632	162	139	183	89%	76%
30	277970	173	183	183	95%	100%
30	200706	155	150	183	85%	82%

Con la información presentada en la tabla 27 se identifica que el nivel de servicio en la réplica fue del 92% y en el comportamiento real del 84%. El ítem 200706 presentó el desempeño más bajo dentro de la réplica con un nivel de servicio del 85%, frente al 82% en la operación real. Esta diferencia se debe a un incremento del 260% en la demanda durante noviembre comparada con la de octubre como se evidencia en la tabla 28, lo que generó un desabastecimiento.

Tabla 28. Comportamiento demanda ítem 200706

Mes	Demanda	Variación de la demanda
Jun	26	
Jul	8	-69%
Ago	20	150%
Sep	10	-50%
Oct	10	0%
Nov	36	260%

El LT del ítem 200706 es de 30 días, lo que implica que cualquier ajuste en los cálculos del modelo DDMRP ante un incremento en la demanda debe realizarse con al menos 30 días de anticipación. No obstante en la figura 19 se observa que el buffer de planeación en octubre no refleja un incremento que permita absorber la variación del 260% en la demanda de

noviembre. Esto ocurre porque el modelo basado en la demanda histórica de septiembre y octubre estimó un consumo de 10 unidades, mientras que la demanda real en noviembre fue de 36 unidades. En este caso al igual que con otros ítems se requieren ajustes manuales. Sin embargo se destaca la necesidad de incrementar el ADU o ajustar la zona amarilla para mejorar la capacidad de respuesta del modelo y garantizar un nivel de servicio adecuado.

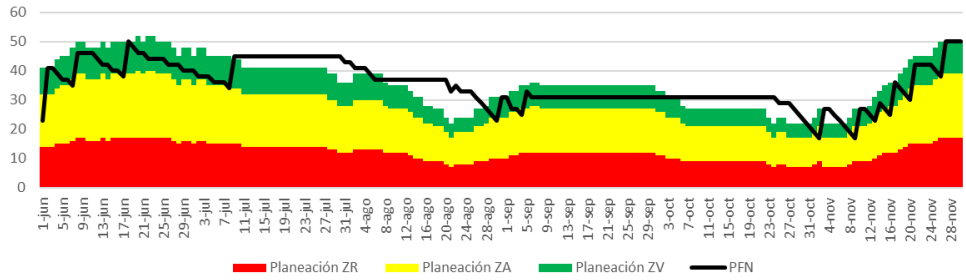


Fig 19. Buffer de planeación del ítem 200706.

Otro caso en este rango es el ítem 12, el cual logra un nivel de servicio del 99% en la réplica mientras que el real es de 77%. La demanda presenta un incremento del 72% en septiembre, como lo muestra la tabla 29. Esto ubica el inventario en la zona roja baja del buffer de análisis en la figura 20; en octubre la demanda vuelve a un valor similar al de agosto, permitiendo al inventario posicionarse entre la zona amarilla alta y la zona verde.

Tabla 29. Comportamiento demanda ítem 12

Mes	Cantidad demanda	Variación por mes
jun	249	
jul	353	42%
ago	445	26%
sep	767	72%
oct	428	-44%
nov	550	29%

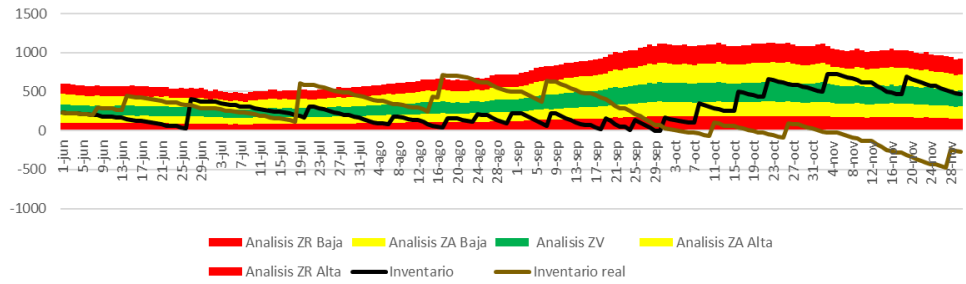


Fig 20. Buffer de análisis del ítem 12.

El valor del inventario de exceso para este rango de LT se comportó igual en la réplica y el real, quedando al final del ejercicio sin exceso.

7.1.3. Rango de LT entre 35 a 50 días. Se presenta en la tabla 30 el nivel de servicio para este rango de LT donde el promedio en la réplica es del 86%, mientras que en el comportamiento real es del 93%.

Tabla 30. Nivel de servicio ítems con LT entre 35 a 50 días

LT	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
35	14058	159	123	183	87%	67%
35	235438	167	183	183	91%	100%
40	286015	171	166	183	93%	91%
40	6343	183	183	183	100%	100%
45	378373	161	180	183	88%	98%
45	9316	180	169	183	98%	92%
50	6598	148	183	183	81%	100%
50	5400	88	170	183	48%	93%

En la tabla 30 se observa que el ítem 5400 tiene un nivel de servicio del 48% en la réplica y del 93% en la operación real. Esto se presenta debido a que al inicio del ejercicio la PFN se encontraba en la mitad de la zona amarilla y el tiempo de entrega del material es de 50 días. Además, la demanda en septiembre experimentó un incremento del 97% lo que generó otro período de desabastecimiento ilustrado en la figura 21.

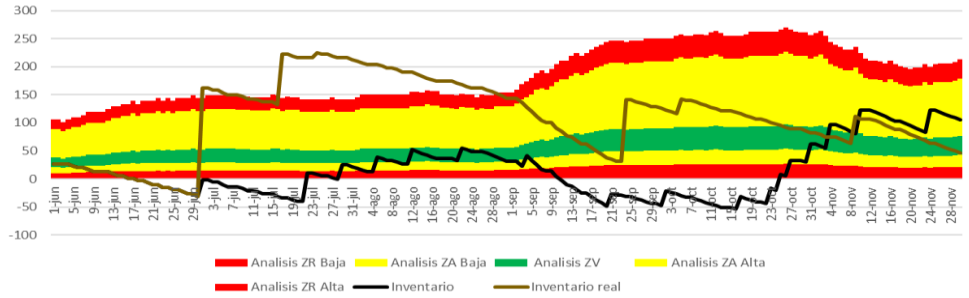


Fig 21. Buffer de análisis del ítem 5400.

Para mejorar el nivel de servicio se podría ajustar la zona verde en el primer pedido para consolidar un único pedido de mayor volumen; si se conoce la demanda con un horizonte de tiempo superior al LT, esta decisión puede ser tomada con mejor información. Sin embargo,

en ausencia de datos en firme se deben revisar las proyecciones de ventas para mejorar la decisión.

El ítem 9316 en la tabla 30 logra un nivel de servicio del 98% en la réplica y en la realidad es del 92%. Este comportamiento se presenta en la figura 22 y se explica como sigue:

- En los primeros días de junio se tiene una llegada de material que posiciona el inventario en la zona roja-alta.
- En agosto y septiembre la demanda incrementa, generando algunos días de desabastecimiento.
- El consumo de noviembre duplica el de octubre, situación que genera desabastecimiento en los últimos días de noviembre en la réplica.

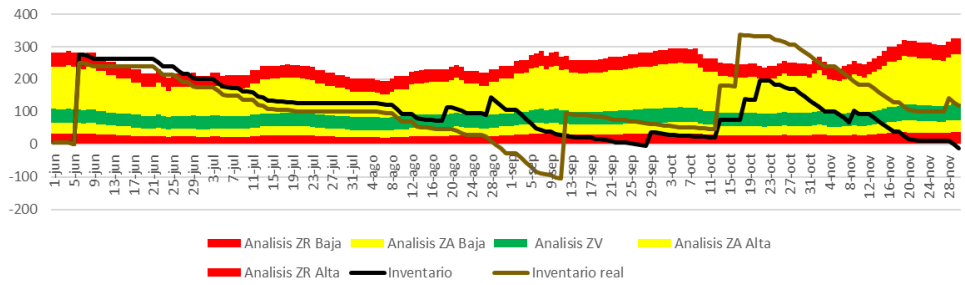


Fig 22. Buffer de análisis del ítem 9316.

En la tabla 31 el valor del inventario en exceso se incrementa con el DDMRP en relación con el comportamiento real.

Tabla 31. Valor inventario en exceso ítems con LT entre 35 a 50 días

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 1.548.000	COP 1.548.000
30/11/2024	COP 2.046.800	COP 0

7.1.4. Rango de LT de 60 días o superior. Este rango tiene los ítems con el LT más largo, implicando que cualquier cambio significativo en la demanda tardará más en ser incorporado por el abastecimiento. En la tabla 32 se presenta que el nivel de servicio promedio en la réplica alcanza el 90%, mientras que en el comportamiento real es del 69%.

El buffer de análisis del 235707 de la figura 23 presenta que durante la réplica se registra una llegada de material a inicios de julio correspondiente a una orden emitida antes del inicio de dicha réplica. Sin embargo, el material no llega como estaba planeado, generando un incumplimiento en el nivel de servicio.

Tabla 32. Nivel de servicio ítems con LT de 60 días o superior

LT	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
60	55366	183	183	183	100%	100%
60	424760	113	83	183	62%	45%
80	76257	183	91	183	100%	50%
80	76258	183	89	183	100%	49%
90	468130	140	69	183	77%	38%
90	293802	151	128	183	83%	70%
100	235707	183	88	183	100%	48%
100	70283	183	183	183	100%	100%
120	243	154	183	183	84%	100%
120	10317	183	171	183	100%	93%

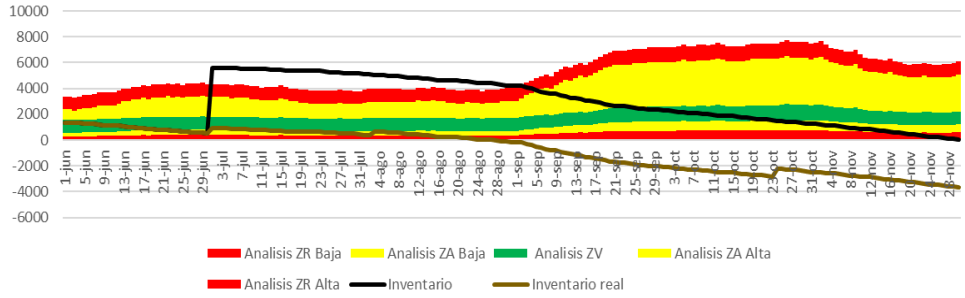


Fig 23. Buffer de análisis del ítem 235707.

En la figura 24 se ilustra el buffer de análisis del ítem 424760, en donde se observa que el inventario en agosto en la réplica se posiciona entre la zona amarilla alta y baja, pero en septiembre la demanda incrementa el 107%. Lo anterior combinado con un LT de 60 días hace que se presenten faltantes en septiembre y octubre. En noviembre se evidencia una recuperación del inventario.

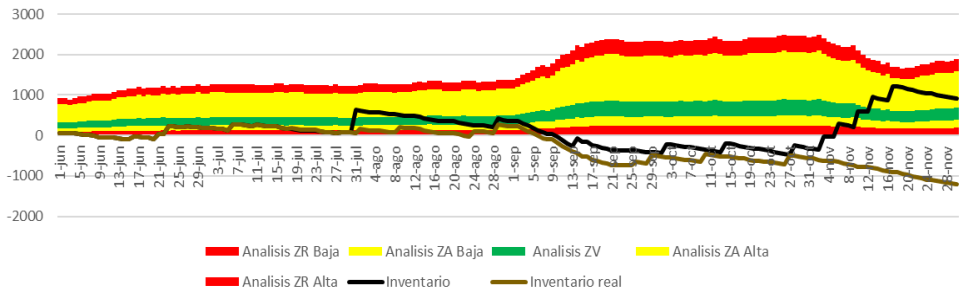


Fig 24. Buffer de análisis del ítem 424760.

En este rango se evidencia el impacto que tiene el LT largo en la planificación de materiales, generando faltantes por no conocer la demanda más allá de su horizonte. En estos casos, aunque el DDMRP permite aumentar los inventarios de seguridad, es clave el ajuste de los parámetros del modelo para generar órdenes de suministro o gestionar con el proveedor el adelanto de entregas.

En la tabla 33 se presenta el valor del inventario en exceso, el cual es superior en la réplica al comportamiento real. Aunque el modelo DDMRP incrementó el valor del inventario en exceso su nivel de servicio es un 21% superior.

Tabla 33. Valor inventario en exceso ítems con más de 60 días de LT

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 23.852.790	COP 23.852.790
30/11/2024	COP 1.786.032	COP 978.336

En términos generales el nivel de servicio del modelo diseñado usando la metodología DDMRP es del 89,7 % frente al 79,9% del comportamiento real. Esto representa una mejora del 10%, con la precisión que en la réplica se trabajaron los cálculos automáticos sin intervención para ajustar el tamaño de los pedidos, ni la gestión para reaccionar ante alertas en la ejecución.

Sin embargo, el valor del inventario en exceso para los 27 ítems replicados se incrementa en 436% en relación con el comportamiento real según la tabla 34.

Tabla 34. Valor del inventario en exceso ítems réplica

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 27.384.880	COP 27.384.880
30/11/2024	COP 6.360.724	COP 1.187.654

7.2. ANÁLISIS POR VARIABILIDAD

Este análisis se lleva a cabo segmentando los 27 ítems en los tres rangos del factor de variabilidad para el cálculo de la metodología DDMRP.

7.2.1. Factor de variabilidad baja. En la tabla 35 se presentan los 16 ítems que se encuentran en este rango, los cuales tienen el nivel de servicio de 90% en la réplica y de 74% para el comportamiento real.

Tabla 35. Nivel de servicio con el factor de variabilidad baja

LT	%VAR	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
15	**0,25**	211301	171	54	183	93%	30%
25	**0,25**	409743	173	183	183	95%	100%
27	**0,25**	56632	162	139	183	89%	76%
30	**0,25**	277970	173	183	183	95%	100%
35	**0,25**	14058	159	123	183	87%	67%
35	**0,25**	235438	167	183	183	91%	100%
40	**0,25**	286015	171	166	183	93%	91%
45	**0,25**	378373	161	180	183	88%	98%
50	**0,25**	6598	148	183	183	81%	100%
60	**0,25**	55366	183	183	183	100%	100%
60	**0,25**	424760	113	83	183	62%	45%
80	**0,25**	76257	183	91	183	100%	50%
80	**0,25**	76258	183	89	183	100%	49%
90	**0,25**	468130	140	69	183	77%	38%
100	**0,25**	235707	183	88	183	100%	48%
120	**0,25**	243	154	183	183	84%	100%

El ítem 468130 alcanza un nivel de servicio del 77% en la réplica y solo del 38% en el comportamiento real, debido a que el tiempo de entrega de 90 días no logra reaccionar con rapidez ante cambios en la demanda. Esto se puede ver en la figura 25, donde hay un desabastecimiento en julio y el material solo se repone a finales de agosto. Además, en la figura 26 se muestra cómo el modelo comienza a generar varias órdenes de suministro pequeñas de manera continua, permitiendo ir respondiendo de forma progresiva a la demanda.

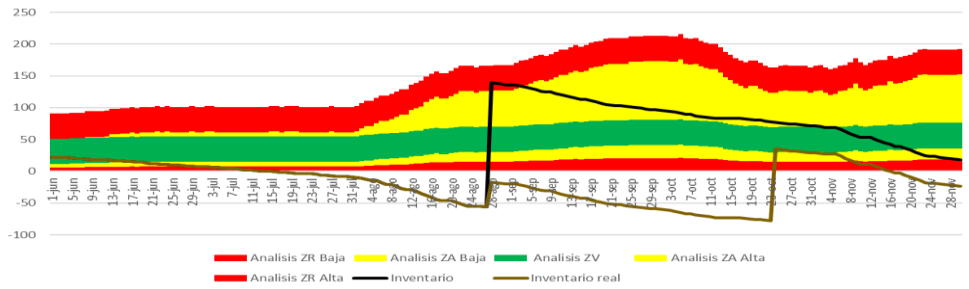


Fig 25. Buffer de análisis del ítem 468130.

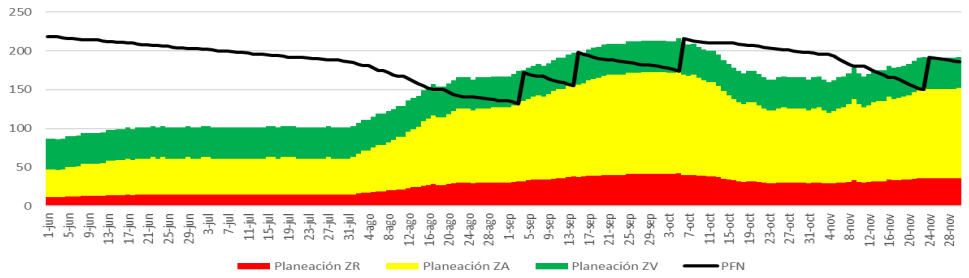


Fig 26. Buffer de planeación del ítem 468130.

El buffer de análisis del ítem 76258 mostrado en la figura 27, evidencia cómo una llegada de material a finales de junio (dejando el inventario en exceso), permite construir inventario para abastecer la demanda, incluso cuando ésta se incrementa. En contraste, el comportamiento real presenta varios momentos con quiebres de inventario.

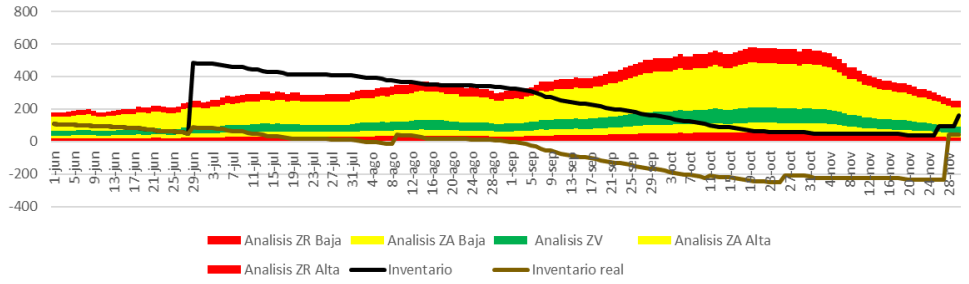


Fig 27. Buffer de análisis del ítem 76258.

Ambos ejemplos evidencian la importancia de monitorear las señales que entrega el modelo, especialmente cuando no se cuenta con un horizonte de demanda muy amplio.

Para este rango de variabilidad se evidencia en la tabla 36 que la réplica genera más exceso de inventario que el comportamiento real.

Tabla 36. Valor del inventario en exceso de los ítems con variabilidad baja

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 3.375.448	COP 3.375.448
30/11/2024	COP 4.391.250	COP 0

7.2.2. Factor de variabilidad media. En este rango el nivel de servicio es de 88% en la réplica y de 86% en el real. En la tabla 37 se presentan los datos de este rango.

Se revisa el comportamiento del ítem 293802. La causa de que el nivel de servicio en la réplica sea de 83% es que la PFN está aproximadamente al 25% de la zona amarilla el primer día del ejercicio. Esta condición genera un riesgo de faltante hasta que llegue el primer pedido que el modelo sugiere. En la figura 28 se presenta el comportamiento del buffer de planeación de este ítem.

Tabla 37. Nivel de servicio con el factor de variabilidad media

LT	%VAR	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
20	0,5	244034	167	146	183	91%	80%
25	0,5	12	181	140	183	99%	77%
30	0,5	200706	155	150	183	85%	82%
45	0,5	9316	180	169	183	98%	92%
50	0,5	5400	88	170	183	48%	93%
90	0,5	293802	151	128	183	83%	70%
100	0,5	70283	183	183	183	100%	100%
120	0,5	10317	183	171	183	100%	93%

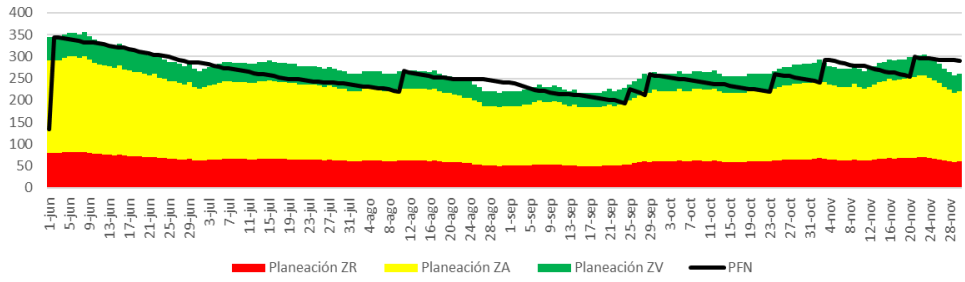


Fig 28. Buffer de planeación del ítem 293802.

El ítem 244034 en la figura 29 presenta faltantes de inventario en la réplica y el comportamiento real, originados por un incremento del 97% de la demanda de septiembre. Aunque el inventario hasta agosto tiene un comportamiento adecuado según el DDMRP, no

se logró mitigar el incremento de la demanda, lo que implica que ante cambios significativos es necesaria la intervención en los parámetros del modelo o negociar la mejora de las entregas con el proveedor.

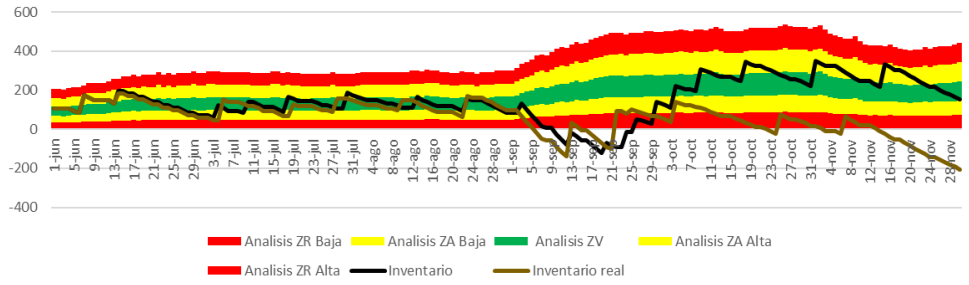


Fig 29. Buffer de análisis del ítem 244034.

Los ítems con factor de variabilidad media en la tabla 38 tienen más exceso de inventario que el comportamiento real.

Tabla 38. Valor del inventario en exceso de los ítems con variabilidad media

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 23.852.790	COP 23.852.790
30/11/2024	COP 1.786.032	COP 978.336

7.2.3. Factor de variabilidad alta. En este rango se presentan 3 ítems, que alcanzan un nivel de servicio en la réplica de 95% y de 93% en la realidad, como se presenta en la tabla 39.

Tabla 39. Nivel de servicio para el factor de variabilidad alta

LT	%VAR	ítem	Cobertura réplica	Cobertura real	Total días	Nivel de servicio réplica	Nivel de servicio real
15	0,75	2885	183	168	183	100%	92%
20	0,75	3395	156	158	183	85%	86%
40	0,75	6343	183	183	183	100%	100%

El ítem 2885 presenta inventario en exceso tanto al inicio como al final de la réplica como se muestra en la figura 30; aunque tiene un LT de 15 días su MOQ de 100 unidades condiciona el comportamiento del inventario. Entre junio y agosto cuando el ADU es bajo, el tamaño de los buffers también disminuye. Sin embargo, el MOQ obliga al modelo a mantener inventarios cercanos a las 100 unidades generando exceso. Esta situación evidencia que el MOQ impacta directamente el nivel de inventario y puede causar excesos cuando la demanda disminuye, como ocurre en noviembre.

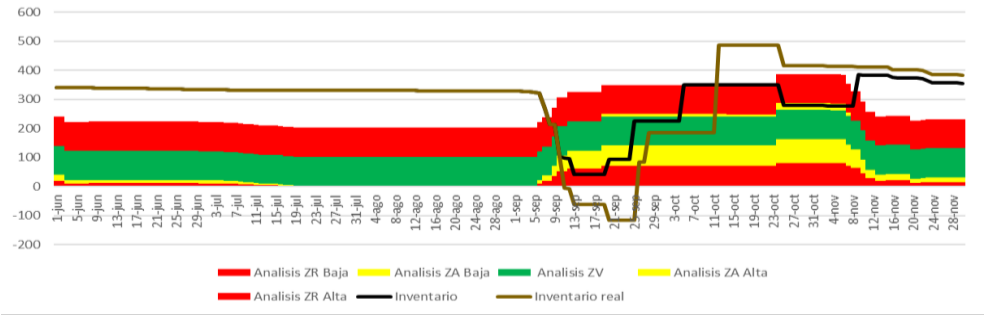
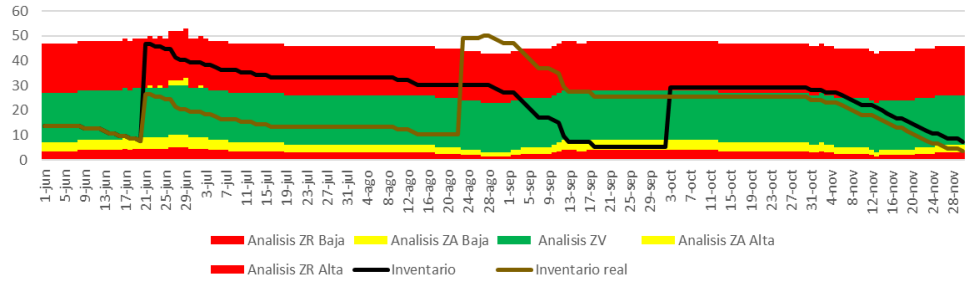


Fig 30. Buffer de análisis del ítem 2885.

El buffer de análisis del ítem 6343 en la figura 31, evidencia que no se presentan quiebres de inventario y se logra un nivel de servicio del 100%. Además, en la réplica los niveles de seguridad parametrizados permiten que el inventario no llegue a cero, como ocurre en septiembre en el comportamiento real.

Fig 31. Buffer de análisis del ítem 6343.



En la tabla 40 los inventarios en exceso de los ítems con el factor de variabilidad alta son menores en la réplica con relación al comportamiento real.

Tabla 40. Valor del inventario en exceso para los ítems con variabilidad alta

Fecha	Valor inventario en exceso réplica	Valor inventario exceso real
1/06/2024	COP 156.642	COP 156.642
30/11/2024	COP 183.442	COP 209.318

Al revisar el comportamiento de los ítems por el factor de variabilidad, se identifica que el nivel de servicio más bajo está en el grupo de componentes con el factor de variabilidad media. Lo que implica que se debe considerar una revisión del valor del factor de variabilidad para este grupo.

7.3. AJUSTES PARAMETROS DE LA RÉPLICA

Con el ejercicio de la réplica se obtiene que el valor del inventario es de COP 124.120.179, lo que representa un incremento del 143% en comparación con el inventario real cuyo valor es de COP 51.005.756. Aplicando el FAD del 90% (en octubre el área comercial informa que no se tendrá más producción de Busstar a partir de diciembre), un ADU mixto (un mes de demanda y un mes de histórico) y reduciendo los valores del factor de LT y del factor de variabilidad al mínimo recomendado por la metodología según las tablas 1 y 2, se logra reducir el inventario como se presenta en la tabla 41.

Tabla 41. Valores inventario con ajustes del DDMRP

Medición	Valor inventario del 30/11/2024	Nivel de servicio del 30/11/2024	% Incremento inventario
Real	COP 51.005.756	80%	0%
Réplica	COP 124.120.179	90%	143%
Réplica con ajustes	COP 92.199.566	91%	81%

8. CONCLUSIONES

El análisis de abastecimiento evidenció que la alta proporción de ítems abastecidos bajo PTO generaba incertidumbre en la disponibilidad de materiales. Sin embargo, mediante la segmentación de la demanda, estrategias de planeación e identificación de los ítems comunes en modelos de carrocerías específicos, se logró migrar el 73% de los ítems a PTS, lo cual se aprecia en la tabla 42, reduciendo riesgos de faltantes en la producción y mejorando la estabilidad del suministro.

Tabla 42. Proporción de los ítems PTO y PTS por carrocería antes y después del modelo diseñado

	Modelo abastecimiento inicial		**Modelo abastecimiento final**	
Carrocería	**PTO**	**PTS**	**PTO**	**PTS**
BUSSTAR 380 S2	75%	25%	21%	79%
BUSSTAR DD S2	78%	22%	27%	73%

La asignación del umbral del ADI se estableció considerando los distintos LT y la variabilidad en el consumo, debido a que la producción no utiliza de manera uniforme los mismos elementos y por la naturaleza del negocio el consumo no es diario. El empleo conjunto del ADI y el CV^2 permitió clasificar los ítems en cuadrantes según su intermitencia y variabilidad, ofreciendo una visión detallada del comportamiento de la demanda. Este enfoque de segmentación aporta un marco objetivo para determinar la estrategia de abastecimiento adecuada en cada caso.

La revisión de fuentes de información relevantes permitió identificar las mejores prácticas en el diseño de políticas de abastecimiento, estableciendo un marco teórico que sirvió de base para la elección y adaptación de la metodología DDMRP. En la réplica esta metodología presentó un incremento en el nivel de servicio del 10% con relación al valor real; no obstante el valor del inventario aumentó en un 143%. Posteriormente al realizar ajustes en el ADU, en los factores de LT y de variabilidad, se mantuvo el nivel de servicio y el valor del inventario en la réplica se redujo en un 62%.

Ante fluctuaciones imprevistas en la demanda es necesario ajustar manualmente los buffers, destacando la importancia de un monitoreo continuo. Por lo tanto, la ejecución de los modelos de abastecimiento debe ir acompañada de un seguimiento constante con revisiones periódicas de la segmentación de inventarios y evaluación de su desempeño, asegurando su alineación con las necesidades de producción y las condiciones del mercado.

9. RECOMENDACIONES

- Establecer un proceso de monitoreo y ajuste de los parámetros del DDMRP para asegurar su alineación con la realidad de la operación. Esto incluye la revisión del LT, la variabilidad de la demanda, los factores de ajuste de los buffers y la definición de la calificación de la demanda. Es fundamental mantener el seguimiento de estos indicadores y realizar ajustes cuando se identifiquen desviaciones significativas. Además se sugiere desarrollar herramientas o reportes automatizados que faciliten el análisis y la toma de decisiones.
- Actualizar el ciclo de PVO con revisiones mensuales y ajustes trimestrales en función de la variabilidad observada. Para mejorar la precisión de las estimaciones se sugiere realizar reuniones periódicas entre los equipos de ventas, planeación y producción, con el fin de validar tendencias, identificar cambios en el comportamiento de la demanda y ajustar los parámetros del abastecimiento de manera oportuna. Este enfoque permitirá reducir la incertidumbre y mejorar la configuración del modelo y su eficiencia.
- Implementar un programa de formación continua enfocado en el dominio de DDMRP y otros modelos de abastecimiento como MRP, VMI, JIT y de revisión periódica. La capacitación debe incluir aspectos clave como la gestión de buffers, el análisis de la variabilidad de la demanda, la interpretación de métricas de desempeño y la toma de decisiones basada en datos. También se sugiere complementar la formación con casos prácticos y simulaciones que permitan a los participantes aplicar los conceptos aprendidos en escenarios reales de la empresa.
- Continuar con la transición de componentes de PTO a PTS en función de su comportamiento de demanda y criticidad en la producción. Se recomienda realizar un análisis semestral de los ítems y validar si cumplen con las condiciones necesarias para operar bajo PTS, asegurando una gestión eficiente de inventarios.
- Además de la frecuencia y variabilidad se sugiere explorar otros factores como criticidad en el proceso productivo, valor del inventario y dificultad en el abastecimiento para mejorar la gestión del abastecimiento.
- Explorar otros modelos de abastecimiento como los mencionados en la sesión 4.4. que permitan mejorar el desempeño del sistema de abastecimiento de la empresa.

REFERENCIAS

[1] C. A. Ptak and C. Smith, *Demand driven material requirements planning (DDMRP)*, 2nd ed. South Norwalk, EE.UU: Ind. Press, 2018.

[2] M. Lozano García, P. F. Pezo Dávila, S. E. Soto Abanto, and A. S. Villafuerte de la Cruz, "Gestión de inventarios y rentabilidad de una empresa del sector de la automoción," *Sapienza: Int. J. of Interdisciplinary Stud.*, vol. 2, no. 4, pp. 205–219, Dec. 2021.

[3] J. Smith and L. Brown, "The Impact of Supply Chain Management on Business Efficiency," *Int. J. Oper. Prod. Manage*, vol. 32, no. 8, pp. 1020–1042, 2014.

[4] A. Johnson, "Supply Chain Integration in the Automotive Industry," *J. of Bus. Logist.*, vol. 35, no. 3, pp. 200–215, 2015.

[5] M. Lee, "Proactive Supply Chain Strategies: Building Resilience in Uncertain Times," *Supply Chain Manage. Rev.*, vol. 29, no. 4, pp. 54–61, 2017.

[6] C. White and P. Green, "Visibility and Control in Supply Chain Management," *J. Supply Chain Manage.*, vol. 46, no. 6, pp. 89–95, 2018.

[7] H. Gold, "Inventory Segmentation: A Key to Operational Efficiency," *Prod. Inventory Manage. J.*, vol. 40, no. 2, pp. 23–30, 2019.

[8] F. Anderson and D. Taylor, "Prioritizing High-Value Items in Inventory Management," *J. Oper. Manage.*, vol. 51, no. 2, pp. 45–53, 2020.

[9] K. Peterson, "Demand Forecasting and Inventory Segmentation," *Int. J. Forecasting*, vol. 36, no. 1, pp. 123–134, 2020.

[10] S. Martinez, "Optimizing Storage and Capital through Inventory Segmentation," *J. Bus. Logist.*, vol. 42, no. 1, pp. 67–79, 2021.

[11] R. Thompson, "ABC Inventory Classification: Applications and Limitations," *Int J Prod Econ*, vol. 140, no. 3, pp. 702–710, 2012.

[12] L. Williams, "Segmenting Inventory by Demand Variability: A Practical Approach," *J. Ind. Eng*, vol. 60, no. 4, pp. 45–53, 2018.

[13] Merve Sahin, Recep Kizilaslan, and Ömer F. Demirel, "Forecasting Aviation Spare Parts Demand Using Croston Based Methods and Artificial Neural Networks," *J. Econ. Social Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–21, 2013.

[14] G. O. Kaya, M. Sahin, and O. F. Demirel, "Intermittent demand forecasting: a guideline for method selection," *Sādhanā*, vol. 45, no. 1, p. 51, 2020.

[15] P. Johnson and T. Baker, "Demand Pattern Analysis in Inventory Management," *J. Appl. Math. Decis. Sci.*, vol. 2019, no. 2, pp. 1–12, 2019.

[16] A. A. Syntetos, J. E. Boylan, and J. D. Croston, "On the categorization of demand patterns," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 56, no. 5, pp. 495–503, May 2005.

[17] C. Ptak and C. Smith, *Orlicky's Material Requirements Planning*, 3rd ed. Nueva York, EE.UU: McGraw-Hill Educ., 2011.

[18] E. A. Silver, D. F. Pyke, and R. Peterson, *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3rd ed. New York, EE.UU: John Wiley & Sons, 1998.

[19] H. Clark, "MRP: Foundations and Evolution," *J Manuf Syst*, vol. 48, no. 2, pp. 210–220, 2021.

[20] J. F. Krafcik, "Triumph of the lean production system," *Sloan Manage. Rev.*, vol. 30, no. 1, pp. 41–52, 1988.

[21] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, 1st ed. Portland, EE.UU: Prod. Press, 1988.

[22] J. K. Liker, *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, 1st ed. Nueva York, EE.UU: McGraw-Hill Educ., 2004.

[23] Y. Sugimori, K. Kusunoki, F. Cho, and S. Uchikawa, "Toyota production system and Kanban system: Materialization of just-in-time and respect-for-human system," *Int J Prod Res*, vol. 15, no. 6, pp. 553–564, 1977.

[24] C. Evans, "Vendor Managed Inventory: A Collaborative Approach," *Int J Prod Res*, vol. 58, no. 2, pp. 345–360, 2020.

[25] M. Taylor and R. Scott, "Max-Min Inventory Policies: An Overview," *J. Ind. Eng. Manage.*, vol. 45, no. 6, pp. 127–139, 2019.

[26] L. Anderson and K. Johnson, "Continuous Review Inventory Systems: Strategies for Success," *J. Bus. Logist.*, vol. 55, no. 3, pp. 76–85, 2021.

[27] E. Wilson, "Periodic Review Inventory Systems: Applications in Industry," *J. Oper. Res*, vol. 39, no. 2, pp. 102–110, 2020.

[28] D. Green, "Demand Driven MRP: Theory and Practice," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 144–153, 2016.

[29] C. Ramírez, "Modelo de simulación para la optimización del inventario de una distribuidora," *Univ. Nacional*, pp. 45–60, 2019.

[30] L. Martínez, "Comparación de tres metaheurísticas para la optimización de inventarios," *Rev. Ing. Cienc.*, vol. 10, no. 2, pp. 35–47, 2020.

[31] A. Pérez, "Modelos de Gestión de Inventarios en Cadenas de Abastecimiento," *Rev. Logística*, vol. 5, no. 1, pp. 12–29, 2022.

[32] A. Miller, "Advantages of Demand Driven MRP in Complex Supply Chains," *J. Manuf. Syst.*, vol. 47, no. 3, pp. 130–140, 2019.

[33] S. Harris, "Reducing Variability in Supply Chains through DDMRP," *Supply Chain Manage. Rev.*, vol. 29, no. 6, pp. 70–78, 2020.

[34] M. Johnson and A. Scott, "Improving Visibility and Control with Demand Driven MRP," *J. Oper. Manage.*, vol. 58, no. 2, pp. 50–62, 2021.

[35] B. Taylor, “Adaptability and Flexibility in Supply Chains using DDMRP,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 59, no. 1, pp. 34–45, 2021.

[36] R. White, “Cost Reduction through DDMRP Implementation,” *J. Bus. Logist.*, vol. 62, no. 4, pp. 120–135, 2020.

[37] K. Smith, “Case Study: DDMRP in the Automotive Industry,” *Supply Chain Manage. Rev.*, vol. 29, no. 5, pp. 45–55, 2021.

[38] A. Green, “Demand Driven MRP: An Overview and Analysis,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, pp. 1985–2000, 2020.

[39] J. Brown, “Implementation of Demand Driven MRP in Manufacturing Systems,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 47, no. 3, pp. 120–130, 2019.

[40] P. H. Pittman and J. B. Atwater, *ASCM Supply Chain Dictionary*, 17th ed. Chicago, EE.UU: ascm.org, 2022.

[41] Siesa, “Siesa Enterprise ERP Software,” 2024. Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: https://www.siesa.com/enterprise/

[42] Lean 360 Consulting, “Zolve,” 2024. Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: https://ddmrp.zolve.lean360.co/login

[43] X. Song, D. Chang, and T. Luo, “A Single-Product Multi-Period Inventory Routing Problem under Intermittent Demand,” *Inf.*, vol. 14, no. 6, 2023.

[44] J. E. Boylan and A. A. Syntetos, “Forecasting for Inventory Management of Service Parts,” in *Complex Syst. Maint. Handb.*, K. A. H. Kobbacy and D. N. P. Murthy, Eds., London: Springer London, 2008, pp. 479–506.

[45] Montes de Oca Sánchez Erika and Loza-Hernández Lourdes, “Identificación de patrones de demanda de refacciones automotrices,” *Entreciencias: diálogos soc. conocimiento*, vol. 10, no. 24, pp. 1–12, 2022.

[46] Hopp Wallace J. and Spearman Mark L., *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*, 2nd ed. Boston, EE.UU: Irwin/McGraw-Hill, 2001.

ANEXOS

Anexo A. Tabla de coincidencia por EP para Busstar DD S2

% coincidencia entre EP	100%	94%	89%	83%	78%	72%	67%	61%	56%	50%	44%	39%	33%	28%	22%	17%	11%	6%
EP coincidencia	18/18	17/18	16/18	15/18	14/18	13/18	12/18	11/18	10/18	9/18	8/18	7/18	6/18	5/18	4/18	3/18	2/18	1/18
EP1737	65%	67%	72%	76%	77%	77%	78%	78%	82%	83%	83%	90%	94%	96%	98%	99%	100%	100%
EP1740	67%	68%	74%	77%	78%	79%	81%	81%	84%	85%	86%	93%	95%	97%	98%	99%	100%	100%
EP1743	66%	68%	73%	75%	76%	77%	78%	80%	83%	84%	85%	86%	89%	92%	92%	99%	99%	100%
EP1751	66%	67%	72%	75%	76%	77%	78%	79%	82%	83%	84%	90%	91%	93%	94%	95%	97%	100%
EP1763	67%	69%	71%	73%	74%	75%	77%	79%	80%	81%	88%	89%	90%	91%	91%	92%	98%	100%
EP1766	67%	69%	75%	78%	79%	81%	83%	83%	86%	87%	88%	96%	97%	98%	99%	99%	100%	100%
EP1767	68%	70%	75%	79%	79%	81%	82%	84%	87%	87%	89%	94%	95%	95%	96%	96%	99%	100%
EP1770	68%	69%	75%	78%	79%	81%	82%	85%	86%	87%	94%	95%	97%	97%	98%	100%	100%	100%
EP1771	66%	67%	73%	76%	77%	78%	80%	80%	84%	84%	85%	92%	96%	98%	99%	99%	99%	100%
EP1772	68%	70%	75%	79%	80%	81%	83%	85%	86%	87%	94%	96%	97%	98%	98%	98%	99%	100%
EP1773	67%	68%	74%	76%	77%	79%	81%	83%	84%	85%	92%	94%	95%	95%	96%	96%	98%	100%
EP1775	68%	70%	71%	75%	76%	77%	79%	81%	82%	83%	90%	91%	92%	92%	92%	93%	98%	100%
EP1776	66%	68%	73%	75%	76%	77%	78%	79%	83%	84%	85%	86%	89%	90%	91%	98%	98%	100%
EP1777	68%	70%	75%	79%	80%	82%	84%	87%	88%	89%	96%	97%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
EP1781	67%	68%	74%	76%	77%	78%	78%	80%	84%	85%	86%	87%	90%	91%	92%	99%	99%	100%
EP1782	65%	67%	72%	75%	76%	78%	79%	82%	83%	84%	91%	92%	95%	96%	96%	98%	100%	100%
EP1783	68%	70%	74%	77%	78%	79%	80%	83%	84%	84%	91%	93%	94%	94%	94%	97%	99%	100%
EP1789	68%	70%	75%	78%	79%	80%	81%	83%	86%	86%	88%	94%	95%	96%	96%	97%	99%	100%
% acumulado promedio ítems por EP	67%	69%	74%	77%	77,4%	79%	80%	82%	84%	85%	89%	92%	94%	95%	96%	98%	99%	100%
Cantidad Ítems	680	17	56	37	11	17	20	32	42	14	85	91	57	38	28	120	131	190

Anexo B. Tabla de coincidencia por EP para Busstar 380 S2

% coincidencia entre EP	100%	89%	78%	67%	56%	44%	33%	22%	11%
EP coincidencia	9/9	8/9	7/9	6/9	5/9	4/9	3/9	2/9	1/9
EP1752	71%	82%	83%	94%	96%	97%	99%	100%	100%
EP1769	69%	80%	81%	91%	92%	93%	95%	99%	100%
EP1774	69%	80%	80%	82%	84%	84%	93%	98%	100%
EP1778	73%	78%	79%	80%	81%	82%	91%	94%	100%
EP1779	70%	81%	82%	83%	85%	87%	96%	100%	100%
EP1780	70%	80%	81%	93%	95%	97%	98%	98%	100%
EP1784	68%	76%	78%	89%	90%	92%	94%	94%	100%
EP1791	71%	81%	82%	94%	95%	96%	97%	97%	100%
EP1792	70%	81%	82%	94%	96%	99%	100%	100%	100%
% acumulado promedio ítems por EP	70%	80%	81%	89%	91%	92%	96%	98%	100%
Cantidad Ítems	613	95	13	105	25	29	100	73	185

Anexo C. Resultado calculo ADI y CV^2 para la matriz de variabilidad

Archivo en Excel denominado: Anexo calculo matriz variabilidad.

Anexo D. Resultado selección aleatoria de ítems para la réplica del modelo DDMRP

Ítem	LT	Numero Aleatorio
2885	15	0,029890926
211301	15	0,064898575
3395	20	0,00802619
244034	20	0,026263981
12	25	0,046050757
409743	25	0,066095076
56632	27	0,100749551
277970	30	0,006176084
200706	30	0,010834478
235438	35	0,01529755
14058	35	0,024516187
286015	40	0,03310325
6343	40	0,062494523
378373	45	0,019009652
9316	45	0,02609909
6598	50	0,381891036
5400	50	0,627215489
55366	60	0,038982885
424760	60	0,091184089
76257	80	0,931645709
76258	80	0,957200449
293802	90	0,005205372
468130	90	0,008593548
235707	100	0,077452839
70283	100	0,290951574
243	120	0,03002748
10317	120	0,15249569

Anexo E. Hoja de cálculo de la réplica

Archivo en Excel denominado: Réplica comportamiento demanda.