

Implementación de un Sistema de Vehículos Auto-guiados en un Centro de Operaciones

Ingeniería de Producción

Facultad de Ingeniería - UdelaR

Juan Pedro Inthamoussu

Sofía Schroeder

Guillermo Vignolo

Tutor: Ing. PhD Adrián Ferrari

1 AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a nuestro tutor Adrián Ferrari, que nos guió a lo largo de todo este proyecto ayudándonos a vencer dificultades que fueron surgiendo en el camino e impulsándonos a realizar un trabajo ambicioso y bien realizado. A pesar de las limitaciones impuestas por la pandemia del Covid-19 su comunicación constante fue determinante para poder realizar el trabajo.

Queremos agradecer especialmente al Ing. Roy Gonzalez, Gte. de Ingeniería, la Ing. Carolina Bresque, al Gte. de Logística Juan Pablo Simonett de Ta-Ta Supermercados por habernos permitido colaborar con este proyecto, que busca contribuir con el desarrollo de la Industria 4.0 en nuestro país, y dejándonos a disposición toda la ayuda que nos fuese necesaria. Además, agradecer a los operarios del Centro de Operaciones que nos ayudaron a entender el funcionamiento de los procesos con su paciencia y dedicación, clave para poder construir un modelo adecuado a la realidad. También colaboradores de la compañía en otras áreas que nos brindaron su tiempo y dedicación para recabar la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, queremos agradecer a nuestros familiares y amigos que nos acompañaron a lo largo de todo este trabajo brindándonos su apoyo indispensable.

2 RESUMEN EJECUTIVO

El trabajo que se presenta contiene el desarrollo de un proceso de transformación industrial en un caso real de operaciones. Los cambios tecnológicos que encierran esta evolución, más específicamente de la robótica industrial y colaborativa, son especialmente útiles en todos los niveles productivos y se encuentran cada vez más presentes en la ingeniería de operaciones, fundamentalmente en el área de la logística.

Actualmente existe un enfoque muy importante en las cadenas de suministro que busca permanentemente optimizar mediante la mejora de la productividad y la eficiencia. El trabajo se lleva a cabo en el Centro de Operaciones (CDO) de una empresa desde donde se abastece de forma continua mercadería para 87 locales ubicados en distintas partes de Uruguay. El trabajo consiste en desarrollar un proyecto para poder implementar vehículos auto-guiados en las operaciones principales que se realizan en el CDO. Este tipo de vehículos, también denominados AGVs por sus siglas en inglés, pueden ser vehículos de transporte de mercancías o de personas que se trasladan de forma autónoma utilizando distintos tipos de tecnología. Cada vez es más común encontrar AGVs en procesos productivos por la cantidad de beneficios que aportan, y en este caso se trata de lograr un sistema eficiente para el traslado de pallets con distintos tipos de productos necesarios para abastecer los supermercados de la empresa.

En primer lugar, se presenta un análisis de la tecnología a abordar y del problema actual para entenderlo en su totalidad. Para determinar la cantidad de AGVs que son necesarios para poder sustituir los vehículos operados de forma manual actualmente en el CDO, se presenta un modelado matemático de programación lineal, utilizando recursos informáticos especializados. El trabajo se centró en el desarrollo de este modelo el cual permitió obtener resultados con su respectiva distribución de operaciones, distribución de los tiempos de trabajo, de carga y de inactividad para cada día y turno. Todos estos datos permitieron profundizar en el estudio de su posible implementación y para esta parte se utilizó GLPK, un software libre destinado a este propósito.

Los vehículos autónomos que se proponen son tres: carretillas, transpaletas y equipos recogedores de pedidos (en adelante se llamarán "*order pickers*"), donde cada uno cumple distintas funciones, aunque hay operaciones que pueden ser realizadas por más de uno. Estos equipos utilizan tecnología láser para poder ubicarse, desplazarse y operar, son controlados por un sistema de gestión informático, que integrado al sistema de gestión del almacén va distribuyendo la carga de trabajo. Estos equipos cuentan con sistemas de seguridad muy sofisticados lo que los hace muy confiables a la hora de trabajar en un centro de distribución, incluso operando en simultaneidad con personas. Un aspecto importante son los sistemas de carga de batería que utilizan los vehículos al que se le dedicó una parte importante del análisis.

Los resultados alcanzados permiten observar la gran cantidad de beneficios que aporta este desarrollo tecnológico, no obstante, es necesario aclarar que se trata de inversiones que pueden resultar elevadas. Además, se presentan varios análisis de sensibilidad y alternativas que permiten explorar situaciones que se podrían llegar a dar en el futuro o simplemente conocer los límites del sistema que ayudan a mejorar el enfoque. Se realiza finalmente un análisis económico y financiero para evaluar la rentabilidad de la inversión propuesta.

Palabras clave: Vehículos Auto-guiados, AGV, LGV, Modelado Matemático, Optimización, Centros de Distribución, Cadena de Suministros, Intralogística, Manipulación y Tráfico de Pallets, Robótica Colaborativa (Cobots).

3 TABLA DE CONTENIDO

1	Agradecimientos	1
2	Resumen Ejecutivo	2
3	Tabla de contenido	3
3.1	Índice de Figuras	6
3.2	Índice de Planos	7
3.3	Índice de Tablas	7
3.4	Índice de Gráficos	8
4	Introducción	10
5	Marco Teórico	12
5.1	Definiciones	12
5.1.1	Definición de AGV	12
5.1.2	Sistemas de AGV	12
5.1.3	Diseño de un sistema de AGVs	12
5.1.4	Objetivos de un sistema de AGVs	12
5.1.5	Categorías de AGV	13
5.2	Aspectos tecnológicos	17
5.2.1	Componentes	17
5.2.2	Sistemas de guía	17
5.2.3	Sistema de Control Guiado del AGV	18
5.2.4	Obstáculos	19
5.2.5	Sistema de Seguridad	19
5.2.6	Baterías	20
5.2.7	Sistemas de Carga	21
5.3	Ventajas	23
5.3.1	Flexibilidad	23
5.3.2	Confiabilidad	23
5.3.3	Ahorro de inversión	23
5.3.4	Aplicaciones	23
6	Estado del Arte	24
6.1	Historia	24
6.2	Otras aplicaciones en la industria	25
6.2.1	Industria Automotriz	25
6.2.2	Industria del Papel	26
6.2.3	Industria de alimentos y bebidas	26
6.2.4	Plantas de producción	27
6.2.5	Hospitales	27
6.3	Otras Tendencias del sector	28

6.3.1	AS/RS	28
6.3.2	Multishuttle	28
7	Caso de Estudio	29
7.1	Metodología de trabajo	29
7.2	Definición	29
7.3	Situación actual del Centro de distribución	30
7.3.1	Sobre la empresa	30
7.3.2	Layout actual	31
7.3.3	Operaciones	32
7.3.4	Tipos de ubicación	41
7.3.5	Equipos actuales	46
7.3.6	Mercadería	48
7.3.7	Lógica/ Funcionamiento del Sistema SGA, WMS	49
7.4	Alcance del Caso de estudio	53
7.5	Tratamiento de datos	53
7.6	Caso Base	55
7.6.1	Definición del Caso Base	55
7.6.2	Modelado	59
7.6.3	Resultados	69
7.6.4	Comparación con actualidad	76
7.6.5	Evaluación Económica y Financiera	84
7.6.6	Conclusiones del Caso Base	89
7.7	Evaluación de Alternativas y Análisis de sensibilidad	90
7.7.1	Modelo Actual Optimizado	90
7.7.2	Modelado sin compartir equipos	95
7.7.3	Aumento de la demanda en un 20% anual	98
7.7.4	Comparación entre demanda máxima y promedio	100
7.7.5	Instalar AGV con recambio de baterías	102
7.7.6	Aprovechamiento del tiempo inactivo	107
7.7.7	Ciclos combinados	110
7.7.8	Límites teóricos del sistema	114
7.7.9	Comparación de alternativas	116
8	Conclusiones y Recomendaciones	118
8.1	Introducción	118
8.2	Conclusiones	118
8.3	Recomendaciones	120
9	Bibliografía	121
10	Glosario	123

11 Anexos	124
ANEXO I. Modelo BASE para el cálculo de carretillas Fase I	124
ANEXO II - Modelo BASE para el cálculo de ORDER PICKERS Fase I	126
ANEXO III. Modelo BASE para el cálculo de Transpaletas Fase II	128
ANEXO IV. Datos utilizados en el caso base	130
ANEXO V. Cálculos para el Análisis de Sensibilidad de Ciclos Combinados	136
ANEXO VI. Inversión del Caso Base	137
ANEXO VII. Costos operativos del Caso Base	138
ANEXO VIII. Inversión de la situación actual	139
ANEXO IX. Costos operativos de la situación actual	139
ANEXO X. Inversión de la situación actual optimizada	140
ANEXO XI. Costos operativos de la situación actual optimizada	140
ANEXO XII. Inversión del Sistema con recambio de baterías	141
ANEXO XIII. Costos operativos del Sistema con recambio de baterías	142
ANEXO XIV. Cálculo de consumo eléctrico AGV	143
ANEXO XV. Cálculo de consumo eléctrico de los equipos manuales	144

3.1 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forklift AGV (Fuente: Danbach)	13
Figura 2. Forklift AGV adaptado (Fuente: Danbach)	14
Figura 3. Vehículo de transportes unitarios de cargas (Fuente: Frog)	14
Figura 4. Vehículo de arrastre (Fuente: JBT)	15
Figura 5. Carretillas de estantes (Fuente: ElectroCraft)	15
Figura 6. Vehículos de línea de ensamble (Fuente: dpm)	16
Figura 7. AGV porta contenedores (Fuente: Konecranes Gottwald)	16
Figura 8. AGVs modificados (Fuente: Swisslog y Hans Robot)	17
Figura 9. Campos de seguridad (Fuente: Robos)	20
Figura 10. Sistemas de Seguridad (Fuente: Egemin y MLR, Ullrich)	20
Figura 11. Sistema de carga por inducción. (Fuente: SEW, Ullrich)	21
Figura 12. Estaciones de carga de AGV (Fuente: DS, Ullrich)	22
Figura 13. Uno de los primeros AGV construido en 1954 (Fuente: Barrett-Cravens/Savant Automation (1958), Ullrich)	24
Figura 14. Manufactura de automóviles en 1986 (Fuente: DS, Ullrich)	24
Figura 15. Publicaciones de investigación sobre AGV. (Fuente: Feledy y Luttenberger, 2017)	25
Figura 16. AGV utilizado como trailer en la industria automotriz (Fuente: DS, Ullrich)	26
Figura 17. AGV utilizados para la manipulación de rollos de papel (Fuente: Egemin, Ullrich)	26
Figura 18. Transporte de cargas pesadas en plantas de producción. (Fuente: MLR, Ullrich)	27
Figura 19. AGV en hospitales. (Fuente: Stanford Hospital)	27
Figura 20. Sistema AS/RS. (Fuente: Dematic)	28
Figura 21. Sistema Multishuttle. (Fuente: Dematic)	28
Figura 22. Flujo de proceso de recepción. (Elaboración propia)	35
Figura 23. Proceso de expedición. (Fuente: Elaboración propia)	35
Figura 24. Diagrama de flujo de expedición. (Elaboración propia)	36
Figura 25. Proceso de picking manual. (Fuente: Elaboración propia)	37
Figura 26. Diagrama de flujo de picking manual. (Elaboración propia)	38
Figura 27. Cross-docking por sorter. (Fuente: Elaboración propia)	39
Figura 28. Diagrama de flujo Cross-docking de sorter. (Elaboración propia)	40
Figura 29. Rack doble profundidad. (Fuente: Elaboración propia)	41
Figura 30. Rack simple profundidad. (Fuente: Elaboración propia)	41
Figura 31. Media balda. (Fuente: Elaboración propia)	42
Figura 32. Balda con división en 3. (Fuente: Elaboración propia)	42
Figura 33. Balda con división en 4. (Fuente: Elaboración propia)	42
Figura 34. Picking modelo ECE 225 y Carretilla modelo ERE 120, ambos marca Jungheinrich. (Fuente: Jungheinrich) [18]	46
Figura 35. Picking marca Linde y modelo N20, y autoelevador marca Heli y modelo CPCD 25. (Fuente: Linde y Heli)	47
Figura 36. Auto elevador Jungheinrich modelo ETV 214 y auto elevador Jungheinrich modelo ETV 325. (Fuente: Jungheinrich)	47
Figura 37. Tipo de empaquetado – Pallet , Caja, Pack, Unidad de izquierda a derecha. (Fuente: Schneider)	49
Figura 38. Lógica de recorrido del sistema para sector Textil. (Elaboración propia)	50
Figura 39. Ejemplo de etiqueta de una ubicación. (Fuente: elaboración propia)	51
Figura 40. PDA utilizada por operarios. (Fuente: Slon)	51
Figura 41. Carretillas de gran altura automatizadas marca Jungheinrich y modelo EKX 514a/ 516ka/ 516a. (Fuente: Jungheinrich)	56
Figura 42. Operación de recepción y expedición. (Fuente: elaboración propia)	57

Figura 43. Transpaleta auto guiada modelo ERE 225 y marca Jungheinrich. (Fuente: Jungheinrich).....	57
Figura 44. Operaciones de picking. (Fuente: elaboración propia).....	58
Figura 45. Order picker autoguiados. (Fuente: Swisslog).....	58

3.2 ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Layout de todo el depósito.	31
Plano 2. Distribución de ubicaciones según sectores de Almacenamiento y Reposición.....	43
Plano 3. Muelles y canales desde el 1 al 14 de recepción y expedición.	44
Plano 4. Ubicaciones adjudicadas para Operación de Picking por familia.....	45
Plano 5. Lógica de recorrido del Sistema para todo el depósito.	52
Plano 6. Diagrama de hilos para ola de Repo. Cajas y ola de Reposición por separado sin combinar.	112
Plano 7. Diagrama de hilos para las olas de Repo. Cajas y Reposición combinadas.....	113

3.3 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operaciones actuales del CDO.	32
Tabla 2. Tiempos por operación (en minutos/ola).	34
Tabla 3. Operaciones de picking.	36
Tabla 4. Listado de equipos actuales del CDO.	46
Tabla 5. Listado de equipos por operación.	47
Tabla 6. Secciones de mercadería.....	48
Tabla 7. Criterio de rotación de mercadería según ubicación.	48
Tabla 8. Tipos de localización y sus dimensiones.....	49
Tabla 9. Clasificación de operaciones por tipo de AGV.....	55
Tabla 10. Carretillas de gran altura automatizadas marca Jungheinrich y modelo EKX 514a/516ka/ 516a.	56
Tabla 11. Especificaciones técnicas de la Transpaleta ere 225a.....	57
Tabla 12. Especificaciones técnicas del Order Picker.....	58
Tabla 13. Clasificación de grupo de operaciones del modelo.....	59
Tabla 14. Distribución de potencia de la operación 1 (Extracción).....	62
Tabla 15. Porcentajes de consumo por equipo.....	63
Tabla 16. Potencia de los distintos cargadores.....	63
Tabla 17. Potencia de los distintos equipos.....	63
Tabla 18. Factor de autonomía de cada equipo.	63
Tabla 19. Conjuntos generales del modelo base.	64
Tabla 20. Parámetros generales de operación del modelo base.....	64
Tabla 21. Parámetros generales de tiempos del modelo base.	65
Tabla 22. Variables del modelo base Fase I.	65
Tabla 23. Variables auxiliares del modelo base Fase I.	65
Tabla 24. Función objetivo del modelo base Fase I.	66
Tabla 25. Restricciones del modelo base Fase I.....	66
Tabla 26. Definición de tiempo inactivo.	67
Tabla 27. Parámetros modelo base Fase II.	67
Tabla 28. Variables del modelo base Fase II.	67
Tabla 29. Variables auxiliares del modelo base Fase II.	67
Tabla 30. Función objetivo del modelo del Caso Base Fase II.....	68
Tabla 31. Restricciones del modelo base Fase II.....	68
Tabla 32. Definición de tiempo inactivo.	68
Tabla 33. Comparativa de tiempos de operación entre manual y AGV.....	76

Tabla 34. Estudio de mercado. (Fuente: Kollmorgen)	84
Tabla 35. Cantidad de AGV a comprar anualmente.....	85
Tabla 36. Inversión total para la inversión inicial en AGV.....	85
Tabla 37. Costos operativos anuales para el sistema de AGV.	86
Tabla 38. Cantidad de equipos manuales a comprar anualmente.	87
Tabla 39. Costo operativo anual del sistema actual	87
Tabla 40. Parámetros para el flujo de fondos y VAN.	88
Tabla 41. Flujo de fondos comparativo y VAN.	88
Tabla 42. Distribución de operaciones por equipos manuales y tiempos de operación.	91
Tabla 43. Cantidad de equipos manuales requeridos para cumplir la demanda por turno. .	92
Tabla 44. Cantidad de equipos para los distintos casos.....	92
Tabla 45. Cantidad de equipos manuales que no requieren ser utilizados en la operativa actual.....	93
Tabla 46. Cambios en los costos operativos optimizando la situación actual.	94
Tabla 47. Flujo de fondos comparativo con la situación actual optimizada.	94
Tabla 48. Comparación de vehículos entre demanda máxima y promedio.	100
Tabla 49. Inversión total para la instalación de AGV con recambio de batería.....	105
Tabla 50. Costos operativos anuales para el sistema de AGV con recambio de batería.	106
Tabla 51. Flujo de fondos para el sistema con recambio de batería.	106
Tabla 52. Tiempo inactivo para cada equipo en cada turno.	108
Tabla 53. Porcentaje del tiempo total semanal de cada equipo que se dispone para cada tipo de operación.	108
Tabla 54. Aumento de productividad con aprovechamiento de tiempo inactivo.	109
Tabla 55. Comparativa de cantidad de olas totales realizadas por todos los equipos.	109
Tabla 56. Operaciones combinables.	111
Tabla 57. Recorrido de dos olas de operaciones ejemplo para ciclos combinados.....	111
Tabla 58. Distancias y tiempos de dos olas de operación sin combinar.	111
Tabla 59. Combinación de dos olas de operación.....	112
Tabla 60. Comparación de distancias de recorridos combinados vs sin combinar.	114
Tabla 61. Comparación de tiempos de recorridos combinados vs sin combinar.	114
Tabla 62. Comparación de alternativas en cantidad de equipos.....	116
Tabla 63. Comparación de alternativas en flujo de fondos.	117

3.4 ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Referencia de Perfil de cantidad de olas para un tramo del año.	54
Gráfico 2. Perfil de semana de máxima demanda operaciones acumuladas (en cantidad de olas).....	54
Gráfico 3. Perfil de demanda promedio de operaciones acumulada (en cantidad de olas)..	55
Gráfico 4. Perfil de cantidad de mínima de equipos, por turno, por día.	69
Gráfico 5. Mínima cantidad de equipos requerida por día.	70
Gráfico 6. Cantidad mínima requerida por cada tipo de AGV.	70
Gráfico 7. Porcentaje de tiempo inactivo para cada tipo de AGV, por día, por turno.....	71
Gráfico 8. Porcentaje de tiempo de carga para cada tipo de AGV, por día, por turno.....	72
Gráfico 9. Tiempos totales de la carretilla, por día, por turno.....	73
Gráfico 10. Tiempos totales de las transpaletas, por día, por turno.	74
Gráfico 11. Distribución de tiempos totales semanal en las transpaletas.....	74
Gráfico 12. Tiempos totales de los order pickers, por día, por turno de cada equipo.	75
Gráfico 13. Distribución de tiempos totales semanal order pickers.....	75
Gráfico 14. Tiempos totales comparativos de operación.	78
Gráfico 15. Porcentaje comparativo de operación con la situación actual.	79
Gráfico 16. Comparación de cantidad de equipos requeridos.	80

Gráfico 17. Comparación de tiempos totales con situación actual.	81
Gráfico 18. Comparación tiempo inactivo con situación actual.	82
Gráfico 19. Recuperación de la inversión del Caso Base.	89
Gráfico 20. Recuperación de la inversión para la comparación con la situación actual optimizada.....	95
Gráfico 21. Perfil de cantidad de equipos sin compartir equipos, Modelo 2.	96
Gráfico 22. Perfil de cantidad equipos caso base.	96
Gráfico 23. Tiempos de la carretilla totales sin compartir operaciones.	97
Gráfico 24. Tiempos de la carretilla totales del caso base.....	97
Gráfico 25. Crecimiento de cantidad de equipos requeridos frente a crecimiento anual de la demanda en un 20%.....	98
Gráfico 26. Comparación de cantidad de Carretillas frente a crecimiento anual de la demanda del 20% , curva Lineal vs Real.....	99
Gráfico 27. Comparación de cantidad de Order Picker frente a crecimiento anual de la demanda del 20% , curva Lineal vs Real.....	99
Gráfico 28. Comparación de cantidad de Transpaletas frente a crecimiento anual de la demanda del 20%, curva Lineal vs Real.	100
Gráfico 29 Comparación de tiempo inactivo para cada demanda.	101
Gráfico 31. Distribución de tiempo para el order picker en el caso de demanda promedio.	102
Gráfico 32. Distribución de tiempo para el oreder picker en el caso de demanda promedio.	102
Gráfico 33. Perfil de cantidad de equipos con recambio de batería, Modelo 3.	103
Gráfico 34. Perfil de cantidad equipos caso base.	104
Gráfico 35. Recuperación de la inversión para el sistema de recambio de baterías.	107
Gráfico 36. Comparación de cantidad de olas realizables aprovechando tiempo inactivo frente a las realizadas en el Caso Base.....	110
Gráfico 37. Comparación de distancias de recorridos combinados vs sin combinar.....	113
Gráfico 38. Comparación de tiempos de recorridos combinados vs sin combinar.	114
Gráfico 39. Relación entre la utilidad y el número de vehículos. (Fuente: Sinriech & Tanchoco) [19]	116
Gráfico 40. Flujos de fondo acumulados para los cuatro escenarios planteados.....	117

4 INTRODUCCIÓN

En este informe queremos aportar soluciones a problemas que se encuentran en la cadena de abastecimiento de bienes materiales proponiendo tecnología avanzada y utilizando un modelado matemático que permita introducir mejoras en procesos que se desarrollan actualmente. Cada vez es más generalizado el movimiento de productos a lo largo de todo el planeta debido a la globalización que permite fácilmente adquirir bienes de lugares muy distintos lo que implica una gran logística detrás. [1] A nivel local, en las ciudades, también suele agruparse una gran variedad de productos en grandes superficies lo que nos permite elegir el mismo tipo de producto procedente de lugares muy diversos. Con este trabajo buscaremos facilitar y hacer más eficiente parte de este proceso de la cadena de suministros.

Nuestro primer objetivo es presentar un relevamiento bibliográfico conciso y consistente sobre la tecnología que utilizan los vehículos autónomos en centros de distribución, así como los trabajos de investigación al respecto ya que se trata de un área de conocimiento que está en continuo crecimiento y cada vez más utilizada. Nos encontramos con que la mayoría de los aportes sobre el tema son relativamente recientes por lo que nos enfrentamos a un área de conocimiento inmadura que se encuentra lejos de alcanzar su punto más alto. [3] Más allá de lo mencionado anteriormente los AGVs (*Automated Guided Vehicle*) ya son utilizados en muchos lugares y en industrias muy distintas por lo que proporcionan información sólida en el uso cotidiano. [3] También, esta tecnología ha ido evolucionando desde sus comienzos como se presentará más adelante y parece seguir esta línea en el futuro cercano.

El segundo objetivo del trabajo es emplear los conocimientos de la primera parte en un caso de estudio concreto desarrollando un modelado matemático que nos sirva como eje de esta aplicación concreta. Nuestro caso de estudio se ubica en el Centro de Distribución de la empresa que tiene el desafío de abastecer los productos de más de ochenta sucursales en todo Uruguay. En primer lugar, debimos relevar las operaciones que se llevan a cabo para poder entenderlas en profundidad y conocer los detalles técnicos y la finalidad que cada una desempeña. En función del conocimiento que nos aportó el relevamiento creamos un modelo matemático que representara la operativa actual que nos interesaba en el marco de introducir vehículos autónomos para las operaciones que fueran convenientes.

Una parte importante fue la recolección de datos para que el modelo tuviese sentido y así representar la carga de trabajo que se lleva a cabo actualmente en el CDO (*Centro de Operaciones*). La gran mayoría de estos datos fueron proporcionados desde la empresa y la parte restante fue obtenida con proveedores y cálculos desarrollados para algunos aspectos concretos del modelo. El objetivo principal fue determinar la cantidad de AGVs necesarios para sustituir los vehículos manuales que se utilizan actualmente para finalmente analizar si esto presentaba una mejora técnica y económica.

Los resultados obtenidos luego de un largo proceso de trabajo fueron muy alentadores ya que demuestran los beneficios que aportan los AGVs para la industria. Además de la cantidad de vehículos necesarios para poder cumplir con las operaciones propuestas surgieron muchos datos de gran utilidad para poder mejorar el sistema de trabajo actual. El estudio económico desarrollado con los resultados obtenidos da sustento a los beneficios que se pueden obtener en el aspecto financiero para una empresa de esta magnitud como es la trabajada. Finalmente, se presenta una parte importante del trabajo que son los análisis de sensibilidad donde se estudian distintos escenarios desde alternativas en soluciones técnicas, tecnológicas y escenarios de demanda de trabajo.

El documento está organizado de la siguiente forma: en las primeras secciones se introduce el trabajo; en la Sección 5 se ubica el Marco Teórico donde se da a conocer toda la información

necesaria para poder entender en qué consisten los AGVs y la tecnología que utilizan; en la Sección 6 se presenta el Estado del Arte que contempla a los vehículos autónomos en la industria desde sus orígenes hasta sus utilidades más actuales; en la Sección 7 que desarrolla el Caso de Estudio donde se encuentra la Situación Actual, el Alcance del Caso de Estudio, el Tratamiento de los Datos, el Caso Base con todo su desarrollo matemático, la evaluación económica y financiera, y el Análisis de Sensibilidad donde se presenta información muy valiosa sobre posibles alternativas al Modelo; finalmente, en la Sección 8 se delinear las Conclusiones y Recomendaciones del proyecto.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 DEFINICIONES

5.1.1 DEFINICIÓN DE AGV

Un AGV, por sus siglas en inglés “Automated Guided Vehicle”, son vehículos guiados de manera autónoma para cumplir con funciones específicas. En los procesos industriales y logísticos se utilizan una gran variedad de vehículos como herramientas de transporte de mercadería o incluso de personas. Estos vehículos que siempre fueron operados por una o varias personas han ido evolucionando gracias a los grandes avances tecnológicos hasta llegar a ser operados de manera autónoma. Esto puede llevar a una gran reducción de costos acompañado de un aumento de la eficiencia y la seguridad.

Los AGV pueden ser muy variados tanto por las operaciones que realiza como por la tecnología que utiliza para operar de manera autónoma, en lo que se ahondará más adelante. A modo de ejemplo, uno de los AGV más representativos es el auto elevador que trabaja en un depósito sin la necesidad de una persona que lo conduzca, sino que lo hace por cuenta propia siguiendo las indicaciones del sistema informático que le indica a qué posición de estantería debe llevar el pallet o trasladarlo desde su ubicación al lugar de expedición.

Esta tecnología sigue en continuo crecimiento, tanto en la variedad de operaciones que puede realizar como en el desarrollo de las herramientas que utiliza que lo lleven a ser más eficiente, seguro y económico.

5.1.2 SISTEMAS DE AGV

Un sistema AGV es un conjunto de vehículos guiados de manera autónoma que trabajan de manera sincronizada siguiendo las indicaciones de un sistema informático para cumplir con un determinado proceso. Este sistema determina tareas específicas para cada AGV que deben seguir determinados trayectos y respetar las restricciones del sistema.

El diseño de un sistema de AGVs es uno de los principales desafíos, puede resultar una tarea compleja que requiere mucho estudio previo. Los sistemas tienen muchas variables que necesitan ser determinadas para poder llevarlo a cabo y así obtener un sistema eficiente. Para la implementación de un Sistema de AGVs se requiere de una gran inversión inicial tanto en equipos como en acondicionamiento, por lo que, generalmente se incorporan una variedad de equipos iniciales para justificar su rentabilidad.

5.1.3 DISEÑO DE UN SISTEMA DE AGVs

A la hora de diseñar un sistema es necesario evaluar múltiples variables donde se destacan principalmente el tipo de proceso a llevar a cabo y por lo tanto el tipo de AGV, la cantidad óptima de vehículos para que se cumpla con los requerimientos, la tecnología de guiado más conveniente, las trayectorias que van a seguir, el tipo de material que se va a trasladar, los puntos de carga de las baterías y los sistemas de seguridad presentes. Además, es necesario acondicionar el lugar de trabajo donde van a funcionar los AGV para que puedan hacerlo sin inconvenientes.

5.1.4 OBJETIVOS DE UN SISTEMA DE AGVs

El objetivo principal de un sistema de AGV es que se pueda desarrollar el tipo de proceso que se desea de la mejor forma posible. Con la implementación de un sistema AGV se busca la reducción de costos, disminuir la probabilidad de errores y aumentar la eficiencia.

En la industria encontramos múltiples procesos que operan con vehículos tripulados que se lanzan a la implementación de AGVs, este suele ser un proceso difícil porque muchas veces implica cambios organizativos importantes y una gran inversión para el acondicionamiento del

lugar. Por otro lado, es mucho más fácil incorporar un sistema AGV si se trata de un lugar de trabajo que se va a construir para esta finalidad concreta.

5.1.5 CATEGORÍAS DE AGV

En la Industria existen múltiples variedades de AGVs para usos muy variados y es un sector que sigue en crecimiento por el potencial que tiene para los procesos industriales y por el avance continuo de la tecnología en esta área. A continuación, se describen las principales categorías de AGVs que son más comunes en la industria, dentro de cada categoría hay una gran variedad de vehículos según el fabricante, el tipo de tecnología que utilizan o la industria en la que se encuentran.

5.1.5.1 MONTACARGAS AGV

Es el equivalente al montacargas tradicional, sus operaciones son muy variadas y es uno de los más usados en la industria ya que su unidad de traslado es el pallet. Además, se puede usar de forma independiente o en colaboración con otros varios AGV.



Figura 1. Forklift AGV (Fuente: Danbach)

5.1.5.2 MONTACARGAS MODIFICADO EN AGV

Este tipo de AGV tiene principalmente las mismas funcionalidades que el caso anterior. Se trata de los montacargas tradicionales construidos para ser operados manualmente pero que pueden ser transformados en AGV fácilmente. Mediante modificaciones sencillas, agregando sensores, sistemas de seguridad y otros componentes se pueden automatizar.

Se debe prestar atención al hecho de que, en los vehículos de serie modernos, se incluyen grupos de componentes electrónicos para guiar como sensores, lo que los hace propicios para la automatización. (Ullrich, 2015)



Figura 2. Forklift AGV adaptado (Fuente: Danbach)

5.1.5.3 TRANSPORTES UNITARIOS DE CARGAS

También denominado “Piggyback” consiste en un tipo de AGV que su único objetivo es el traslado de cargas unitarias como pueden ser pallets, pero puede variar mucho según el tipo de industria. A diferencia de los anteriores, este tipo de vehículo no trabaja en altura, ni tomar la mercadería y depositarlas en lugares de destino con distinto nivel de altura. Pueden contener rodillos para que se pueda cargar y descargar de forma mecánica.



Figura 3. Vehículo de transportes unitarios de cargas (Fuente: Frog)

5.1.5.4 VEHÍCULOS DE ARRASTRE

El vehículo de arrastre es un AGV que tiene como finalidad remolcar cargas móviles a un lugar de destino. Este vehículo no tiene la capacidad de cargar material.



Figura 4. Vehículo de arrastre (Fuente: JBT)

5.1.5.5 CARRETILLAS DE ESTANTES

Se trata de AGV especialmente diseñados para transportar estantes o componentes puntuales. Suelen ser parte de un gran sistema de AGVs donde trasladan las estanterías con los productos deseados a la zona de pedidos, por ejemplo. Es un concepto de AGV mucho más moderno que los anteriores y su uso es más concreto y masivo en el proceso donde se encuentre.



Figura 5. Carretillas de estantes (Fuente: ElectroCraft)

5.1.5.6 VEHÍCULOS DE LÍNEA DE ENSAMBLE

Con un concepto similar al anterior, los AGVs utilizados en líneas de ensamblaje consiste en un vehículo que transporta un producto que se debe ir ensamblando de a partes recorriendo distintos sectores siempre sobre el AGV. A diferencia de las líneas de ensamblaje tradicionales donde existen cuellos de botella, este sistema permite evitarlo balanceando el flujo por cada sector.



Figura 6. Vehículos de línea de ensamble (Fuente: dpm)

5.1.5.7 VEHÍCULOS DE CARGA PESADA

La presente categoría de AGVs se encuentra en industrias donde es necesario mover grandes cargas de manera sistemática, principalmente en la industria del acero o del papel. (Ullrich, 2015). Es importante considerar que se trata de vehículos de mayores dimensiones y pueden diferenciarse en las unidades de potencia, por ejemplo.

5.1.5.8 AGV PORTA CONTENEDORES

Se trata de vehículos usados al aire libre principalmente para el traslado de contenedores o de cargas muy grandes y pesadas. A diferencia de los vistos anteriormente no son solo eléctricos, también pueden usar motores Diesel para trasladarse. (Ullrich, 2015)



Figura 7. AGV porta contenedores (Fuente: Konecranes Gottwald)

5.1.5.9 AGV MODIFICADOS

Es pertinente incluir esta categoría porque más allá de que dentro de cada categoría que se nombra anteriormente existen muchos tipos de AGV distintos, existen vehículos para necesidades concretas. Por ejemplo, el AGV *pick* que es un tipo de vehículo con diseño similar al de transporte unitario que se utiliza para realizar el proceso de *picking* en centros de distribución. Otro ejemplo es el AGV con brazo mecánico para mover objetos que se utiliza en procesos de manufactura muy específicos.



Figura 8. AGVs modificados (Fuente: Swisslog y Hans Robot)

5.2 ASPECTOS TECNOLÓGICOS

5.2.1 COMPONENTES

Los AGVs están compuestos por muchas partes que determinan el correcto funcionamiento de estos, como pueden ser las unidades de potencia, el tipo de batería, los sistemas de guía, elementos de seguridad. A continuación, se describen los aspectos más importantes.

5.2.2 SISTEMAS DE GUÍA

Un aspecto tecnológico determinante de un AGV es el sistema de guía o navegación que utilizan. Existen distintas tecnologías al respecto que resultan más convenientes dependiendo de la operación que se trate. Se pueden dividir en dos grandes grupos: de navegación fija y navegación abierta. La navegación fija obliga al AGV a seguir un trayecto único ya que deben seguir una guía fija que puede ser un riel, una cinta u ondas inductivas. Mientras que la navegación abierta permite a los AGV moverse de forma abierta, eligiendo la mejor ruta y saltando obstáculos. A continuación, se detalla los distintos tipos que se utilizan siguiendo el estudio de Jing Long y Chun Liang Zhang, 2012. [4]

5.2.2.1 SISTEMA DE GUÍA ELECTROMAGNÉTICA

El AGV se mueve siguiendo las señales inductivas de un cable ubicado debajo de la superficie del piso. El vehículo detecta mediante una antena la frecuencia y sigue el trayecto del cable. Presenta la ventaja de que es simple y seguro, pero por otro lado es muy difícil modificar el path (la ruta).

5.2.2.2 SISTEMA DE GUÍA ÓPTICA

Los vehículos que utilizan este sistema cuentan con un sensor fotoeléctrico para determinar la dirección de la ruta que se encuentra marcada en el suelo mediante una cinta reflectante. Es una tecnología muy económica, pero puede ser dificultoso el mantenimiento de las cintas y tener que modificar las rutas. No es un sistema demasiado confiable.

5.2.2.3 SISTEMA GUIADO POR LÁSER

El sistema guiado por láser consiste en que los vehículos emiten rayos láser que son reflejados por los reflectores ubicados en el lugar donde se mueven para determinar su posición y dirección actuales. Luego, utiliza una triangulación geométrica mediante un sistema de computación para continuar con su traslado. Este sistema puede ser costoso, pero se trata de una tecnología muy exacta que puede ser empleada para múltiples usos. [5]

5.2.2.4 SISTEMA GUIADO INERCIAL

Es un sistema poco frecuente actualmente, pero con grandes perspectivas. Su sistema se basa en el cálculo de la señal de un giroscopio de alta precisión que tiene el AGV y la señal de

posicionamiento en tierra para determinar su propia posición y orientación. Es un sistema preciso y muy costoso.

5.2.2.5 SISTEMA DE GUIADO POR RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES

Los AGV que utilizan esta tecnología pueden reconocer objetos mediante cámaras que les permite determinar el trayecto a seguir. Se trata de un sistema muy inmaduro que se encuentra en etapa de estudio, pero con buenas perspectivas.

5.2.2.6 SISTEMA GUIADO GPS

Consiste en determinar la ubicación mediante satélites. Su uso más conveniente es para vehículos al aire libre que hacen grandes distancias.

5.2.2.7 SISTEMA GUIADO POR CINTA MAGNÉTICA EN EL SUELO

Similar al sistema de guía electromagnética, utiliza una cinta magnética pegada al suelo en vez de un cable ubicado por debajo. Esto lo hace más flexible y barato sin dejar de ser un sistema de navegación fija.

5.2.2.8 SISTEMA DE GUÍA DE ULTRASONIDO

El AGV emite una señal de ultrasonido para identificar los objetos de alrededor y así ubicar su trayecto. No hacen falta reflectores, pero es un sistema complejo de usar si el ambiente no es amigable.

5.2.2.9 SISTEMA DE GUÍA DE VISIÓN

Este sistema compara lo que percibe por medio de una cámara CCD (charge-coupled device) con el mapa que tiene del lugar usando una computadora para aproximar su ubicación. Es un sistema muy costoso y de muy pocas utilidades.

5.2.3 SISTEMA DE CONTROL GUIADO DEL AGV

Los AGV ejecutan las tareas operativas, pero como no son completamente autónomos necesitan un sistema de coordinación que les ayude a comunicarse entre sí y con su entorno.

Un sistema de control guiado AGVs consta de hardware y software. Se centra en un programa que sirve para coordinar múltiples vehículos guiados automatizados y asume la tarea de integrar el AGVS en las operaciones internas.

El AGV también necesita comunicarse con el sistema operativo de logística interno, por ejemplo, el WMS, MRP o ERP, para recibir pedidos e información sobre todo el proceso. Esto se realiza a través del Sistema de Control de Guiado.

Además, el Sistema de Control de Guiado también proporciona al usuario una interfaz para visualizar e interactuar con el AGV. Conecta los diferentes vehículos, los equipos periféricos y el sistema operativo logístico interno.

Hay sistemas en los que no se necesita un sistema de control de guiado. Estos son sistemas simples donde el AGV se mueve hacia adelante y hacia atrás a lo largo de una ruta predeterminada y no requiere ninguna toma de decisiones compleja. En este caso, el sistema no es autónomo y el AGV requiere la interacción humana para darle órdenes de moverse hacia adelante o hacia atrás. Un ejemplo puede ser un solo vehículo tractor que mueve remolques de un lado a otro. Cuando llega a su meta, se detiene, el empleado descarga el remolque y le ordena regresar presionando un botón. La función de un sistema de este tipo es limitada y no puede constar de varios AGV que necesiten comunicarse entre sí, con interfaces periféricas o administrar órdenes de transporte. La utilidad de un sistema de este tipo es la simplicidad, es decir, que no necesita comunicarse con otros sistemas de IT, lo que lo hace fácil de implementar y manejar.

5.2.4 OBSTÁCULOS

La flexibilidad es uno de los principales objetivos de los AGV. Los AGV están diseñados para moverse de un lugar a otro y, dado que se mueven en entornos reales, ocurrirán eventos imprevistos. Un problema con la tecnología actual es cómo evitar obstáculos de manera segura. Con las aplicaciones actuales, el robot está diseñado para detenerse si un obstáculo bloquea la trayectoria de la guía. Las dos aplicaciones de navegación y seguridad no se combinan, lo que hace que el AGV se mueva como una persona ciega, moviéndose a lo largo de su trayectoria hasta que el sensor de seguridad detecta un obstáculo y el AGV se detiene.

Esto se puede comparar con la forma en que los humanos son capaces de predecir los obstáculos futuros y pueden alterar sus caminos antes de que tengan que detenerse. Según Ullrich (2015) la navegación ciega también tiene sus ventajas. Incluso si el sistema es menos flexible, se vuelve más predecible, lo cual es un factor importante por razones de seguridad.

Cuando se opera en el mismo entorno que las carretillas elevadoras manuales o los peatones, es importante que el personal sepa cómo actuará un robot. Sin embargo, Ullrich (2015) también menciona que evitar obstáculos es una función importante para el futuro de los AGVs.

Cuando el AGV está trabajando en un entorno restringido donde el personal capacitado está operando, la tecnología actual es suficiente. Pero se puede identificar un ámbito de uso completamente nuevo para el AGV cuando se logra combinar las aplicaciones de navegación y las de seguridad.

5.2.5 SISTEMA DE SEGURIDAD

La seguridad es un aspecto extremadamente importante para los AGV. Para garantizar que no se produzcan daños a personas u objetos, se recomienda fuertemente a los proveedores que sigan varias normas.

La principal norma de referencia para el Sistema de Seguridad es la EN 1525. Esta regulación permanece desde el 1997 y sigue en vigencia, se trata de las características tecnológicas que un AGV debería tener, y las mismas son:

- Un interruptor de parada de emergencia tiene que ser accesible y fácilmente reconocible para todos.
- Una combinación de señales de advertencia ópticas (luces de advertencia giratorias) y acústicas. Esto incluye luces intermitentes para indicar cambios de dirección como en los automóviles.
- Frenos mecánicos de funcionamiento independiente para garantizar una parada adecuada. Deben ser intrínsecamente seguros, lo que significa que necesitan un suministro de energía para no activarse mientras se conduce. Los frenos deben poder detener el AGV con una carga útil máxima y una inclinación de la trayectoria o pendiente de conducción.
- Un sistema de protección del personal. Tiene que asegurarse de que las personas u objetos ubicados en la ruta de acceso sean reconocidos y que el AGV se detenga antes de que estos resulten heridos o dañados. Estos sistemas pueden ser mecánicos que reaccionan al contacto o sensores sin contacto que escanean el área adelante usando láser, radar, infrarrojos o ultrasonido y se detienen si hay algo en el camino. Si es mecánico, el contacto con un ser humano no puede exceder los 750 N y el AGV debe apagarse en el momento del contacto (Ullrich, 2015).

La característica más central y tecnológicamente avanzada del sistema de seguridad AGV es el sistema de protección del personal. Hace un par de décadas esto consistía en sensores táctiles.

Las características de seguridad ahora se han modernizado y consisten en sensores láser avanzados. Las áreas de uso de los dispositivos difieren en las posibles velocidades de conducción y las distancias de frenado resultantes. Las áreas de protección se adaptan a la situación para tener en cuenta los cambios de velocidad, dirección, curvas y maniobras.



Figura 9. Campos de seguridad (Fuente: Robos)

Se definen dos campos de seguridad, cuando el AGV detecta una persona o un objeto en el primer campo, se ralentiza. Si se detecta una persona o un objeto en el segundo campo, llamado campo de protección se detiene.

Con todas estas características de seguridad, todavía hay áreas en el funcionamiento de un AGV que pueden ser peligrosas, por ejemplo, la transferencia de carga. El enfoque más simple para asegurarse de que se evite el peligro para las personas es restringir el acceso a áreas relevantes. Cuando esto no sea posible, se pueden utilizar marcadores de piso o zonas de peligro designadas. Las señales de advertencia visual y acústica también se pueden utilizar junto con sensores especiales para reconocer personas y otros obstáculos. Las intersecciones también son áreas en las que puede ser útil introducir medidas de seguridad adicionales como semáforos o espejos parabólicos si los AGV y las personas van a trabajar en la misma área.



Figura 10. Sistemas de Seguridad (Fuente: Egemin y MLR, Ullrich)

5.2.6 BATERÍAS

Los AGV generalmente funcionan con energía eléctrica con una batería que debe cargarse. Los AGV para exteriores y más grandes que pueden transportar cargas de varias toneladas a veces funcionan con diésel.

Las baterías más comunes que se encuentran en los AGV son baterías de plomo-ácido (electrolito líquido), baterías de plomo-gel (electrolito unido) y baterías de níquel-cadmio (electrolito líquido).

Existen baterías más modernas como las de hidruro metálico de níquel y de iones de litio, pero que no forman parte de los estándares tecnológicos para los AGV, pero han comenzado a utilizarse en la industria.

5.2.7 SISTEMAS DE CARGA

Los AGV deben recibir energía para la navegación, los sistemas sensoriales, los componentes mecánicos móviles y los equipos de transferencia de carga. La forma en que se carga el AGV puede tener un impacto significativo en la forma en que funciona un sistema de manipulación de materiales. La carga en momentos inconvenientes puede afectar el tiempo operativo y aumentar el tamaño de la flota de AGV necesaria. Según McHaney (1995), el uso de la batería a menudo se omite en la investigación de AGV, lo que puede conducir a simulaciones engañosas. Sin embargo, también argumenta que hay ciertas circunstancias en las que las limitaciones de la batería no afectan la producción operativa. Estos casos incluyen sistemas con interrupciones que ocurren naturalmente, cambios de turno que coinciden con el cambio o la carga de la batería, sistemas con grandes cantidades de tiempo de inactividad y sistemas donde la carga se puede regular y garantizar que se lleve a cabo sin afectar el sistema. Los AGV pueden equiparse con baterías de tamaño suficiente para durar un turno completo y se pueden hacer arreglos para cambiar o cargar las baterías de AGV fuera del turno sin afectar el sistema.

5.2.7.1 MÉTODOS DE CARGA

Hay tres métodos habituales de carga utilizados por los AGVs que se utilizan en la actualidad. Se trata de baterías de tracción de carga, transferencia de energía sin contacto y sistemas híbridos.

La carga de las baterías de tracción es el método de carga clásico que se utiliza en la mayoría de las áreas de la tecnología en la actualidad. Aquí, el AGV se carga en una estación de carga al tener contacto con una fuente de energía.

El segundo método de carga es la transferencia de energía sin contacto que se realiza por inducción. Aquí, un conductor en forma de una sola bobina está montado en el piso, corriendo a lo largo del recorrido del AGV. El circuito secundario está montado cerca del piso en el AGV donde la energía inducida se pone a disposición del vehículo. La carga se realiza a través del espacio en el aire y no requiere mantenimiento ni desgaste. Este método de suministro de energía es bueno para diseños de AGVS simples, ya que las bobinas deben colocarse en el piso donde se va a mover el AGV.



Figura 11. Sistema de carga por inducción. (Fuente: SEW, Ullrich)

El tercer método que menciona es un sistema híbrido. Este es un sistema de suministro de energía que consta de transferencia de energía sin contacto y una batería auxiliar. La batería auxiliar es considerablemente más pequeña que las baterías de tracción mencionadas

anteriormente y solo cumple tareas limitadas. Las razones por las que una batería auxiliar puede ser útil son, por ejemplo, que a veces todas las áreas de un diseño no pueden equiparse con un conductor doble. Esto hace que la posibilidad de usar una batería en ciertas áreas sea muy útil. También puede ser útil en caso de una avería en la que el vehículo pueda salirse del trazado utilizando la batería sin molestar a los otros AGV.

5.2.7.2 ESQUEMAS DE CARGA

McHaney (1995) presenta cinco esquemas de tarificación diferentes para AGVs. Estos son los siguientes: cambio manual de batería, cambio automático de batería, carga de oportunidad, carga automática y carga combinada. Los mismos se explican a continuación

- **CAMBIO MANUAL**

Uno de los esquemas de batería AGV más básicos es el intercambio manual. Cuando el nivel de la batería cae por debajo de cierto porcentaje, el AGV se enruta a una estación donde la batería se cambia manualmente a una completamente cargada.

- **CAMBIO AUTOMÁTICO**

El cambio automático es similar al manual, pero con una máquina que se usa para cambiar la batería. La operación de intercambio automático tarda en la mayoría de los casos menos tiempo en completarse que un intercambio manual.

- **CARGA DE OPORTUNIDAD**

La carga de oportunidad es el uso del tiempo de inactividad natural para reponer las baterías. Se utiliza cuando los AGV tienen muchas paradas predecibles breves. Los cargadores de batería están ubicados cerca de las ubicaciones de parada del AGV y los AGV se cargan mientras esperan su próxima tarea. Si se planifica correctamente, la carga de oportunidad tiene poco o ningún efecto en el tiempo de funcionamiento, ya que se utiliza el tiempo de inactividad existente. Esto significa que la cantidad de vehículos necesarios no se verá afectada.

- **CARGA AUTOMÁTICA**

En AGVs con rutas no predecibles y pocas oportunidades de carga, se puede utilizar la carga automática. Con este esquema, el AGV funcionará hasta que la batería se haya agotado a un cierto porcentaje. En este momento el AGV irá y cargará sus baterías en una estación de carga donde permanecerá hasta que la batería se recargue a un nivel aceptable. La carga automática puede tener un efecto en la cantidad de AGV necesarios en un sistema, ya que el tiempo de recarga de la batería se agrega al tiempo de operación del AGV. Las baterías de ácido pb se utilizan con frecuencia en caso de carga automática o cambio de batería, ya que están diseñadas para una descarga de ciclo profundo.



Figura 12. Estaciones de carga de AGV (Fuente: DS, Ullrich)

- **CARGA COMBINADA**

La carga combinada es un cruce entre la carga de oportunidad y la carga automática. Esto puede funcionar de dos formas. O el AGV puede operar con un sistema de carga de oportunidad, pero cuando se alcanza un agotamiento de un cierto porcentaje, los AGV se enrutan a una

estación de carga donde permanecen durante más tiempo. La otra versión también se basa en el esquema de carga de oportunidad, pero con la característica de que cuando un AGV comienza a cargarse, se mantiene allí hasta que la batería regrese a un nivel aceptable. Un enfoque combinado puede aumentar la flota de AGV, pero no tanto como con la carga automática, ya que se utiliza el tiempo de inactividad.

5.3 VENTAJAS

5.3.1 FLEXIBILIDAD

Estos sistemas son mucho más flexibles comparados con otros sistemas utilizados en el manejo de materiales. Entre sus ventajas se puede nombrar la alta flexibilidad en los cambios que se pueden hacer en sus recorridos lo cual permite un mejor uso del espacio. Las tecnologías de guiado de los AGV pueden adaptarse al nivel de flexibilidad que exige cada sector, a sus distintas necesidades de carga y al entorno en el que deben desarrollar su trabajo. Necesidades de cambios en el layout o por ejemplo aumento en las necesidades de producción pueden ser rápidamente implementados con los AGV.

5.3.2 CONFIABILIDAD

Tienen un nivel de confiabilidad muy alta en comparación con otros tipos de sistemas utilizados para el manejo de materiales. Fácilmente el AGV puede ser sustituido por otro en caso de inconvenientes sin causar un paro en el sistema de manufactura.

5.3.3 AHORRO DE INVERSIÓN

El costo de operación de los AGV es menor que el de otros sistemas de manejo de materiales ya que solo se necesita una persona para su programación. Es fácil de realizarle mantenimiento, consume menos potencia y es muy raro que falle logrando que el tiempo muerto del sistema sea bajo gracias a su funcionamiento continuo.

5.3.4 APLICACIONES

Estos vehículos cuentan con varias aplicaciones, entre las más importantes existe el transporte, carga y descarga de materiales y limpieza. Pero tienen la capacidad de que un mismo equipo sea utilizado para distintas aplicaciones.

6 ESTADO DEL ARTE

6.1 HISTORIA

El vehículo guiado automático se inventó en 1953. La idea surgió de un inventor estadounidense que buscaba reemplazar al conductor de un tractor con remolque para el transporte de mercancías. Barret-Craven, (Savant Automation en la actualidad) implementa la invención y el primer sistema de vehículo guiado automatizado se instaló como un tractor-remolque en 1954 en Mercury Motor Freight Company en Columbia, Carolina del Sur, para operaciones de envío de ida y vuelta de larga distancia en la fábrica.

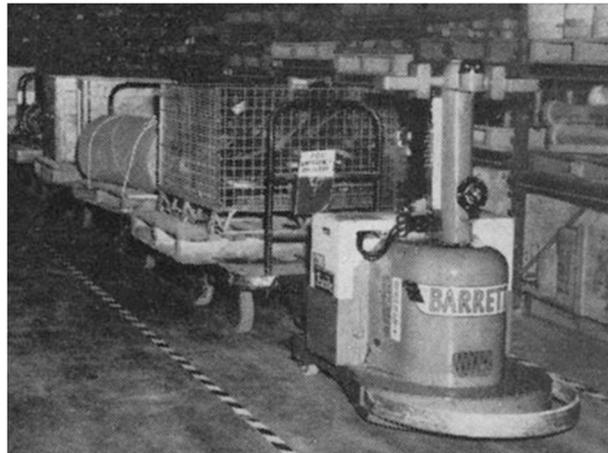


Figura 13. Uno de los primeros AGV construido en 1954 (Fuente: Barrett-Cravens/Savant Automation (1958), Ullrich)

En ese momento, los AGV tenían parachoques de seguridad mecánicos y estaban guiados por un simple cable en el piso o un sensor óptico. Posteriormente, una gran demanda del mercado, principalmente de la industria automotriz, impulsó el desarrollo de tecnología más avanzada a un ritmo rápido. Los AGV venían con muchas ventajas que eran buscadas por la industria. Proporcionaron ahorros de costos, mayor eficiencia, redujeron los daños a los materiales transportados, mayor flexibilidad, mayor utilización del espacio y mayor nivel de seguridad.



Figura 14. Manufactura de automóviles en 1986 (Fuente: DS, Ullrich)

A finales de la década de los 80, la industria se vio afectada por una grave recesión. Los AGV eran costosos y no contribuían con la flexibilidad prometida. En paralelo, se introdujo la producción *just in time* en la industria de fabricación de automóviles japonesa, aumentando la calidad y reduciendo los costos de fabricación. El nuevo enfoque dejó a los AGV como inflexibles a este nuevo método.

A finales de los 90, los nuevos avances tecnológicos permitieron una nueva era de AGVS que eran más flexibles y fiables. Se desarrollaron sensores sin contacto para AGV, lo que hizo posible la guía electrónica.

La guía inductiva activa ya no era la única alternativa; en su lugar, se introdujeron nuevas tecnologías como la navegación láser. También fue posible controlar los AGVS con una PC estándar, lo que facilitó el manejo del sistema.

Esta nueva era continúa hasta el día de hoy, esto se puede ver, por ejemplo, en el número de publicaciones con la frase “Vehículo Guiado Automatizado” en su título, resumen o palabras clave de las primeras publicaciones digitales en 1974, y hasta ahora. Es notorio que la tendencia ha ido en aumento durante este período, con un declive temporal en los años ochenta.

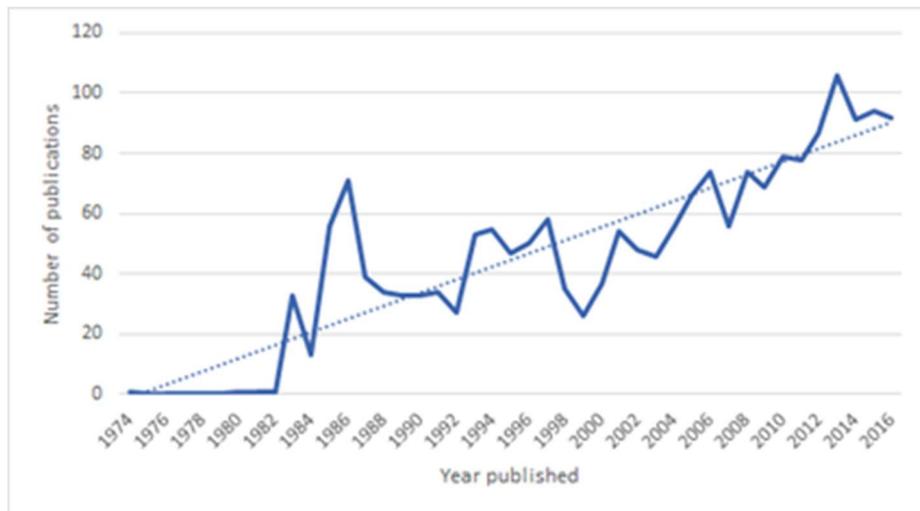


Figura 15. Publicaciones de investigación sobre AGV. (Fuente: Feledy y Luttenberger, 2017)

Desde entonces, la tecnología se ha desarrollado mucho y los AGV modernos tienen muchas más ventajas que los primeros. Los AGV son parte de la gran tendencia de la Industria 4.0 y muchos de los fabricantes de automóviles alemanes están implementando esta nueva tecnología. La tecnología también se está extendiendo a nuevos segmentos de mercado como el minorista. En 2012, Amazon, el minorista de Internet más grande de los Estados Unidos, adquirió el productor de AGVS Kiva Systems e implementó 15.000 AGV en 10 de sus almacenes con el objetivo de reducir los plazos de entrega y aumentar los niveles de servicio al cliente. Este nuevo campo de aplicación aumenta aún más la velocidad del desarrollo tecnológico.

6.2 OTRAS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

6.2.1 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La industria del automóvil está constantemente beneficiándose de las ventajas del uso de la tecnología AGV. En uno de los lugares donde se puede encontrar instalado este tipo de sistema es en la propia cadena de montaje del automóvil.



Figura 16. AGV utilizado como trailer en la industria automotriz (Fuente: DS, Ullrich)

6.2.2 INDUSTRIA DEL PAPEL

En esta industria se suelen manipular rollos gigantes de papel, de un diámetro considerable, que se convierten en productos acabados, tales como toallas, servilletas de papel.

La manipulación de rollos de papel fue uno de los primeros trabajos realizados por AGVs en Europa. Ya a principios de la década de 1970, se intentó automatizar la manipulación y el transporte de los valiosos rollos de papel desde el almacén hasta las máquinas de impresión. Una razón clave para estos esfuerzos fue evitar daños en los rollos, ya que el manejo manual convencional con frecuencia dañaba las capas externas del papel.



Figura 17. AGV utilizados para la manipulación de rollos de papel (Fuente: Egemin, Ullrich)

6.2.3 INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y BEBIDAS

La industria de las bebidas está sujeta a una enorme presión de precios en todo el mundo. Después de grandes inversiones en equipos de producción durante los últimos 20 años, se ha descubierto un potencial de ahorro restante en la intralogística. Las instalaciones de producción de alto rendimiento deben estar adecuadamente abastecidas con botellas vacías y materiales auxiliares, y los productos terminados deben recogerse y entregarse a las instalaciones de almacenamiento provisional y distribución de manera rápida, confiable y rápida. Es por ello que el interés por la intralogística y posteriormente por AGVs ha aumentado considerablemente en los últimos años debido a su potencial de ahorro de costos.

6.2.4 PLANTAS DE PRODUCCIÓN

En la industria de aviación y la fabricación de componentes se utilizan AGV para diseñar líneas de producción flexibles aumentando la capacidad de producción, algunas de las ventajas que se obtienen son:

- Diseño que ahorra espacio
- Mejor accesibilidad al objeto de montaje
- Alta flexibilidad del AGV para facilitar el reacondicionamiento de la línea de montaje
- No hay estructuras fijas en el piso, dejando los caminos y áreas abiertas libres
- Los costos en comparación con los equipos transportadores convencionales son similares.



Figura 18. Transporte de cargas pesadas en plantas de producción. (Fuente: MLR, Ullrich)

6.2.5 HOSPITALES

En particular, las principales tareas de los AGV en los hospitales se refieren al transporte de alimentos, gestión de residuos, transporte de ropa y uniformes, transporte de suministros estériles, medicamentos entre otros.

Otra aplicación especial es el uso de AGV de desinfección, básicamente un robot móvil autónomo con emisor de UV que mata virus y bacterias. Por otro lado, AGV para limpieza de pisos están surgiendo para ayudar a los hospitales y las organizaciones de atención médica a lograr una limpieza constante y una eficiencia operativa.



Figura 19. AGV en hospitales. (Fuente: Stanford Hospital)

6.3 OTRAS TENDENCIAS DEL SECTOR

6.3.1 AS/RS

En el AS/RS existen uno o varios pasillos de almacenaje que son recorridos por una máquina de S/R (Storage/Retrieval). Cada pasillo tiene estantes para almacenar artículos y las máquinas S/R se emplean para colocar o recuperar los artículos en o de dichos estantes.

Cada pasillo del AS/RS tiene una o varias estaciones P&D (pickup-and-deposit) donde los materiales se entregan al sistema de almacenaje o se extraen del sistema. Estas estaciones se pueden manejar a mano o interconectar a alguna forma de sistema de manejo automatizado como un transportador o un AGVS.

Aplicaciones:

- Almacenamiento y recuperación de unidades.
- Recogida de pedidos.
- Almacenaje del trabajo en proceso o en curso, conocido como WIP, sobre todo en producción por lotes y de tipo Job Shop. El AS/RS se utilizará como buffer entre procesos con tasas de producción muy diferentes.
- Almacenamiento de materia prima o componentes para el ensamblaje, para reducir el riesgo de posibles retrasos en las entregas de los proveedores.



Figura 20. Sistema AS/RS.
(Fuente: Dematic)



Figura 21. Sistema Multishuttle. (Fuente: Dematic)

6.3.2 MULTISHUTTLE

Sistema compacto semi automático que utiliza un carro eléctrico para cargar y descargar los pallets en el interior de las estanterías de forma rápida y precisa. [6]

El sistema puede aumentar considerablemente la velocidad, densidad de almacenamiento, precisión y productividad en almacenes, fábricas y centros de distribución.

Aplicaciones:

- Almacenamiento y secuenciado de material
- Procesamiento de pedidos de cajas automatizado
- *Picking* de mercancía a persona
- *Picking* de mercancía a robot

7 CASO DE ESTUDIO

7.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En el desarrollo del proyecto atravesamos distintas etapas para llegar a enfocarnos en nuestro caso de estudio como objetivo principal del proyecto. Lo abordado hasta el momento consistió, en primer lugar, en hacer un estudio exhaustivo sobre la bibliografía disponible y los estudios desarrollados por distintos grupos de investigadores. Es importante destacar que el área de investigación en los AGVs está en continuo desarrollo, tomando un papel destacado en la Industria 4.0.

Luego, trabajamos en un estado del arte sobre los AGVs que nos proporcionó el poder profundizar en el conocimiento de la situación actual del desarrollo de este tipo de vehículos que están siendo cada vez más utilizados en la industria a nivel mundial.

A continuación, se presenta la situación actual de la empresa donde se llevará a cabo nuestro caso de estudio. La información seleccionada que se presenta sobre la empresa fue aportada a través de uno de los integrantes del equipo que trabaja en la misma en el área de ingeniería y proyectos, también en colaboración con otros operarios de la empresa.

A lo largo de la realización del proyecto se trabajó de diversas formas. En primer lugar, por medio de reuniones mensuales del equipo de trabajo con el tutor que fueron claves para orientar el trabajo. Por otra parte, se llevaron a cabo reuniones de equipo de forma semanal, en otras etapas de frecuencia diaria en forma presencial y remota. También cuando se creía necesario se complementaron con reuniones de trabajo más breves para resolver cuestiones concretas. A su vez, se realizaron encuentros con la empresa, de forma remota y presencial para el intercambio de información, conocimiento y datos sobre la empresa. Este tipo de comunicación en muchas instancias consistió en intercambio de mails y mensajes vía celular. También, y sumamente importante fue el asesoramiento de distintos proveedores y la orientación y recomendación de consultores del rubro. En último lugar, los integrantes del equipo trabajamos también de forma individual para cumplir con las tareas propuestas en las reuniones del equipo.

7.2 DEFINICIÓN

El objetivo de nuestro proyecto es determinar la compatibilidad y posibilidad de sustituir los actuales equipos del CDO por AGVs.

Para ello realizaremos inicialmente un análisis de la situación actual de la empresa, generando un primer relevamiento de los datos disponibles y una definición inicial de la operativa. Estudiaremos en particular las operaciones en las que se puede llegar a sustituir los vehículos actuales por AGVs disponibles en el mercado.

Luego, considerando la investigación realizada sobre los AGVs y la evaluación de la situación actual, definiremos un alcance de trabajo para nuestro caso de estudio.

Posteriormente, definiremos nuestro caso base, eligiendo los equipos que mejor se adecúan a las operaciones del CDO. Para cada tipo de AGV seleccionado le asociamos una serie de operaciones, definiendo así distintos grupos de operaciones.

Trabajaremos sobre un modelado de la operación con AGVs, utilizando este como una herramienta de decisión para definir la cantidad mínima necesaria de equipos para cumplir con las necesidades operativas del CDO.

Una vez obtenidos los resultados de nuestro caso base, realizaremos una evaluación económica financiera del proyecto que nos permita concluir sobre la viabilidad de este.

Realizaremos un análisis de sensibilidad y evaluación de alternativas a partir del “modelo base”, donde, por un lado, se plantearán variaciones de distintos parámetros que nos permitirán entender su comportamiento ante las mismas, y por otro, se propondrán modificaciones frente a la idea actual para luego poder evaluar la mejor de estas alternativas.

7.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL CENTRO DE DISTRIBUCIÓN

7.3.1 SOBRE LA EMPRESA

Es una empresa de origen familiar fundada en 1956 que actualmente dispone de 87 locales en todo Uruguay.

El Centro de Operaciones se conoce como uno de los centros de distribución más modernos de la región. El mismo está ubicado sobre la ruta nacional N°8, km 24, en la localidad de Barros Blancos.

Desde allí se distribuye la mercadería a todos los locales de Montevideo y departamentos en los alrededores. El mismo funciona desde abril del 2013 sobre un terreno de 240 mil metros cuadrados. El centro cuenta con una “caja logística” de 30 mil metros cuadrados y una superficie de 25 mil metros cuadrados destinada a la circulación interna, accesos, playa de maniobras, y recepción de camiones. Cuenta con 50 puertas para la recepción de mercadería llamados “muelles”, 50 ubicaciones de parking para camiones y 2.500 metros cuadrados de cámara de frío.

Es uno de los más modernos de la región, incorporando cada año tecnología que permite mejorar la gestión logística. Su infraestructura permite el acceso simultáneo de más de 50 camiones lo que hace posible efectuar los traslados con gran rapidez y eficiencia.

Brinda servicio de logística y distribución a todas las unidades de negocio. Los servicios abarcan desde la planificación del abastecimiento con proveedores locales y del exterior, la operativa de datos maestros de la compañía, la operación de los diferentes depósitos y la gestión sobre los depósitos tercerizados.

Durante 2019 se buscó transformar el layout del depósito de CDO para incorporar también a BAS como unidad de negocio textil, ya que históricamente el foco y el diseño de la operación habían sido pensados para supermercadismo.

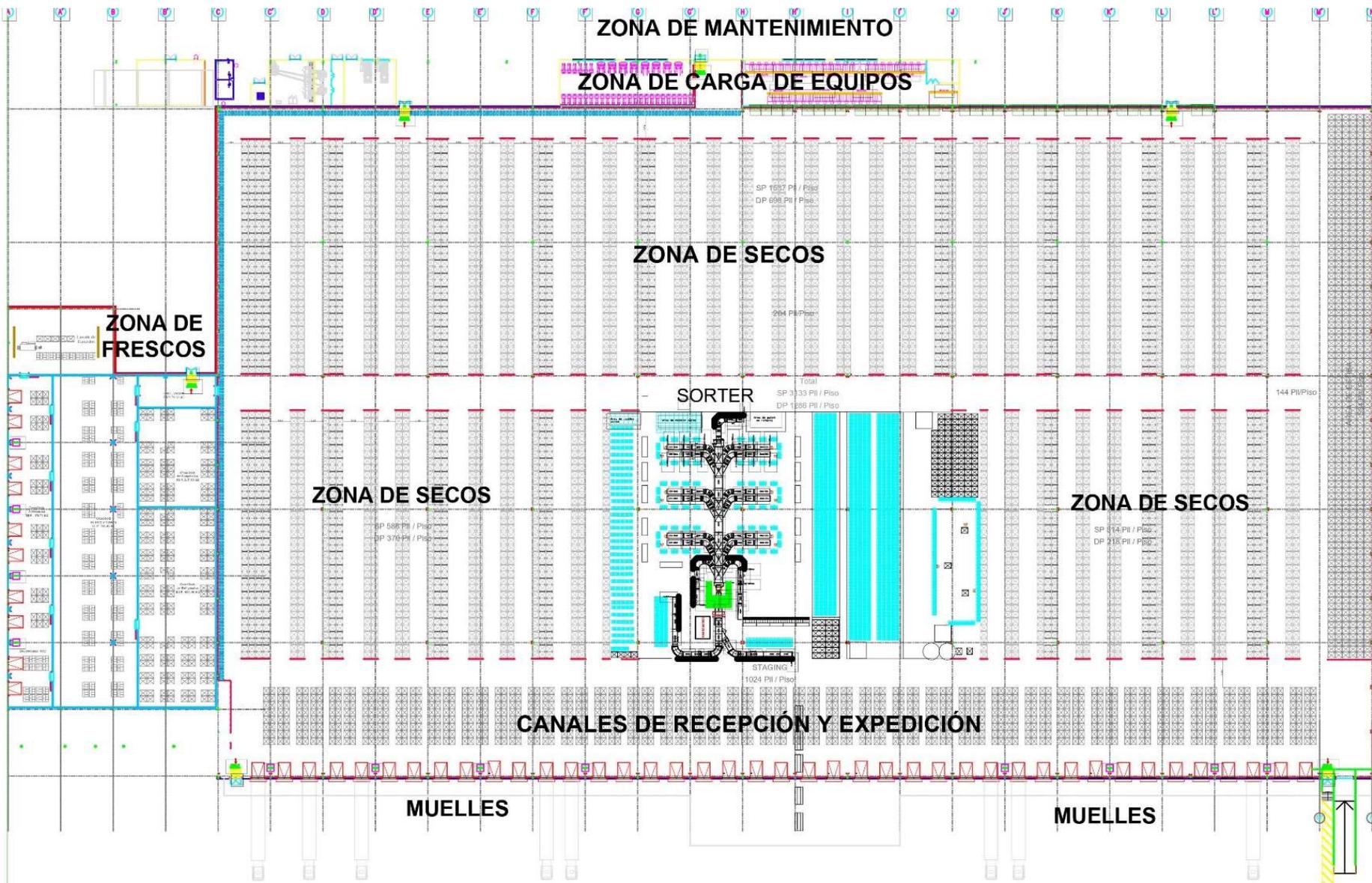
El foco del Centro de Distribución es trabajar como operador logístico y dar servicio de acuerdo con los requisitos del negocio. El 70% de los productos del supermercado se centralizan en el centro de distribución. En 2019 comenzaron a realizar también la planificación de abastecimiento y compra de algunos grupos de productos que tienen entrega descentralizada, como forma de optimizar los niveles de stock y mermas.

El área de logística y distribución impacta directamente en la estrategia del negocio. Desde CDO el objetivo es ser autosustentables económicamente, cubriendo los costos de operación y distribución con los ingresos que se obtienen de los proveedores por concepto de retornos que abonan por tener una logística centralizada con llegada a todo el país.

El centro de distribución se ha enfrentado a un elevado crecimiento expansivo debido a la operación en nuevos rubros de la empresa, generando cambios en la distribución de los productos dentro del centro.

Dado el crecimiento de la empresa en los últimos años se observó la necesidad de lograr un aumento en la mejora del abastecimiento de la demanda, de una forma más eficiente. Lo que es, en gran parte, el motivo de estudio y realización de este trabajo.

7.3.2 LAYOUT ACTUAL



Plano 1. Layout de todo el depósito.

En el *Plano 1* se puede observar el layout de todo el depósito del Centro de Distribución. En el sector sur del plano se pueden visualizar los 41 muelles correspondientes al sector de secos, donde ingresan y egresan los camiones. A su vez, frente a los mismos se ubican los respectivos canales para la carga y descarga de la mercadería. Desde los canales se deposita la mercadería hasta que se lanza la operación de *almacenaje* para la ubicación de la misma. Lo mismo ocurre de forma inversa para el despacho de la mercadería, la cual se deposita en los canales hasta que se cargan los camiones y se despachan.

En el centro del plano, puede observarse el *sorter*, un sistema que realiza la clasificación de productos según sus distintos destinos. En particular se trata del *sorter pop-up*, con el movimiento de rodillos. Allí se realiza de forma automática el armado de pedidos para los distintos locales, con sus 16 brazos que distribuyen la mercadería a partir de un único ingreso.

En el sector norte del plano puede visualizarse el sector de mantenimiento de los equipos, donde se almacenan, se cargan y se realiza el mantenimiento de todos los vehículos que se utilizan en el depósito. Se puede observar el sector de frescos en el sector oeste del plano, el cual se comporta como un depósito paralelo al sector de secos. El mismo cuenta con sus propios muelles y canales para la recepción y despacho de mercadería, al igual que su propio espacio de almacenamiento.

Como se observa en el plano, existen 32 pasillos en el sector de secos. Cada uno de ellos se divide en 35 módulos, que cada uno corresponde a una ubicación de "rack". Los pasillos contienen 2 caras, (de un lado y del otro), las caras se denominan "cara impar", que se le asigna el número 1 y "cara par" asignándosele el número 2 para la nomenclatura de la operativa de la empresa. A su vez, cada módulo tiene 5 niveles que corresponden a 5 ubicaciones de rack en el sentido vertical.

Una ubicación exacta corresponde a un código de 12 dígitos, por ejemplo, "SB- 017-013-01-02", las primeras dos letras corresponden a la sección, los siguientes tres dígitos corresponden al pasillo, los siguientes refieren al módulo, luego se indica el nivel y los últimos dos corresponden a la "cara".

7.3.3 OPERACIONES

A continuación, se listan todas las operaciones que se realizan con equipos manuales dentro del Centro de Operaciones. En la compañía, estas 12 operaciones son agrupadas en *familias* de operaciones, estas son 3; *Almacenamiento y Reposición*, *Recepción y Expedición*, y *Picking*.

Tabla 1. Operaciones actuales del CDO.

Nº	Tipo de operación	Familia
1	Extracción	
2	Almacenaje	
3	Repos. Cajas	Almacenamiento y Reposición
4	Reposición	
5	Reparto	
6	Reparto base	
7	Picking	Picking
8	Reubic. para Reparto	
9	Reubic. para Expe.	
10	Reubic. Pre Recep. Expe.	Recepción y Expedición
11	Recepción	
12	Expedición	

7.3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES

- **EXTRACCIÓN**

Tomar un pallet entero para llevar hacia los canales de expedición en donde se expedirá a los locales.

- **ALMACENAJE**

Ubicar la mercadería desde los canales de recepción hacia la ubicación correspondiente de cada *estadístico*.

- **REPARTO**

Operación en la que en un pallet se encuentran distintos productos y se distribuye hacia sus ubicaciones de *picking* correspondientes.

- **REPARTO BASE**

Operación en la que en un pallet se encuentran distintos productos y se lleva hacia el *sorter*.

- **REPOSICIÓN CAJAS**

Reabastecimiento del nivel de *picking* en posición de balda (almacenamiento en cajas) desde la ubicación de almacenaje.

- **REPOSICIÓN**

Reabastecimiento del nivel de *picking* en posición de rack (almacenamiento en pallets) desde la ubicación de almacenaje (niveles de 2 a 5).

- **REUBICACIÓN PARA EXPEDICIÓN**

Operación para ordenar y preparar la mercadería que será expedida. Movimiento de *caddies* y pallets a expedir a locales.

- **REUBICACIÓN PARA REPARTO**

Operación de ordenar la mercadería recibida con más de un estadístico que luego será almacenada.

- **REUBICACIÓN PRE-RECEPCIÓN EXPEDICIÓN**

Reubicación de mercadería que está en los canales sin un destino final asignado. Disposición y ubicación en un destino provisorio.

- **RECEPCIÓN**

Operación de recepción de mercadería, descarga de pallets desde los camiones hacia los canales.

- **EXPEDICIÓN**

Operación de egreso de mercadería, cargando los pallets hacia los camiones desde los canales.

- **PICKING**

Operación de recolección de mercadería en las distintas ubicaciones correspondientes para el armado de pedido para los locales.

7.3.3.2 TIEMPOS DE OPERACIÓN

En la *Tabla 2* se presentan los tiempos promedios de cada ola de operación en minutos.

Tabla 2. Tiempos por operación (en minutos/ola).

Nº	Operación	Tiempo de operación (minutos/ola)
1	Extracción	5,06
2	Almacenaje	2,85
3	Repos. Cajas	7,65
4	Reposición	7,00
5	Reparto	21,63
6	Reparto base	8,52
7	Picking	26,51
8	Reubic. para Reparto	2,68
9	Reubic. para Expe.	2,71
10	Reubic. Pre Recep. Expe.	9,46
11	Recepción	69,60
12	Expedición	60,76

7.3.3.3 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS

- **PROCESO DE RECEPCIÓN Y EXPEDICIÓN**

PROCESO DE RECEPCIÓN

El proceso de recepción comienza desde el momento en el que el proveedor llega al centro de distribución. Se corrobora que se corresponda el proveedor al horario estipulado y a la mercadería que carga correspondiente. Se le asigna un muelle por donde se realizará la descarga, dependiendo de la mercadería y el proveedor. La descarga es realizada una vez que esté liberado el muelle indicado y a su vez que el canal esté disponible para depositar la mercadería. En el momento en que sean dadas estas condiciones, el camión podrá dirigirse al muelle. Normalmente hay una coordinación previa y estipulada para cada uno de los movimientos de forma que no se generen retrasos en la operación.

Una vez allí se irá descargando la mercadería y depositando en los canales para luego ser almacenadas en sus respectivas ubicaciones.

Cuando la mercadería está en los canales, se realiza el control de calidad de lo que se recibe. Se audita en función del tamaño del lote y del tipo de mercadería antes de expedir a los camiones para no aceptar mercadería no apta, y evitar que el mismo deba volver en otro momento a recoger la mercadería que fue rechazada.

Los tiempos que se tardan desde que el camión se presenta en garita y se va del predio puede variar según el día de la semana, el turno, el tipo de mercadería que despacha y las dimensiones del camión. Hay camiones que pueden tardar 20 minutos en todo el movimiento y otros que pueden llegar a estar varias horas, por los motivos mencionados y también por algún imprevisto o complicación del momento.

Actualmente se tarda aproximadamente 1 hora para la descarga de un camión grande completo (28 pallets), utilizando 2 equipos en simultáneo.

DIAGRAMA DE FLUJO – RECEPCIÓN

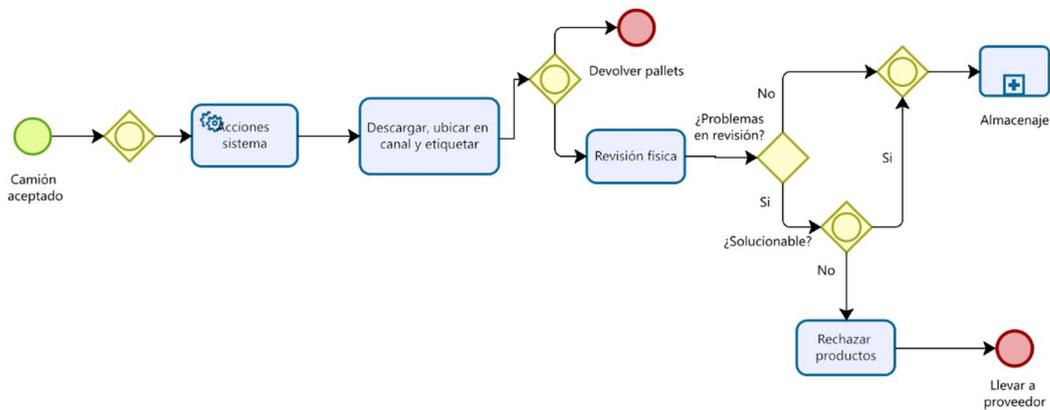


Figura 22. Flujo de proceso de recepción. (Elaboración propia)

PROCESO DE EXPEDICIÓN

El proceso de expedición consiste en el despacho de la mercadería que se distribuye hacia los distintos locales. Los canales ya tienen los pedidos armados y se ordena para su expedición dependiendo de la mercadería y el proveedor. La carga del camión es realizada con carretillas al igual que la descarga en el proceso de recepción y el tiempo de carga es muy variable.

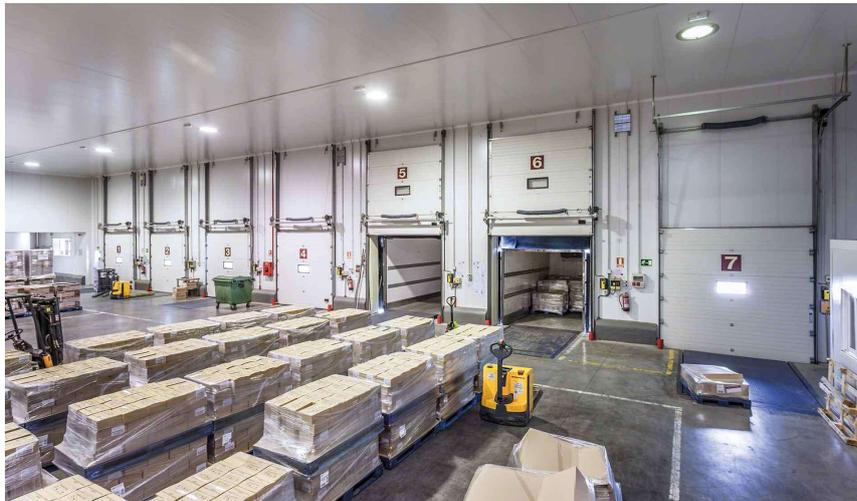


Figura 23. Proceso de expedición. (Fuente: Elaboración propia)

DIAGRAMA DE FLUJO - EXPEDICIÓN

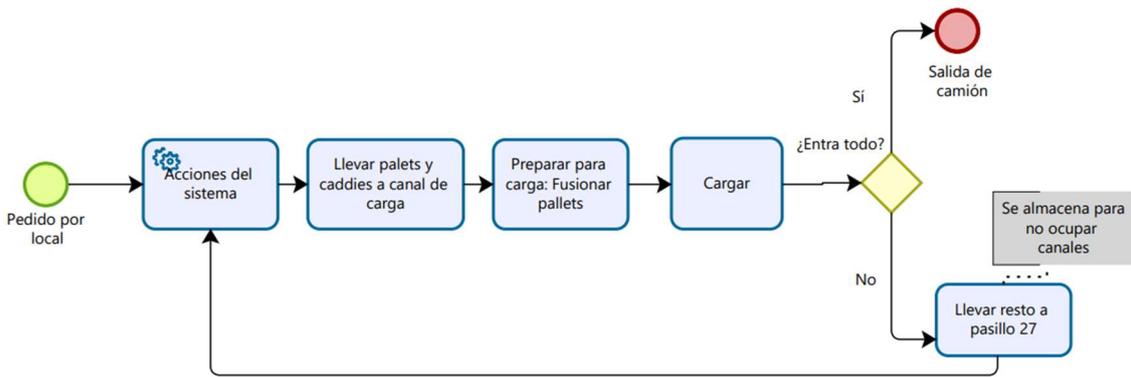


Figura 24. Diagrama de flujo de expedición. (Elaboración propia)

- **PROCESO DE ALMACENAMIENTO Y REPOSICIÓN**

PROCESO DE ALMACENAMIENTO

Cuando la mercadería fue recepcionada y se encuentra posicionada en los canales, el SGA (Sistema de Gestión de Almacenes) recibe la información y se habilita a que se lance la *ola de almacenaje* para que la mercadería sea guardada.

PROCESO DE REPOSICIÓN

El proceso de reposición consiste en reabastecer las ubicaciones de *picking* (ubicaciones del primer nivel), a partir de la mercadería almacenada en los niveles 2 al 5. La reposición se realiza de forma de que nunca existan ubicaciones de *picking* vacías. Estas operaciones son de gran importancia, ya que si hay una descoordinación entre el *picking* y la reposición puede perjudicar la operativa y no llegar al abastecimiento de la demanda.

7.3.3.4 PROCESO DE PICKING

Existen tres alternativas para el armado de pedidos. *Picking* manual, Cross-docking manual y Cross-docking por sorter. Actualmente un 90% de los productos secos siguen la operación de *picking* manual, el restante 10% de los productos secos van por sorter. Los productos frescos solamente en un 5% se realizan por *picking* manual, utilizando un 95% el cross-docking manual.

Tabla 3. Operaciones de picking.

Operación	Productos Secos	Productos Frescos
Picking manual	90%	5%
Cross-docking manual	-	95%
Cross-docking de sorter	10%	-

- **PROCESO DE PICKING MANUAL**

Una vez que el operario ingresa en la PTC, el sistema le indicará un recorrido a realizar. Éste consiste en recorrer las distintas ubicaciones donde debe *pickear* la mercadería para el armado del pedido.

Está operación se realiza con equipos llamados *order pickers*. El operario se dirige hasta la ubicación indicada, baja del vehículo, toma el artículo en la unidad de despacho indicada por el sistema; unidad, pack o caja, lo coloca en el pallet y sigue hacia la siguiente ubicación.



Figura 25. Proceso de picking manual. (Fuente: Elaboración propia)

- **DIAGRAMA DE FLUJO – PICKING MANUAL**

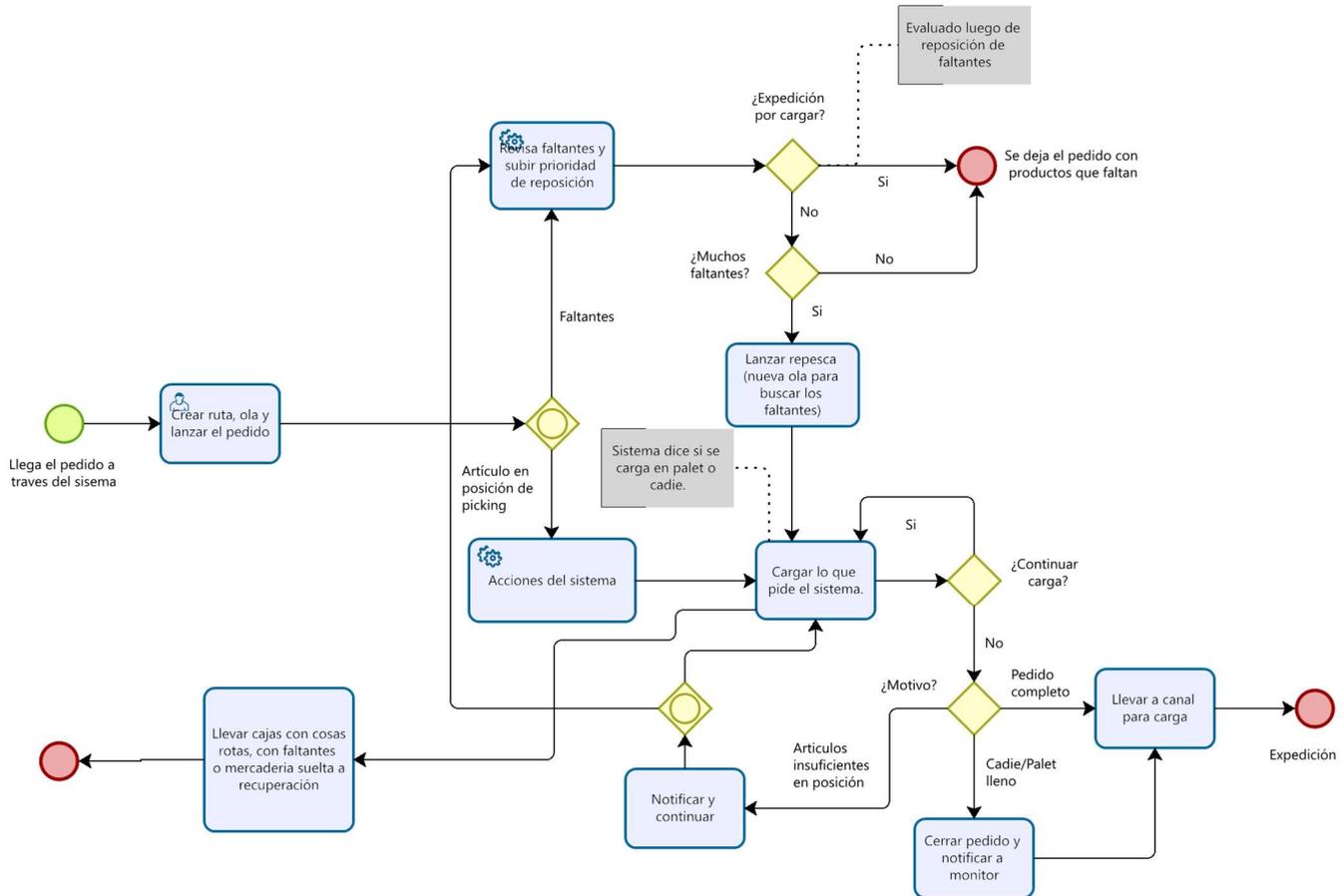


Figura 26. Diagrama de flujo de picking manual. (Elaboración propia)

- **PROCESO DE CROSS-DOCKING MANUAL**

Esta operación se realiza principalmente en el sector de frescos, por ser mercadería que no puede almacenarse durante mucho tiempo por temas de caducidad y por la necesidad de conservarse a determinada temperatura. El cross docking manual consiste en redistribuir la mercadería ubicada en los canales de cross docking y asignarla directamente para los distintos locales. Esto se realiza en el mismo día en el que llega la mercadería al depósito. Se llama “manual” porque es realizada por los operarios. Los mismos realizan un recorrido por cada local, movilizándose en una carretilla con un pallet (que corresponde a un local), recorriendo los distintos canales o ubicaciones de cross dock tomando la mercadería correspondiente a ese local.

- **PROCESO DE CROSS-DOCKING POR SORTER**

Esta operación consiste en el armado de pedidos por medio del “sorter”, donde por medio de sistema automatizado se ingresa la mercadería y la misma, por medio de rodillos distribuye la mercadería entre los distintos brazos del sorter, dirigiendo la cantidad de unidades requerida para cada local, siendo cada brazo un local distinto. Al final de cada “brazo” del sorter se dispone un operario a tomar la mercadería y apilarla en un caddie para que luego este sea despachado al local. El sorter permite distribuir un pallet “mono producto” en distintos caddies “multi producto” según los pedidos correspondientes a cada local. Es una manera eficiente y efectiva de armado de pedido.



Figura 27. Cross-docking por sorter. (Fuente: Elaboración propia)

• **DIAGRAMA DE FLUJO- CROSS DOCKING DE SORTER**

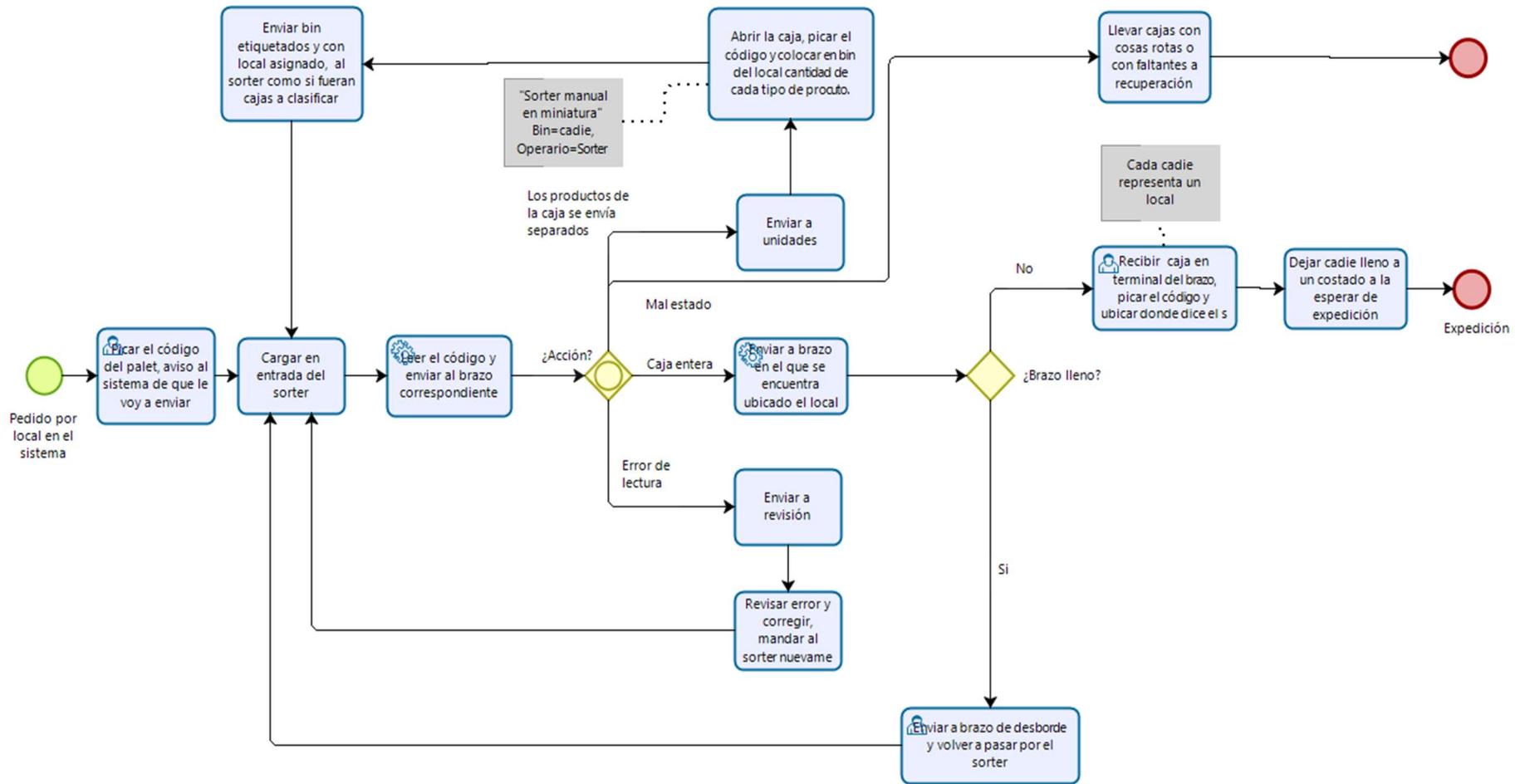


Figura 28. Diagrama de flujo Cross-docking de sorter. (Elaboración propia)

7.3.4 TIPOS DE UBICACIÓN

En todo el depósito existen varios tipos de ubicación:

- Rack doble profundidad: una ubicación de rack que en lo profundo (en un mismo módulo) entran 2 pallets de mercadería



Figura 29. Rack doble profundidad. (Fuente: Elaboración propia)

- Rack simple profundidad: ubicación de rack que tiene solo 1 pallet de profundidad



Figura 30. Rack simple profundidad. (Fuente: Elaboración propia)

- Media balda: está ubicación es una posición de rack dividida en dos en lo vertical. En esta ubicación entra el doble de skus que en la posición de rack



Figura 31. Media balda. (Fuente: Elaboración propia)

- Balda: este tipo de ubicación es para la mercadería de menor volumen, o que se despacha por pack pequeños o unidad. Es la posición de rack subdividida en estanterías. Se tiene 3 tipos de medidas de baldas. Las de 3, 4 y 5 estanterías. En estas ubicaciones pueden entrar 9, 12 y 15 skus respectivamente.



Figura 32. Balda con división en 3. (Fuente: Elaboración propia)

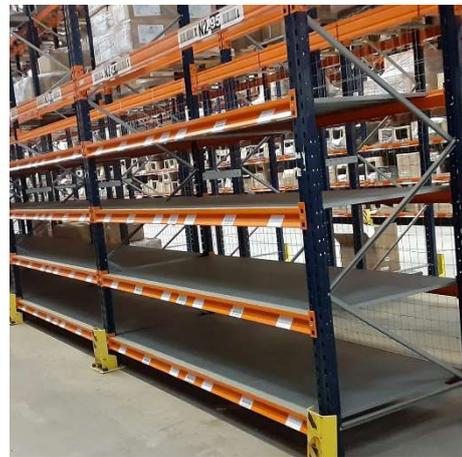


Figura 33. Balda con división en 4. (Fuente: Elaboración propia)

Es importante aclarar que las posiciones de Media balda y Balda son únicamente para el nivel 1 (de *picking*), ya que desde el nivel 2 al 5 todas las posiciones son de rack.

7.3.4.1 UBICACIONES ADJUDICADAS A ALMACENAMIENTO Y REPOSICIÓN

Las ubicaciones que se disponen al almacenamiento dentro del depósito son todos los pasillos del 1 al 32, del nivel 2 al nivel 5, ya que el almacenamiento es siempre en altura, y se dispone el primer nivel para el *picking*. Como se puede observar en el Layout, el almacenamiento se distribuye por secciones (se pueden diferenciar por color en la imagen) adjudicándose a cada sección determinada cantidad de pasillos según el *slotting* que será explicado posteriormente.

7.3.4.2 UBICACIONES ADJUDICADAS A RECEPCIÓN Y EXPEDICIÓN

Dentro de los canales asignados a la operación de *recepción* existen algunos fijos y otros que son compartidos con los de expedición. Se alternan según el turno del día, ya que hay turnos de mayor flujo de ingreso de mercadería y turnos en los que hay mayor flujo de egreso de mercadería.



Plano 3. Muelles y canales desde el 1 al 14 de recepción y expedición.

7.3.4.3 UBICACIONES ADJUDICADAS A PICKING

Las ubicaciones de *picking* corresponden al nivel 1. Todas las posiciones tienen ubicación de *picking* alcanzando un total de 10.243 posiciones de *picking* en la actualidad.

7.3.5 EQUIPOS ACTUALES

Actualmente el Centro de Operaciones cuenta con 53 equipos propios, 10 Auto elevadores, 25 Carretillas y 18 Pickers.

Actualmente se trabaja con las marcas Jungheinrich, Linde, Yale, Heli y Geni, Crown y Still, siendo casi el 90% de los equipos de la primera de estas.

Tabla 4. Listado de equipos actuales del CDO.

Equipo	Marca	Combustible	Capacidad de Carga (KG)
Carretilla	Jungheinrich	Eléctrico	2000
Carretilla	Yale	Eléctrico	1800
Picking	Jungheinrich	Eléctrico	2500
Picking	Linde	Eléctrico	2000
Auto elevador	Jungheinrich	Eléctrico	1400
Auto elevador	Heli	Diesel	2500
Auto elevador	Heli	Eléctrico	1200
Auto elevador	Crown	Eléctrico	2000
Auto elevador	Still	Eléctrico	2000
Auto elevador	Linde	Eléctrico	2000

Algunos de estos equipos mencionados en la *Tabla 4* serán ilustrados a continuación.



Figura 34. Picking modelo ECE 225 y Carretilla modelo ERE 120, ambos marca Jungheinrich.
(Fuente: Jungheinrich) [21]



Figura 35. Picking marca Linde y modelo N20, y autoelevador marca Heli y modelo CPCD 25.
(Fuente: Linde y Heli)



Figura 36. Auto elevador Jungheinrich modelo ETV 214 y auto elevador Jungheinrich modelo ETV 325. (Fuente: Jungheinrich)

7.3.5.1 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS POR OPERACIÓN

Tabla 5. Listado de equipos por operación.

Familia de operaciones	Equipo	Cantidad
Recepción y Expedición	Carretillas	25
Almacenamiento y Reposición	Autoelevadores	10
Picking	Order Pickers	18

7.3.6 MERCADERÍA

7.3.6.1 SECCIONES

Tabla 6. Secciones de mercadería.

Secciones	Tipo
1	Electro
3, 5, 6, 8, 9	Textil
10,11,12,18,19,20,21,22	H&B
11,16	PYL
23,27,28,30,33	Frescos
24, 25, 26	Comestibles
31,34,39,40,41,42,46,47,48,49	Insumos
38	Promociones
44	Uniformes

- *Electro*: Electrodomésticos.
- *Textil*: Ropa, zapatos, accesorios.
- *H&B*: Hogar y Bazar.
- *PYL*: Perfumería y Limpieza.
- *Frescos*: Frutas, verduras, helados, lácteos, etc.
- *Comestibles*: todo tipo de alimentos sin refrigerar.
- *Insumos*: todo tipo de insumos.
- *Promociones*: mercadería en promoción.
- *Uniformes*

7.3.6.2 ATRIBUTOS DE LA MERCADERÍA

- **TIPO DE ROTACIÓN**

Cada producto tiene un tipo de rotación que puede asignarse según distintas variables. El límite establecido por la empresa es de una rotación en una ubicación de hasta 5 reposiciones semanales. Si a lo largo de la semana el producto se repuso más de 5 veces entonces debe cambiarse a una ubicación de mayor espacio. También se considera para esto la volumetría del producto.

Tabla 7. Criterio de rotación de mercadería según ubicación.

Ubicación	Explicación
Rotación rack	Reposición de 1 pallet entero de mercadería
Rotación Media Balda	La reposición de Media Balda se determina por un "movimiento" de mercadería mayor a una caja pero menor a un pallet en esa posición
Rotación Balda	Cuando la reposición de mercadería es menor a la unidad de caja (se mueven unidades), entonces se le llama rotación de balda

- **PESO**

Otro tipo de clasificación de la mercadería es según el peso, se les asigna la letra A, B o C según el rango en el que se encuentra su kilaje en el empaquetado correspondiente a cada ubicación (unidad, caja, pack, pallet). Si el producto en su tipo de empaquetado tiene un peso menor o igual a 5kg, se clasifica con la letra "A", si esta entre 5kg y 10kg se le asigna la letra "B", y con un peso mayor a 10kg, se le asignará la letra "C".

- **APILABILIDAD**

Se lo caracteriza al producto según “liviano”, “mediano” y “pesado” para el orden en el que debería ser apilado. Internamente se les adjudica el número 1, 2 y 3 respectivamente.

- **FAMILIAS**

La mercadería se clasifica en grupos de familias. Las familias reúnen mercadería con características similares.

A modo de aclaración, las familias en las que se agrupa la mercadería no tienen relación a las familias de operaciones mencionadas anteriormente.

- **LOCALIZACIÓN**

El depósito cuenta con distintos tipos de localización, los mismos son adaptados tanto a las distintas formas de empaquetado de la mercadería como a la demanda y rotación de esta. Dependiendo de distintas características de la mercadería es que se localiza en una o más de estos tipos de localización.

Tabla 8. Tipos de localización y sus dimensiones.

	Balda (m)	Media Balda (m)	Rack Simple Profundidad (m)	Rack Doble Profundidad (m)
Volumen (m3)	0.74x1.00x0.36	1.20x1.00x0.65	1.20 x 1.00 x 1.50	1.20 x 2.00 x 1.50

- **CONTAMINABILIDAD**

Se clasifica la mercadería también según su “contaminabilidad”, dada la importancia de conservar por separado los artículos que puedan contaminar con sustancias u olores que puedan hacer que se pierda calidad o inadecuen la mercadería para su venta. Es por esto que se clasifica la mercadería como: “contaminable”, “contaminante”, “no contaminante”.

- **TIPOS DE EMPAQUETADO/ PALETIZACIÓN**

Los tipos de empaquetado pueden variar según distintos aspectos, el tipo de mercadería, el proveedor, la volumetría, etc. Se diferencian en 4 tipos de empaquetados:

- Pallet completo,
- Caja, puede contener varios packs o puede ser equivalente a un pack,
- Pack, puede contener varias unidades sueltas (o puede ser equivalente a la unidad),
- Unidad, es el empaque más pequeño.



Figura 37. Tipo de empaquetado – Pallet , Caja, Pack, Unidad de izquierda a derecha. (Fuente: Schneider)

7.3.7 LÓGICA/ FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SGA, WMS

7.3.7.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

El sistema utilizado como SGA (Sistema de Gestión de Almacenes) de la empresa es monitoreado desde las cabinas de monitoreo, desde donde se controla y en ciertas ocasiones

se lanzan las operaciones manualmente. El sistema almacena la información sobre stock, ubicaciones disponibles y pedidos programados, a partir de lo cual se realizan todos los movimientos. El sistema a su vez se utiliza desde las *hand helds*. Estos dispositivos son utilizados por todos los operarios para la realización de las operaciones, los mismos ingresan y el dispositivo les indica, para cada operación el recorrido que deben realizar. La lógica que utiliza el sistema para realizar el orden de recorrido responde a la optimización del mismo con un formato de recorrido en “S” o “zig-zag”. Según la operación, el sistema realiza la optimización del recorrido en base a un algoritmo, indicando el orden en el que el operario debe ir a cada ubicación. La forma de recorrido que respeta el sistema es la que muestran las flechas en el layout que se muestra debajo en la *Figura 38* y a modo completo en el *Plano 5*.

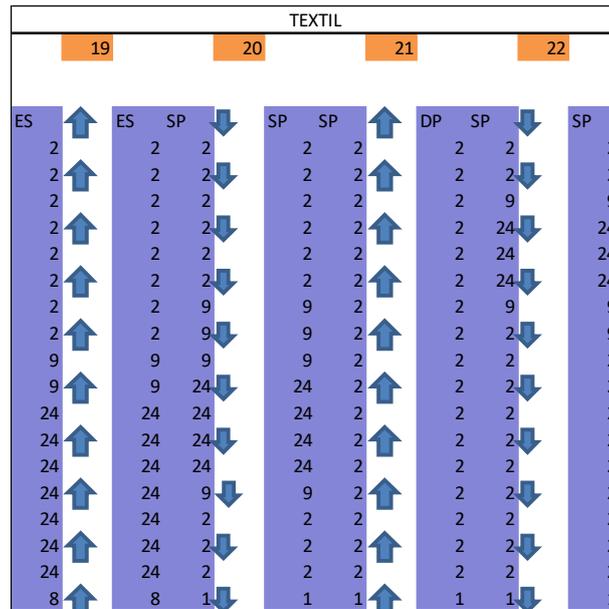


Figura 38. Lógica de recorrido del sistema para sector Textil. (Elaboración propia)

7.3.7.2 ASIGNACIÓN DE OPERACIONES

Desde el momento en que la mercadería ingresa al Centro de Distribución, el sistema SGA recibe la información de que la mercadería ingresó y se encuentra en los muelles para ser descargada. Una vez que el camión está en el muelle, la operación de *recepción* se crea automáticamente. Desde la cabina de monitoreo de operaciones, se habilita a que se “lance” la ola de *recepción* para que la mercadería sea descargada desde los camiones a los canales. A partir de allí la mercadería irá teniendo distintos movimientos dentro del depósito y para cada uno de ellos tendrá una *ola* de operación. En el caso de ser necesario, también se pueden “crear” operaciones manualmente, y forzar el “lanzamiento” de la operación. Esto lo realiza el monitorista de operaciones.

Existen ciertas operaciones que se generan a partir de una operación anterior, como efecto “dominó”. Por ejemplo, la *reposición* luego de la operación de *picking*, o el *almacenamiento* luego de la *recepción*. Pero también hay otras que son operaciones independientes como *reubicación* o *fusión de bultos*.

Una vez creada la “ola” de operación por el sistema, se requiere que la misma sea ejecutada. Para esto, es necesario que el operario ingrese a la PDA (*hand held*) con su nombre de usuario y el número del equipo que será utilizado para realizar la operación. Una vez ingresado, se escanea con el dispositivo la mercadería que se quiere mover, y el sistema le indica exactamente cuál es la ubicación final de la misma.

En el momento en que se dispone la mercadería en la ubicación final, en el sistema la operación se visualiza como finalizada.

7.3.7.3 FUNCIONAMIENTO DE PDAS

El dispositivo que utiliza el operario para realizar todas las operaciones es lo que llamamos PDA, como se mencionaba en capítulos anteriores. Para ingresar a las PDAs es necesario el nombre de usuario. Una vez que se ingresa, el sistema le “pide” que realice una operación. Según la operación a realizar es el tipo de equipo que el operario puede utilizar. Para poder ejecutar la operación se debe primero ingresar el número del vehículo, si este no concuerda con la operación a realizar, no permite realizar la *ola*. Una vez permitido, el dispositivo puede, o solicitar que se escanee la mercadería o bien indicar una ubicación a la que se debas trasladar el operario.

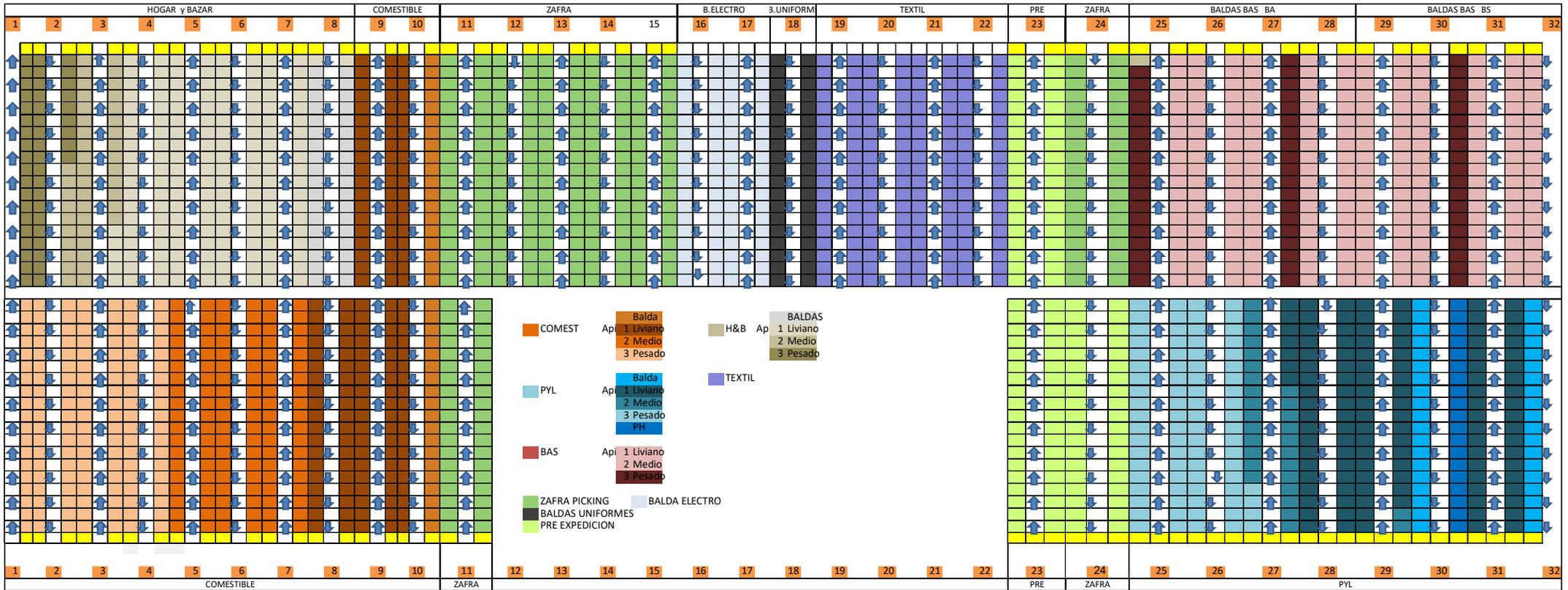
El dispositivo permite escanear la etiqueta de la mercadería que es recogida. Al escanear la etiqueta del producto, en la pantalla se despliega la ubicación a la que debe ser trasladado, cuando se llega a la ubicación, se debe escanear la etiqueta de la ubicación para que la ola de operación se de como finalizada. Esto se hace para corroborar que efectivamente la mercadería fue dejada en el lugar correspondiente.



Figura 39. Ejemplo de etiqueta de una ubicación. (Fuente: elaboración propia)



Figura 40. PDA utilizada por operarios. (Fuente: Slon)



Plano 5. Lógica de recorrido del Sistema para todo el depósito.

7.4 ALCANCE DEL CASO DE ESTUDIO

El alcance de nuestro caso de estudio se limitará al sector de secos del CDO, el cual representa el 90% del volumen total de la compañía. Este sector engloba las secciones de Comestibles, Perfumería y Limpieza y BAS. Los mismos abarcan 32 pasillos de posiciones de rack simple, rack doble, balda y media balda con un total de 42mil ubicaciones en la actualidad y con una capacidad de almacenamiento total de 10 mil *skus*.

El trabajo será enfocado en todas las operaciones de este sector, que actualmente son realizadas por equipos manuales, las mismas que fueron definidas en la descripción de la situación actual, en la *Tabla 1*.

Dentro de las soluciones técnicas disponibles, serán definidos los tipos de vehículos auto guiados más adecuados para cada una de las operaciones con los que se trabajará a lo largo del proyecto.

Se analizará la posibilidad de sustituir la operativa de equipos manuales con vehículos auto guiados, en función de los resultados obtenidos por el modelo y el análisis económico financiero pertinente concluiremos la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

7.5 TRATAMIENTO DE DATOS

Actualmente, los trabajadores que operan en el CDO cuentan con dispositivos informáticos que se encargan de señalar las tareas que se deben realizar y al mismo tiempo recogen la información detallada de cada operación realizada de forma automática en una base de datos. Esta base de datos de la compañía fue la fuente para la recopilación de una gran cantidad de datos ya digitalizados, por lo cual nos fue sencillo obtener la información requerida para la realización del trabajo.

El modo de tratamiento de estos datos fue realizado en dos etapas. En una primera instancia, a modo de prueba del modelo programado, utilizamos los datos de dos semanas aleatorias para poder enfocarnos en entender el funcionamiento del modelo y para poder luego desarrollarlo de la forma más completa. Esto nos permitió entender el comportamiento del modelo, analizando la coherencia de los primeros resultados.

En la segunda instancia, luego de probar la solidez del modelo procedimos a obtener la totalidad de los datos necesarios para nuestro estudio. Decidimos utilizar la información del último año, 52 semanas desde setiembre 2020 hasta setiembre 2021, para poder considerar los distintos picos de demanda. De cada semana se obtuvieron todas las olas que se realizan en el CDO con su información detallada. Para cada ola se obtuvo el tipo de operación a la que corresponde, el día y el turno en que se realizan, el tiempo de ejecución y el tipo de equipo utilizado.

Al ser listas de datos muy extensos, desde la base de datos fueron descargados en formato *.csv* para luego poder tratarlos en una planilla Excel.

A continuación, separamos la información por semana y así poder visualizar la cantidad de olas de cada tipo de operación. En el *Gráfico 1* se puede observar el comportamiento de las curvas de demanda a lo largo del año. Vemos el pico de demanda máxima los viernes y los días

de trabajo nulo los sábados. La siguiente gráfica representa la curva de cantidad de olas diarias de cada operación a lo largo de las 52 semanas analizadas.

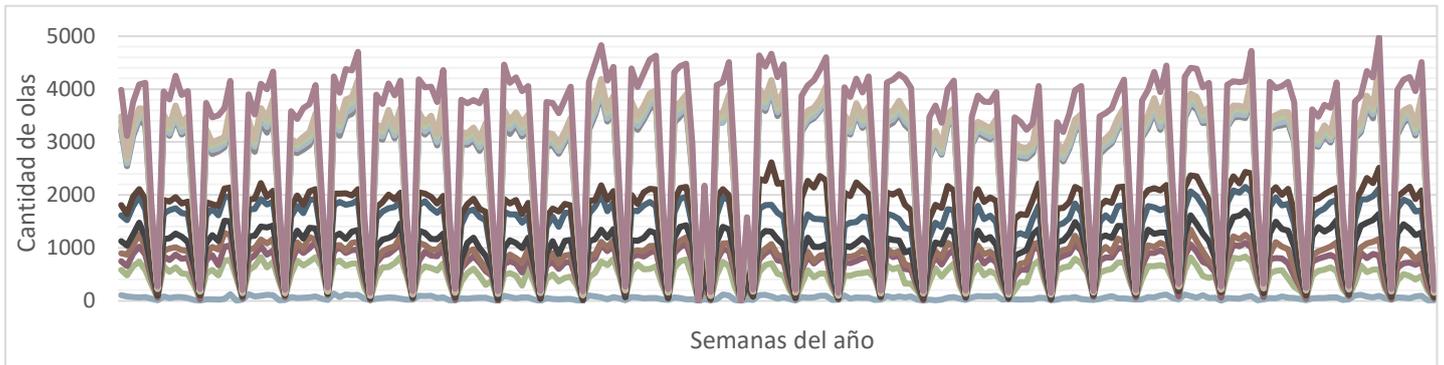


Gráfico 1. Referencia de Perfil de cantidad de olas para un tramo del año.

Demanda máxima

Para un correcto dimensionamiento de la cantidad de vehículos requeridos es necesario evaluar el momento de demanda máxima anual, por esto elegimos los datos de la semana de máxima carga de trabajo, la cual se muestra a continuación en el *Gráfico 2*. De esta forma nos aseguramos de poder cumplir con todas las olas todos los días del año, sin retrasar la operación en momentos de mayor trabajo.

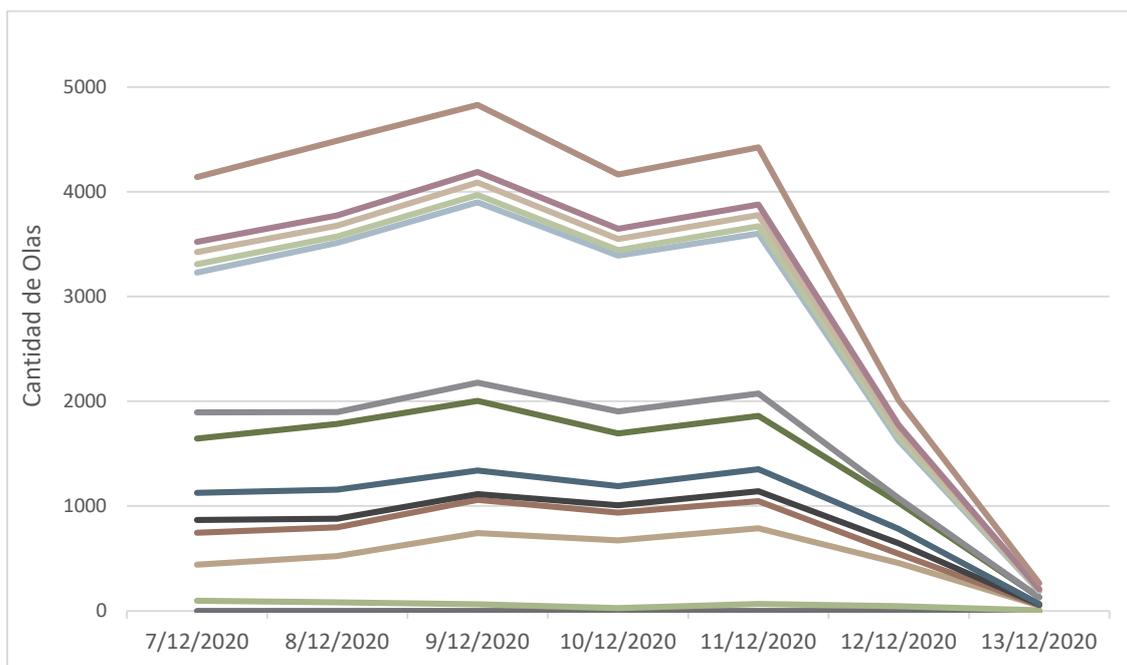


Gráfico 2. Perfil de semana de máxima demanda operaciones acumuladas (en cantidad de olas).

Demanda promedio

Por otro lado, para determinar los costos de operación de los AGVs que luego utilizaremos en la evaluación económica utilizamos una demanda promedio de todas las semanas del año. Esto nos permite determinar los costos de forma más realista, por ejemplo, si pensamos en el consumo energético no sería acertado tomar la semana de demanda máxima para estimar los costos. Para esto no se tomó una semana en particular, sino que se promedió el perfil total anual. Así lo podemos ver en el *Gráfico 3*.

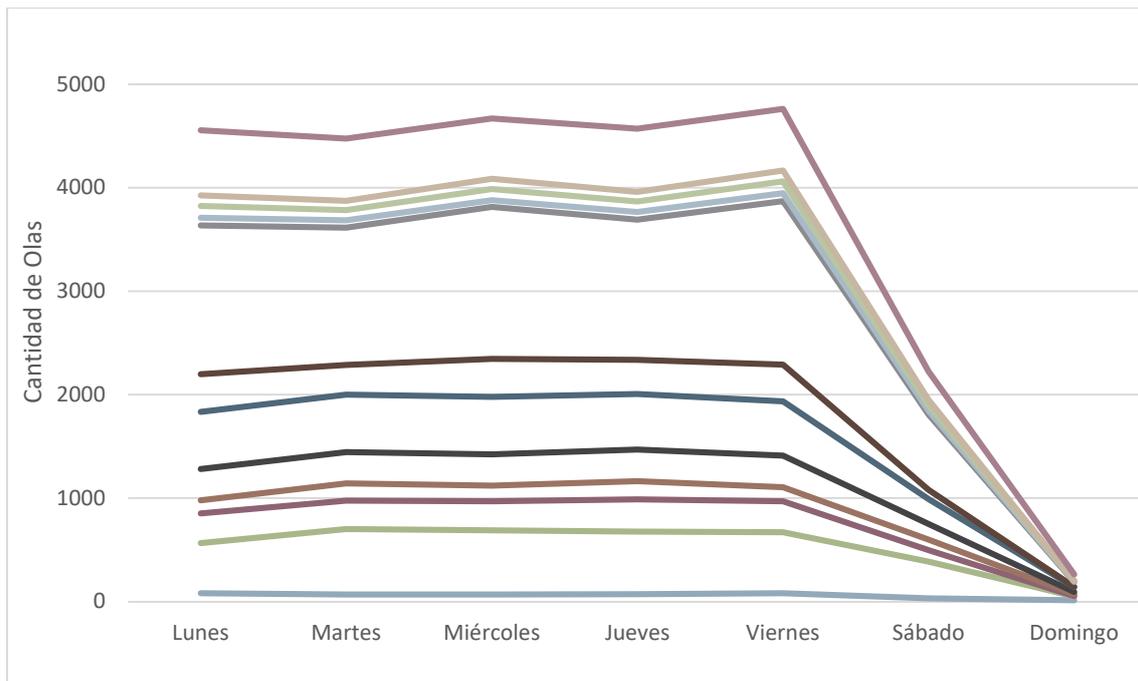


Gráfico 3. Perfil de demanda promedio de operaciones acumulada (en cantidad de olas).

7.6 CASO BASE

7.6.1 DEFINICIÓN DEL CASO BASE

Considerando las operaciones determinadas en nuestro caso base realizaremos una agrupación de las mismas en función del tipo de AGV con el que pueden ser ejecutadas. Definiremos un grupo de operaciones para cada tipo de AGV elegido según la *Tabla 9*.

Tabla 9. Clasificación de operaciones por tipo de AGV.

Grupo de Operaciones	Operación
Carretilla de gran altura	Extracción
	Almacenaje
	Reposición de cajas
	Reposición
Order Picker	Reparto
	Reparto base
	Picking
Transpaleta	Reubic. para Reparto
	Reubicación para expedición
	Reubicación Pre Recepción Expedición
	Apertura de expedición
	Cierre de expedición

7.6.1.1 CARRETILLA DE GRAN ALTURA

Para este grupo de operaciones evaluaremos la sustitución total de los equipos actuales, por *carretillas de gran altura automatizadas*.



Figura 41. Carretillas de gran altura automatizadas marca Jungheinrich y modelo EKX 514a/ 516ka/ 516a. (Fuente: Jungheinrich)

Tabla 10. Carretillas de gran altura automatizadas marca Jungheinrich y modelo EKX 514a/ 516ka/ 516a.

Especificación técnica	Valor
Velocidad media	10,5 km/h
Capacidad máxima de carga	1400 - 1600 kg
Elevación máxima	11 - 13 m

Estas *carretillas automatizadas* son equipos capaces de tomar la mercadería de forma autónoma debido al sistema láser que permite al LGV manipular los pallets de manera segura y seguir el recorrido correspondiente que tiene asignado según lo indicado por el sistema.

En el caso de la operación de *almacenaje*, por ejemplo, el vehículo toma la mercadería ubicada en los canales para almacenarlas finalmente en la ubicación determinada por el sistema. En el caso de la reposición, en cambio, el equipo será capaz de tomar la mercadería de cualquier ubicación de altura y posicionar el pallet a nivel de *picking*. De forma similar lo realiza para las demás operaciones.

Estos equipos cuentan con una capacidad de carga máxima de 1400 - 1600 kg, lo que equivale aproximadamente a 2 pallets. Por seguridad del depósito, los equipos no deben transitar por los pasillos con una carga mayor a 2 pallets de cualquier mercadería, por lo tanto, la capacidad de carga no es limitante.

Por otra parte, tienen una altura de elevación de 11 - 13 m, permitiendo el almacenamiento o manipulación de mercadería en los distintos niveles de almacenaje. Como mencionamos anteriormente, el depósito cuenta con 5 niveles de almacenamiento, con una altura de 1800 mm cada nivel, por lo que para llegar al último nivel es necesaria una capacidad de elevación de 7500mm aproximadamente para una correcta manipulación. Este equipo será capaz de elevarse lo requerido para alcanzar el último nivel de almacenamiento.

7.6.1.2 TRANSPALETA AUTOGUIADA

Para el grupo de operaciones realizadas actualmente por *carretillas* se propondrá la sustitución por *transpaletas auto guiadas*. Actualmente estas *carretillas* cumplen la función de transportar la mercadería, para la operación de *recepción*, desde los camiones a los canales de carga y descarga, y viceversa para la operación de *expedición*.

Estos equipos reciben la mercadería que llega de los proveedores en pallets completos. En cuanto a la mercadería saliente, ésta puede expedirse mayormente en caddies hacia los distintos locales, pero en algunos casos puede ir también en pallets.

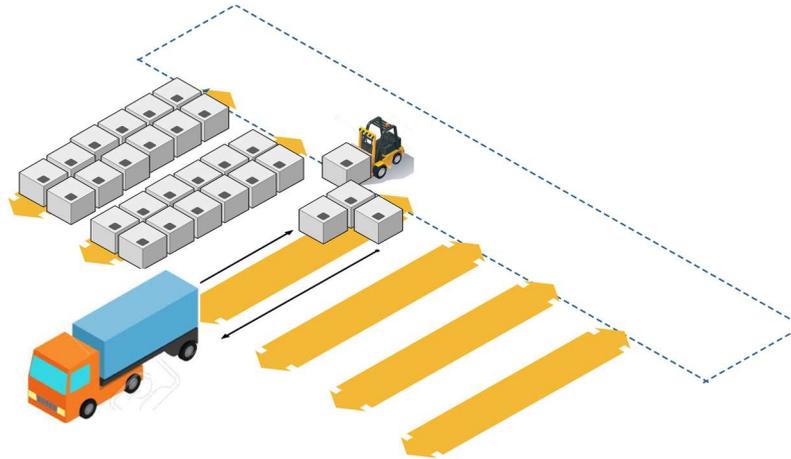


Figura 42. Operación de recepción y expedición. (Fuente: elaboración propia)

Los equipos auto guiados propuestos cumplirían la misma función, pero de forma autónoma, sin requerir la dirección de un operario. Además, utilizaremos estos equipos para las operaciones que en la actualidad pertenecen a la familia de *Almacenamiento y Reposición* pero que no demandan trabajos en altura como lo son las operaciones de *Reubicación para Reparto*, *Reubicación para Expedición* y *Reubicación Pre Recepción Expedición*.



Figura 43. Transpaleta auto guiada modelo ERE 225 y marca Jungheinrich. (Fuente: Jungheinrich)

Tabla 11. Especificaciones técnicas de la Transpaleta ere 225a.

Especificación técnica	Valor
Velocidad media	12,5 km/h
Capacidad máxima de carga	2500 kg
Elevación máxima	0,125m

Estas *transpaletas auto guiadas* son vehículos capaces de ingresar al camión de forma autónoma por la rampa de carga y descarga con un sistema láser que permite al LGV dimensionar el camión y detectar donde se ubica la mercadería dentro del mismo para manipularla y descargarla, tomar la mercadería y seguir el camino correspondiente que se tiene asignado, para descargarlo en las ubicaciones libres del canal de forma ordenada para que luego la mercadería sea auditada. Esto sucede en el caso de la *recepción*, actuando de manera inversa en el caso de la expedición.

Estos equipos cuentan con una capacidad de carga máxima de 2500 kg, lo que equivale aproximadamente a 3 pallets de arroz. Por seguridad del depósito, los equipos no deben cargar con una altura mayor a 2 metros, por lo que este equipo será adecuado para las operaciones a realizar.

Tienen, a su vez, una altura de elevación de 0,125 m, permitiendo que el pallet se eleve del suelo y pueda ser transportado. Para esta operación no es necesaria mayor altura, ya que implica únicamente un movimiento a nivel de piso.

7.6.1.3 ORDER PICKER

En la actualidad se utilizan 18 *order pickers* específicamente para la operación de *picking* manual.

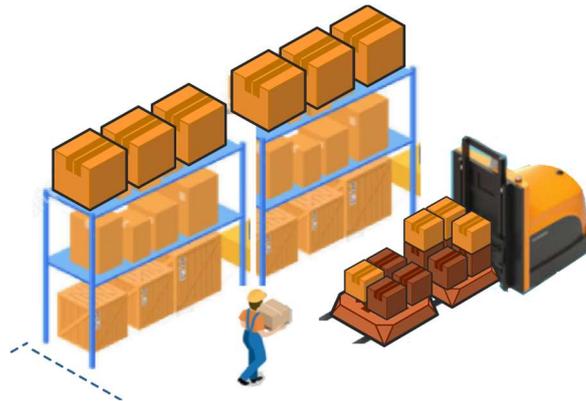


Figura 44. Operaciones de picking. (Fuente: elaboración propia)

Se evaluará la sustitución de los equipos manuales, por *pickers auto guiados*. Además, utilizaremos estos equipos también para las operaciones de *Reparto* y *Reparto Base* que en la actualidad se realizan con *carretillas*.



Figura 45. Order picker autoguiados. (Fuente: Swisslog)

Tabla 12. Especificaciones técnicas del Order Picker.

Especificación técnica	Valor
Velocidad media	7,2 km/h
Capacidad máxima de carga	2500 kg
Elevación máxima	0,125m

Estos equipos tendrán la capacidad de movilizarse por los pasillos con un operario caminando a su lado, quien realizará la manipulación de la mercadería y la pondrá encima del LGV. El vehículo se detendrá en la posición en la que el operario debe tomar la mercadería. Hasta que el mismo no coloca la cantidad indicada de productos en el vehículo, el equipo no vuelve a ponerse en marcha. Este equipo cuenta con un sistema láser que permite el correcto tránsito por los pasillos. A su vez, cuenta con un sensor de peso que es lo que provoca la detención del vehículo hasta que no se ingresa el peso correspondiente de mercadería en cada ubicación de *picking*.

Una vez que el equipo tiene toda la mercadería que indica la ola de pedido, el mismo se dirige automáticamente a la zona de ubicación de pedidos preparados para luego ser despachados.

Análogamente, para las operaciones de *Reparto* y *Reparto Base*, el equipo irá indicando al operario donde debe descargar la mercadería correspondiente, con la lógica inversa de la operación de *picking*.

Estos equipos cuentan con una capacidad de carga máxima de 2500 kg., los pedidos a los locales no superan nunca un peso de 900 kg, por lo que la capacidad de carga es adecuada para la operación.

Tienen, a su vez, una altura de elevación de 0,125 m, permitiendo que el pallet se eleve del suelo y pueda ser transportado. Para este grupo de operaciones no es necesaria la altura.

7.6.2 MODELADO

7.6.2.1 OBJETIVO

El objetivo del modelo es determinar la cantidad mínima de cada tipo de AGV requerida para cumplir con la demanda de operaciones del Centro de Operaciones.

7.6.2.2 GRUPO DE OPERACIONES/ OPERACIONES

Se definirán grupos de operaciones, asociando cada operación a su correspondiente tipo de AGV, como se muestra en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Clasificación de grupo de operaciones del modelo.

Tipo de AGV	Operación	Número de operación	Flexibilidad Semanal
Carretilla de gran altura	Extracción	1	No
	Almacenaje	2	No
	Reposición de cajas	3	Si
	Reposición	4	Si
Order Picker	Reparto	5	Si
	Reparto base	6	Si
	Picking	7	No
Transpaleta	Reubic. para Reparto	8	Si
	Reubic. para expedición	9	No
	Reubic. Pre Recep. Expe.	10	No
	Apertura de expedición	11	No
	Cierre de expedición	12	No

Como se observa en la cuarta columna de la tabla anterior hay ciertas operaciones que tienen flexibilidad semanal. Con esto nos referimos a que las mismas tienen la libertad de ser realizadas a lo largo de la semana, sin dejar de respetar el “factor de cumplimiento mínimo” que será explicado más adelante en las consideraciones del modelo.

7.6.2.3 FASES DEL MODELO

Para sustituir los equipos manuales por AGVs en cada grupo de operaciones que se presentó en las partes anteriores se realizará un modelo matemático. Este modelo se separa en 2 fases, la *fase I* definirá la cantidad de *order picker* y *carretillas*, mientras que la *fase II*, en base a los resultados de la *fase I*, permitirá obtener la cantidad de *transpaletas*.

Fase I – Order Picker y Carretillas

En la primera fase de nuestro modelo se consideran las operaciones realizadas exclusivamente con *carretillas* y *order pickers*. Se obtendrá de esta primera fase, la cantidad mínima requerida de estos dos tipos de AGVs para cumplir con la demanda de sus operaciones correspondientes, los tiempos de carga y los tiempos inactivos.

Fase II - Transpaletas

En la segunda fase, trabajamos con las operaciones que se realizan con *transpaletas*. Para estas damos la flexibilidad de que puedan también ser realizadas por *carretillas de gran altura*, otorgándole a nuestro modelo la posibilidad de compartir equipos.

La salida generada por la variable de tiempo inactivo de la carretilla en la Fase I, lo definimos como parámetro de tiempo disponible para la Fase II, permitiendo utilizar el tiempo inactivo de carretilla para realizar operaciones de *transpaleta* y de esta forma optimizar el uso de los equipos.

Definimos entonces a partir de la Fase II, la cantidad de *transpaletas* y *carretillas* requeridas para cumplir con la demanda de este grupo de operaciones.

Finalmente tendremos la cantidad mínima requerida para cada uno de los distintos tipos de AGV, como fue planteado en el objetivo.

7.6.2.4 TRATAMIENTO DE DATOS

OLAS

- Llamaremos olas a las órdenes de trabajo que se realizan para cada tipo de operación, desde que se “lanza” hasta que se “finaliza”. Se les denomina “ola de *almacenaje*”, “ola de *reposición*”, “ola de *picking*”.

TRAYECTORIAS/ DISTANCIAS UTILIZADAS

- Para las olas de cada operación utilizaremos promedios de las distancias recorridas para simplificar los cálculos.
- Este promedio lo calcularemos a partir de recorridos históricos disponibles en la base de datos de la empresa y con las distancias estimadas a partir del layout actual (los metros recorridos a partir del plano de AutoCAD).
- Se seguirá la lógica del sistema de trayectoria en “S”.
- La trayectoria total de una ola se considera desde el punto de partida (dependiendo del equipo y la operación), hasta el punto donde termina la operación.
- No se considerará la optimización en las trayectorias en cuanto al aprovechamiento de los viajes vacíos a modo de simplificar ya que esto sería una consideración compleja. A su vez, en la actualidad tampoco se aprovechan los viajes vacíos.
- No se considerará la secuencia entre las operaciones, sino que se dan de forma independiente.
- No se trabajará en el problema de Slotting, la empresa ya realizó este trabajo previamente. Para la realización de nuestro proyecto ya está contemplada esta organización óptima de las ubicaciones.

TIEMPOS

- Teniendo en cuenta el funcionamiento de cada equipo y los datos disponibles, se definirán tiempos de operación por ola, para cada tipo de operación y para cada tipo de AGV.
- Se considerará un tiempo de demora en cada ola de operación.
- Se contemplarán además tiempos de manipulación según corresponda a cada tipo de equipo.

Los tiempos de demora y tiempos de manipulación fueron incorporados al haber conocido la operativa real y en el intercambio con los operarios.

7.6.2.5 EQUIPOS:

INDIVIDUALIDAD

- El grupo de operaciones de *carretillas autoguiadas* y de *order pickers*, podrán ser exclusivamente ejecutadas por su AGV asignado.
- Consideraremos, por las aptitudes del equipo y la particularidad de la operación que los equipos utilizados para *picking* serán específicamente de esta operación, sin compartirlas con otras operaciones.

COMPARTIDOS

- Las operaciones del grupo de *transpaletas autoguiadas* tendrán la libertad de ser ejecutadas también con *carretillas de gran altura*.

7.6.2.6 CONSIDERACIONES

CONSIDERACIONES DE CUMPLIMIENTO DE TAREAS

- Factor de cumplimiento mínimo:

Para cada una de las operaciones se tendrá un “factor de cumplimiento mínimo” por día y por turno, el cual corresponde al porcentaje de la demanda de la operación (cantidad de olas) que es necesario que sean cumplidos en ese turno específico.

Este factor fue determinado para obedecer el comportamiento real de la dinámica operativa, sujeto a componentes externos e internos como lo son, por ejemplo, los horarios de llegada de camiones, los tiempos en los que es necesario que lleguen los pedidos a los distintos locales, los lapsos de mayor rendimiento de los operarios, entre otros.

- Para ciertas operaciones, mantendremos una restricción de cumplimiento diario. Las olas podrán ser redistribuidas en los turnos, pero será requisito cumplir con la demanda diaria.
- Para algunas operaciones daremos flexibilidad de cumplimiento semanal, daremos libertad de redistribución, en turnos y días.
- Estos factores de cumplimiento los definimos tomando en consideración los siguientes aspectos investigados:
 - Tiempos estrictos de llegada a los locales con los pedidos solicitados
 - Tiempos de arribo de los camiones tanto propios como de proveedores
 - Tiempos de partida de camiones propios a los locales
 - Días de mayor exigencia en el cumplimiento de pedidos
 - Días de menor exigencia en el cumplimiento de pedidos

CONSIDERACIONES DE CARRETILLA DE GRAN ALTURA

- Las ubicaciones correspondientes a las operaciones para cada SKU se consideran como en una “foto” actual. A partir de la cual se calcularán las distancias y trayectorias recorridas mencionadas anteriormente.

CONSIDERACIONES DE TRANSPALETAS

- Los equipos elegidos para estas operaciones cumplen con los requisitos de dimensiones para cualquier tipo de camión que recibe el CDO.
- En particular para las operaciones de *recepción y expedición* una “ola” refiere a la carga y descarga completa de un camión.

CONSIDERACIONES DE PICKING

- Se considerará para el cálculo de los recorridos y las distancias promedio las ubicaciones según la distribución actual como si se tomara una “foto” en el momento de comienzo del trabajo como punto de referencia.

DISTRIBUCIÓN DE DÍAS Y TURNOS

- En cuanto a la distribución temporal, se trabajará con todos los días de la semana, los 3 turnos de 8 horas, los cuales se consideran en los siguientes horarios: el nocturno, desde las 22:00hs del día anterior hasta las 6:00hs de la mañana, luego el turno de la mañana en el rango de las 6:00hs hasta las 14:00hs y el de la tarde de las 14 a las 22 horas.

7.6.2.7 CÁLCULO DE FACTOR DE AUTONOMÍA

Para lo que llamamos *factor de autonomía* en nuestro modelo realizamos el cálculo del mismo en base a los datos de los equipos y sus respectivas baterías.

Según el cargador correspondiente para cada tipo de AGV, se calculó el tiempo de carga por hora de trabajo, a lo que llamamos “factor de autonomía”.

Para esto separamos la operación en 4 etapas de distinto porcentaje de consumo frente a la potencia máxima. En la *Tabla 14* se desglosa a modo de ejemplo para la operación de *Extracción*.

Tabla 14. Distribución de potencia de la operación 1 (Extracción).

Etapas de la operación	% Potencia utilizada	Tiempo (s)	Porcentaje del tiempo en cada etapa
Traslado sin carga	60%	0,62	18%
Elevación uñas sin carga	10%	1,15	32%
Elevación uñas con carga	30%	1,15	32%
Traslado con carga	100%	0,62	18%

Para realizar el cálculo consideramos que en la etapa de “traslado sin carga” el equipo consume potencia a un 60% del máximo, mientras que durante la “elevación sin carga” se consume un 10%, en la “elevación con carga” un 30% y “traslado con carga” un 100%. Esto es igual para todas las operaciones, lo que se diferencia es el porcentaje de cada etapa para las distintas operaciones.

Por otro lado, desglosamos el tiempo de cada operación en cada una de estas etapas para, de esta forma poder ponderar el porcentaje de consumo total de cada etapa sobre la potencia máxima. Los cálculos realizados para lo mencionado anteriormente fueron los siguientes:

$$\%CPM = \frac{ttsc \cdot 0,6 + tesc \cdot 0,1 + tecc \cdot 0,3 + ttcc \cdot 1}{tt}$$

- %CPM = Porcentaje de consumo de potencia máxima x operación
- ttsc= tiempo de traslado sin carga
- tesc= tiempo de elevación sin carga

- *tecc*= tiempo de elevación con carga
- *ttcc*= tiempo de traslado con carga
- *tt*= tiempo total

A partir de este cálculo obtenemos un porcentaje de la potencia máxima que consume cada operación. Obtenidos estos porcentajes para cada operación, realizamos un promedio de todas las operaciones que se realizan con cada uno de los distintos equipos, obteniendo un porcentaje para cada equipo. Estos tres valores serán los utilizados para el cálculo del tiempo de carga de los equipos.

Tabla 15. Porcentajes de consumo por equipo.

	Carretilla de gran altura	Order Picker	Transpaleta
Porcentaje del consumo de Potencia máxima	44%	92%	51%

Considerando la potencia de carga de los distintos cargadores según la *Tabla 16*.

Tabla 16. Potencia de los distintos cargadores.

CARGA	Carretilla de gran altura	Order Picker	Transpaleta
Potencia de Carga (KW)	16	5,76	5,76

Tabla 17. Potencia de los distintos equipos.

BATERÍAS	Carretilla de gran altura	Order Picker	Transpaleta
Potencia Equipo al 100% (KW)	25	2,80	2,80

Conociendo la potencia de las baterías de cada equipo cuando se utilizan al 100% de su capacidad y utilizando los valores de porcentaje de potencia máxima que cada equipo consume en la realización de sus operaciones, llegamos a un valor de “factor de autonomía” para cada uno. Se presentan en la *Tabla 18*.

Tabla 18. Factor de autonomía de cada equipo.

BATERÍAS	Carretilla de gran altura	Order Picker	Transpaleta
Factor de autonomía (tiempo de trabajo/ tiempo de carga)	1,47	2,24	4,00

El cálculo de factor de autonomía se realizó con la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de autonomía} = \frac{\text{Potencia de carga (KW)}}{\text{Potencia consumida al 100\% * Porcentaje del consumo del equipo}}$$

Con la cual se obtuvieron los 3 factores de autonomía correspondientes a cada equipo, siendo estos 1,47, 2,24 y 4,03 para la carretilla, el *order picker* y *transpaleta* respectivamente. Estos valores respetan la lógica de que el equipo que más consumo tiene es el que menor factor de autonomía tiene. Esto se debe a que la carretilla es el equipo que realiza mayor trabajo, seguido del *order picker* y luego la *transpaleta*.

7.6.2.8 MODELO BASE

Tabla 19. Conjuntos generales del modelo base.

Conjuntos	Descripción
$I_1 = \{1,2,3,4\}$	Conjunto de operaciones del grupo de operaciones de Carretilla de gran altura
$I_2 = \{5,6,7\}$	Conjunto de operaciones del grupo de operaciones de Picking
$I_3 = \{8,9,10,11,12\}$	Conjunto de operaciones del grupo de operaciones de Transpaleta
$K = \{\text{mañana, tarde, noche}\}$	Turnos de trabajo
L	
$= \left\{ \begin{array}{l} \text{lunes, martes,} \\ \text{miércoles, jueves,} \\ \text{viernes, sábado, domingo} \end{array} \right\}$	Conjuntos de días de trabajo

Tabla 20. Parámetros generales de operación del modelo base

Parámetros - Atributos	Descripción
vc	velocidad de la carretilla
vt	velocidad de la transpaleta
vp	velocidad del order picker
σac	factor de autonomía de la carretilla
σat	factor de autonomía de la transpaleta
σap	factor de autonomía del order picker
Parámetros - Distancias	Descripción
d_i	Distancia promedio recorrida por ola en para cada operación $i \in I$
Parámetros - Operación	Descripción
cp_i	cantidad de palets/caddies transportados promedio por ola en cada operación con $i \in I_3$
bp_i	bultos promedio cargados en cada ola de picking con $i \in I_2$
o_{ilk}	olas promedio por operación, por turno, por día con $i \in I$ $k \in K$ $l \in L$ - Matriz de demanda
σc_{ilk}	factor de cumplimiento mínimo de demanda de olas promedio de cada operación, por turno, por día con $i \in I$ $k \in K$ $l \in L$ - Matriz de cumplimiento de demanda

Tabla 21. Parámetros generales de tiempos del modelo base.

Parámetros – Tiempos	Descripción
tm_i	tiempo promedio de manipulación propio de cada operación por ola con $i \in I_1, I_2$
td_i	tiempo promedio de demora en ser lanzada la ola de cada operación con $i \in I$
tmb_i	tiempo de espera del equipo mientras el operario manipula la mercadería y la ubica sobre el vehículo para la operación de picking por cada bulto con $i \in I_3$
ttt	tiempo de trabajo neto
Parámetros – Tiempos de operación	Descripción
$toc_i = (d_i/vc) + tm_i + td_i$	tiempo promedio por cada ola de operación con carretilla de gran altura con $i \in I_1$
$top_i = \left(\frac{d_i}{vp}\right) + tmb_i * bp_i + td_i$	tiempo promedio por cada ola de operación con order picker con $i \in I_2$
$tot_i = \left(\frac{d_i}{vt}\right) + tm_i * cp_i + td_i$	tiempo promedio por cada ola de operación con transpaleta con $i \in I_3$

7.6.2.9 MODELO BASE- FASE I

Tabla 22. Variables del modelo base Fase I.

Variables	
Variables Continuas	Descripción
tcc_{lk}	tiempo de carga de carretillas por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
tcp_{lk}	tiempo de carga de order pickers por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
tic_{lk}	tiempo inactivo de carretillas por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
tip_{lk}	tiempo inactivo de order pickers por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
Variables Discretas	Descripción
mc_{lk}	cantidad de carretillas por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
mp_{lk}	cantidad de order pickers por turno, por día con $k \in K \ l \in L$
o'_{ilk}	olas realizadas por operación, por turno, por día con $i \in I \ k \in K \ l \in L$

Tabla 23. Variables auxiliares del modelo base Fase I.

Variables Auxiliares	Descripción
$maxclun, maxcmar, maxcmie, maxcjue, maxcvie, maxcsab, maxcdom$	máximos de carretillas requeridas por día
$maxplun, maxpmar, maxpmie, maxpjue, maxpvie, maxpsab, maxpdom$	máximos de order pickers requeridas por día
$maxc$	máximo de carretillas requerido
$maxp$	máximo de order pickers requerido

Tabla 24. Función objetivo del modelo base Fase I.

Función Objetivo*	Descripción
$\min (maxc)$	<i>Minimizar la cantidad máxima requerida de cada uno de los equipos necesarios en cada grupo de operaciones</i>
$\min (maxp)$	

*Vale aclarar que corremos dos modelos análogos con las respectivas variables, restricciones y función objetivo, para carretillas y order picker por separado.

Tabla 25. Restricciones del modelo base Fase I.

Restricciones	
Restricciones de no negatividad de las variables	
$mc_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	<i>El número óptimo de equipos y del tiempo de carga tiene que ser no negativo</i>
$mp_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	
$tcc_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	
$tcp_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	
Restricciones de autonomía	
$tcc_{lk} * \sigma ac = \sum_{i \in I_1} toc_i * o'_{ilk} \forall k \in K; \forall l \in L$	<i>Dentro de cada grupo de operaciones y para cada tipo de equipo, la autonomía generada en función del tiempo de carga debe ser igual a la suma del tiempo total de operaciones</i>
$tcp_{lk} * \sigma ap = \sum_{i \in I_2} top_i * o'_{ilk} \forall k \in K; \forall l \in L$	
Restricciones de operación	
$mc_{lk} * ttt \geq \sum_{i \in I_1} toc_i * o'_{ilk} + tcc_{lk} \forall k \in K; \forall l \in L$	<i>Dentro de cada grupo de operaciones y para cada tipo de equipo, el tiempo disponible de trabajo total, tiene que ser mayor a la suma del tiempo total de las operaciones más el tiempo de carga requerido.</i>
$mp_{lk} * ttt \geq \sum_{i \in I_2} top_i * o'_{ilk} + tcp_{lk} \forall k \in K; \forall l \in L$	
Restricciones de nivel cumplimiento	
$o_{ilk} * fc_{ilk} \leq o'_{ilk} \forall i \in I, k \in K, l \in L$	<i>Se define en función de un factor de cumplimiento porcentual, un mínimo por día, por turno y por operación de olas a cumplir</i>
$\sum_{k \in K} o'_{ilk} = \sum_{k \in K} o_{ilk} \forall i \in 1..2; k \in K, l \in L$	<i>Cumplimiento del total de olas para cada una de las operaciones, en cada día. No se puede terminar el día sin cumplir el 100% de las olas, pero las puedo distribuir en los distintos turnos de la forma que optimice.</i>
$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o'_{ilk} = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o_{ilk} \forall i \in 3..6, k \in K, l \in L$	<i>Cumplimiento del total de olas para cada una de las operaciones, en cada semana. No se puede terminar la semana sin cumplir el 100% de las olas, pero las puedo distribuir en los distintos turnos y días.</i>

$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o'_{ilk} =$ $\sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o_{ilk}$ $\forall i = 7, k \in K,$ $l \in \text{martes..jueves}$	<p>Cumplimiento del total de olas de picking, de martes a jueves. La demanda total de los tres días se puede distribuir en turnos y días, pero se debe cumplir el 100% de las olas en ese período.</p>
--	--

Tabla 26. Definición de tiempo inactivo.

Definición de tiempo inactivo	
$tic_{lk} = mc_{lk} * ttt - \sum_{i \in I_1} toc_i * o'_{ilk} - tcc_{lk} \quad \forall k \in K ; \forall l \in L$	<p>Tiempo inactivo por tipo de equipo por turno, por día, siendo este el tiempo total disponible, restando el tiempo de operación y el tiempo de carga.</p>
$tip_{lk} = mp_{lk} * ttt - \sum_{i \in I_2} top_i * o'_{ilk} - tcp_{lk} \quad \forall k \in K ; \forall l \in L$	

7.6.2.10 MODELO BASE- FASE II

Tabla 27. Parámetros modelo base Fase II.

Parámetros – Tiempos de operación	Descripción
tic_{lk}	Nuevo tiempo disponible de trabajo por día, por turno con $k \in K \quad l \in L$, siendo tic_{lk} la variable obtenida en Fase I
$nto_{lk} = tic_{lk} * \left(\frac{\sigma ac}{\sigma ac + 1} \right)$	Definimos un nuevo tiempo de autonomía para operar, en función del tiempo disponible tic_{lk} definido previamente y relacionándolo con el factor de autonomía; considerando que el AGV parte de ese tiempo disponible tendrá que cargar para luego operar

Tabla 28. Variables del modelo base Fase II.

Variables	
Variables Continuas	Descripción
tct_{lk}	Nuevo tiempo de carga de transpaletas por turno, por día con $k \in K \quad l \in L$
nti_{lk}	Nuevo tiempo inactivo de los AGV por turno, por día con $k \in K \quad l \in L$
Variables Discretas	Descripción
mt_{lk}	Nueva cantidad de transpaletas por turno, por día con $k \in K \quad l \in L$
o'_{ilk}	olas realizadas por operación, por turno, por día con $i \in I \quad k \in K \quad l \in L$

Tabla 29. Variables auxiliares del modelo base Fase II.

Variables Auxiliares	Descripción
$maxtlun, maxtmar, maxtmie, maxtjue, maxtvie, maxtsab, maxtdom$	máximos de transpaletas por día
$maxt$	máximo de transpaletas requerido

Tabla 30. Función objetivo del modelo del Caso Base Fase II.

Función Objetivo	Descripción
$min (maxt)$	Minimizar la cantidad máxima requerida de transpaletas necesarios

Tabla 31. Restricciones del modelo base Fase II.

Restricciones	
Restricciones de no negatividad de las variables	
$mt_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	El número óptimo de equipos y del tiempo de carga tiene que ser no negativo
$tct_{lk} \geq 0 \forall l \in L, k \in K$	
Restricciones de autonomía	
$tct_{lk} * \sigma at + nto_{lk} = \sum_{i \in I_3} tot_i * o'_{ilk} \forall k \in K ; \forall l \in L$	Dentro del grupo de operaciones que pueden ser compartidas, la autonomía generada en función de un nuevo tiempo de carga, sumado al tiempo disponible para operar generado en Fase I, debe ser igual a la suma del tiempo total de operaciones.
Restricciones de operación	
$mt_{lk} * ttt \geq \sum_{i \in I_3} tot_i * o'_{ilk} + tct_{lk} - nto_{lk} \forall k \in K ; \forall l \in L$	Dentro del grupo de operaciones que pueden ser compartidas, el tiempo disponible de trabajo total, tiene que ser mayor a la suma del tiempo total de las operaciones más el tiempo de carga requerido, restando el tiempo disponible para operar generado en Fase I.
Restricciones de nivel cumplimiento	
$o_{ilk} * fc_{ilk} \leq o'_{ilk}$ $\forall i \in I_3, k \in K, l \in L$	Se define en función de un factor de cumplimiento porcentual, un mínimo por día, por turno y por operación de olas a cumplir Cumplimiento del total de olas para cada una de las operaciones, en cada día. No se puede terminar el día sin cumplir el 100% de las olas, pero las puedo distribuir en los distintos turnos de la forma que optimice.
$\sum_{k \in K} o'_{ilk} = \sum_{k \in K} o_{ilk}$ $\forall i \in 9..12$	Cumplimiento del total de olas para cada una de las operaciones, en cada semana. No puedo terminar la semana sin cumplir el 100% de las olas, pero las puedo distribuir en los distintos turnos y días.
$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o'_{ilk} = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} o_{ilk}$ $\forall i = 8$	

Tabla 32. Definición de tiempo inactivo.

Definición de tiempo inactivo	
$nti_{lk} = mt_{lk} * ttt + tic_{lk} - \sum_{i \in I_3} tot_i * o'_{ilk} - tct_{lk} \forall k \in K ; \forall l \in L$	Nuevo tiempo inactivo para los AGV, por turno, por día, siendo este el tiempo total disponible, restando el tiempo de operación y el tiempo de carga.

7.6.3 RESULTADOS

A partir de la resolución del modelo planteado obtuvimos los resultados que se presentarán a continuación. Más allá de la cantidad de AGVs determinada nos detendremos en los resultados que tienen mayor impacto para nuestro modelo en la operativa actual donde se presentan muchas oportunidades de mejora.

7.6.3.1 CANTIDAD MÍNIMA DE AGV

Como resultado principal obtuvimos para las *carretillas de gran altura, transpaletas y order pickers automatizados*, un perfil de cantidades mínimas de equipos necesarios por cada turno, en cada día. Se pueden observar estos resultados en el *Gráfico 4*.

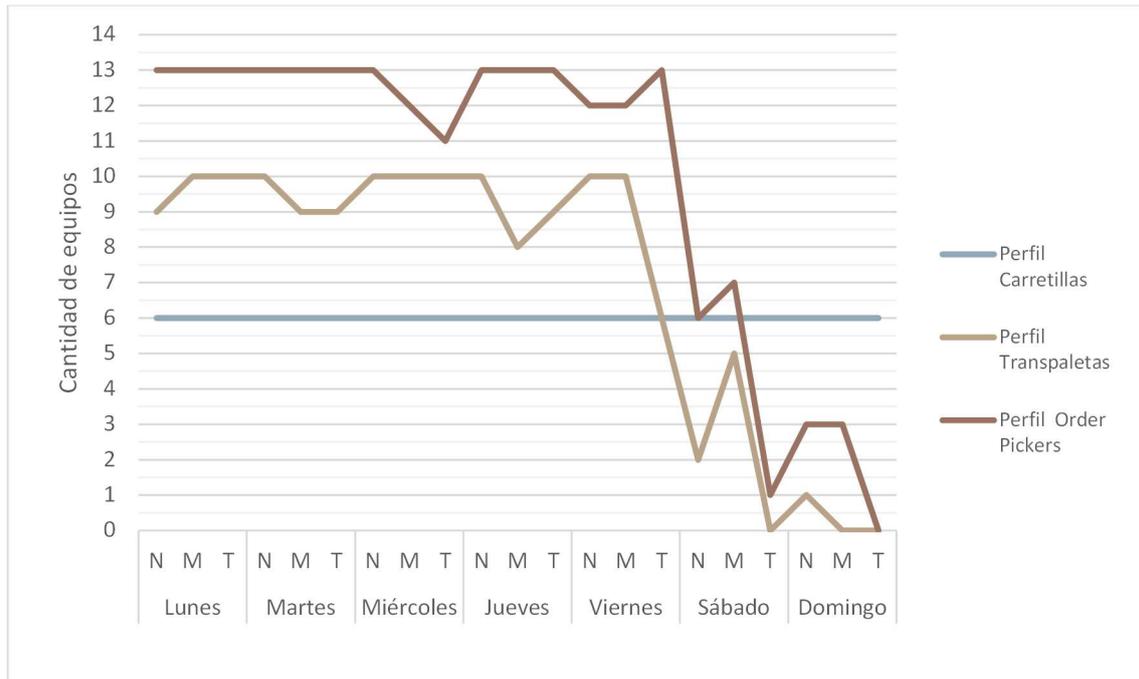


Gráfico 4. Perfil de cantidad de mínima de equipos, por turno, por día.

Observando los perfiles, para la *carretilla* en particular, se observa una curva constante, utiliza siempre 6 equipos. Resultado esperado, debido a que el modelo da la flexibilidad de utilizar el tiempo de estos equipos para realizar tareas del grupo de operaciones de carretillas y también de *transpaletas* buscando minimizar la cantidad total de AGVs.

Vemos un comportamiento muy similar entre las *transpaletas* y los *order pickers*. La distribución de los equipos es bastante homogénea de lunes a viernes mientras que el fin de semana los perfiles descienden de forma importante.

A pesar de que los AGV tienen la capacidad de operar permanentemente, los fines de semana vemos una reducción general en la demanda de operaciones. Las operaciones de *expedición y recepción* disminuyen y se ven limitadas por el menor flujo de entrada y salida de camiones, afectando esto el resto de las operaciones en general. Esto se debe a que la demanda de trabajo es relativamente constante durante los días de la semana y cae durante el fin de semana.

De todos modos, para nuestro modelo propuesto, consideramos cierta flexibilidad que, en función de nuestro factor de cumplimiento, se asigna operaciones los días sábados y domingos optimizando el uso de los AGVs.

Obtenidos los valores mínimos de equipos necesarios para el cumplimiento de las órdenes de pedido, se toma el valor máximo de esta minimización para poder cumplir con el turno de mayor demanda de operación, siendo este el que requiere una mayor cantidad de equipos. Este

valor máximo diario se puede visualizar de forma diaria en el *Gráfico 5* para analizar los días que requieren mayor cantidad de equipos.

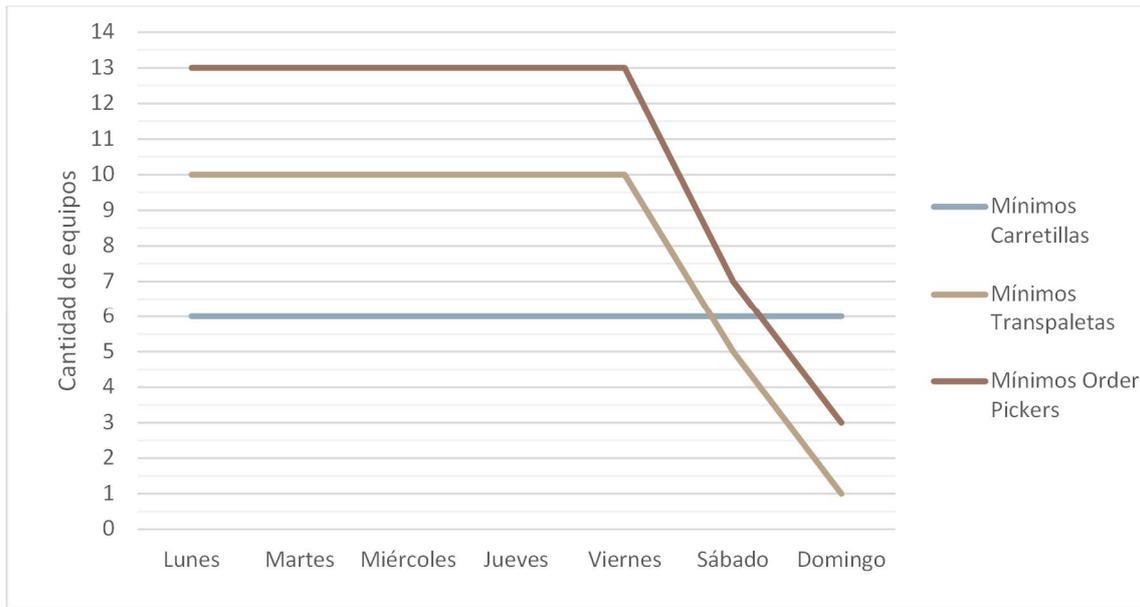


Gráfico 5. Mínima cantidad de equipos requerida por día.

Como se puede observar en el *Gráfico 6*, los resultados obtenidos como requerimiento mínimo de *order pickers*, *transpaletas* y *carretillas* es de 13, 10 y 6 respectivamente. Estos valores corresponden a los días y turnos de mayor demanda.

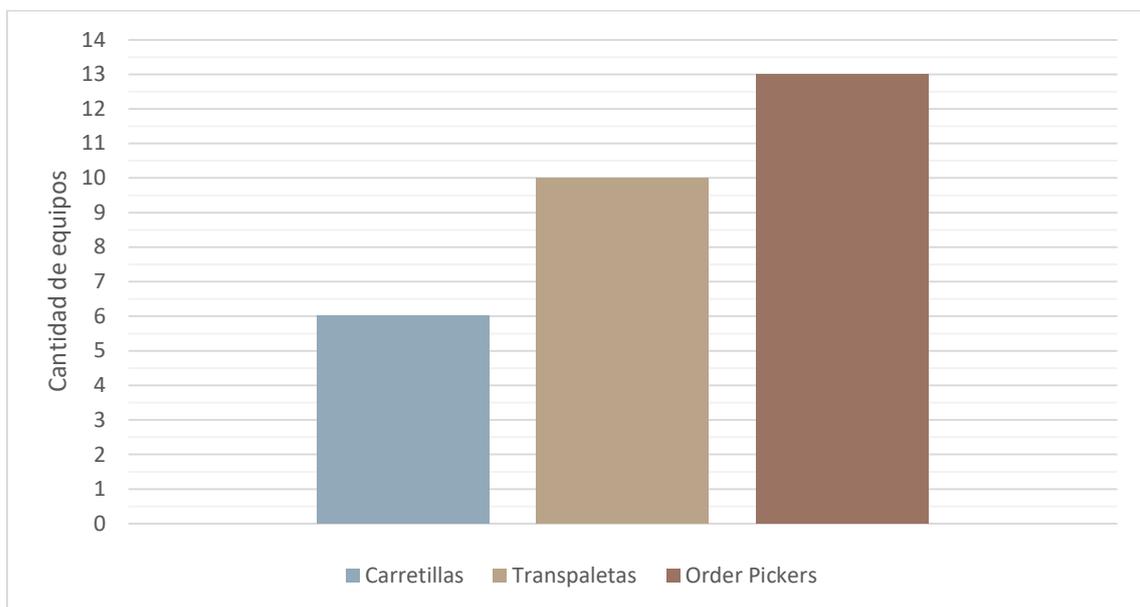


Gráfico 6. Cantidad mínima requerida por cada tipo de AGV.

7.6.3.2 TIEMPO INACTIVO

Es importante detenernos para conocer en qué momentos los AGVs no están realizando ninguna actividad de trabajo o de carga, a esto le llamamos tiempo inactivo. Este conocimiento puede ser valioso para hallar deficiencias del sistema y encontrar oportunidades de mejora. Se obtuvo como resultado los siguientes tiempos inactivos que se representan en el *Gráfico 7*, los cuales fueron agrupados por tipo de AGV y representados como porcentaje de tiempo inactivo sobre tiempo total de cada turno.

De la mano con lo que se mencionaba anteriormente, el fin de semana es el momento donde encontramos mayor cantidad de tiempo inactivo debido a la poca demanda de operación. En el caso de las *carretillas*, no tenemos tiempo inactivo como consecuencia de que le permitimos al sistema utilizarlas para operaciones de *transpaleta*, obteniéndose un aprovechamiento total de los recursos de este equipo. En referencia a los otros dos tipos de AGVs, se observan situaciones similares y alineadas a lo que se observa en los perfiles, de lunes a viernes se tiene menos tiempo inactivo mientras que sábados y domingos aumenta de forma considerable debido a la poca carga de trabajo.

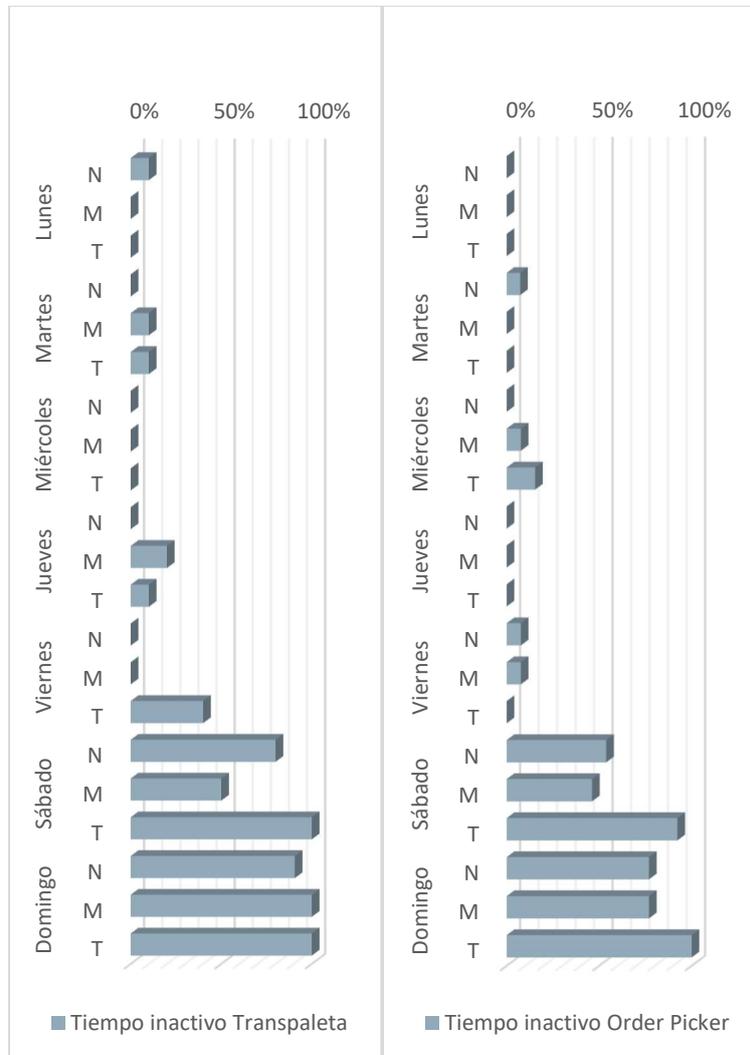


Gráfico 7. Porcentaje de tiempo inactivo para cada tipo de AGV, por día, por turno.

Si evaluamos el tiempo inactivo total de la semana para el conjunto total de equipos obtenemos un 21%. La *carretilla* se utiliza durante todo el tiempo de la semana por lo que el tiempo inactivo semanal es 0%, mientras que para las *transpaletas* y los *order pickers* se alcanza un 30% y 23% respectivamente.

Es coherente que la *transpaleta* sea el de mayor tiempo inactivo porque parte de su demanda de trabajo es realizado por las *carretillas* para poder reducir la totalidad de su tiempo inactivo y así minimizar la cantidad de equipos necesaria.

7.6.3.3 TIEMPO DE CARGA

Se obtuvieron los siguientes resultados con relación a los tiempos de carga, representados en el Gráfico 9. Los mismos fueron agrupados por tipo de AGV y representados como porcentaje

de tiempo de cada turno que los AGV se cargan. Como ya se mencionó en el desarrollo del modelo el tiempo de carga es proporcional al tiempo de trabajo. Es importante conocer su distribución para poder optimizar los procesos de carga y tenerlo presente para el consumo energético que tiene un impacto económico muy fuerte.

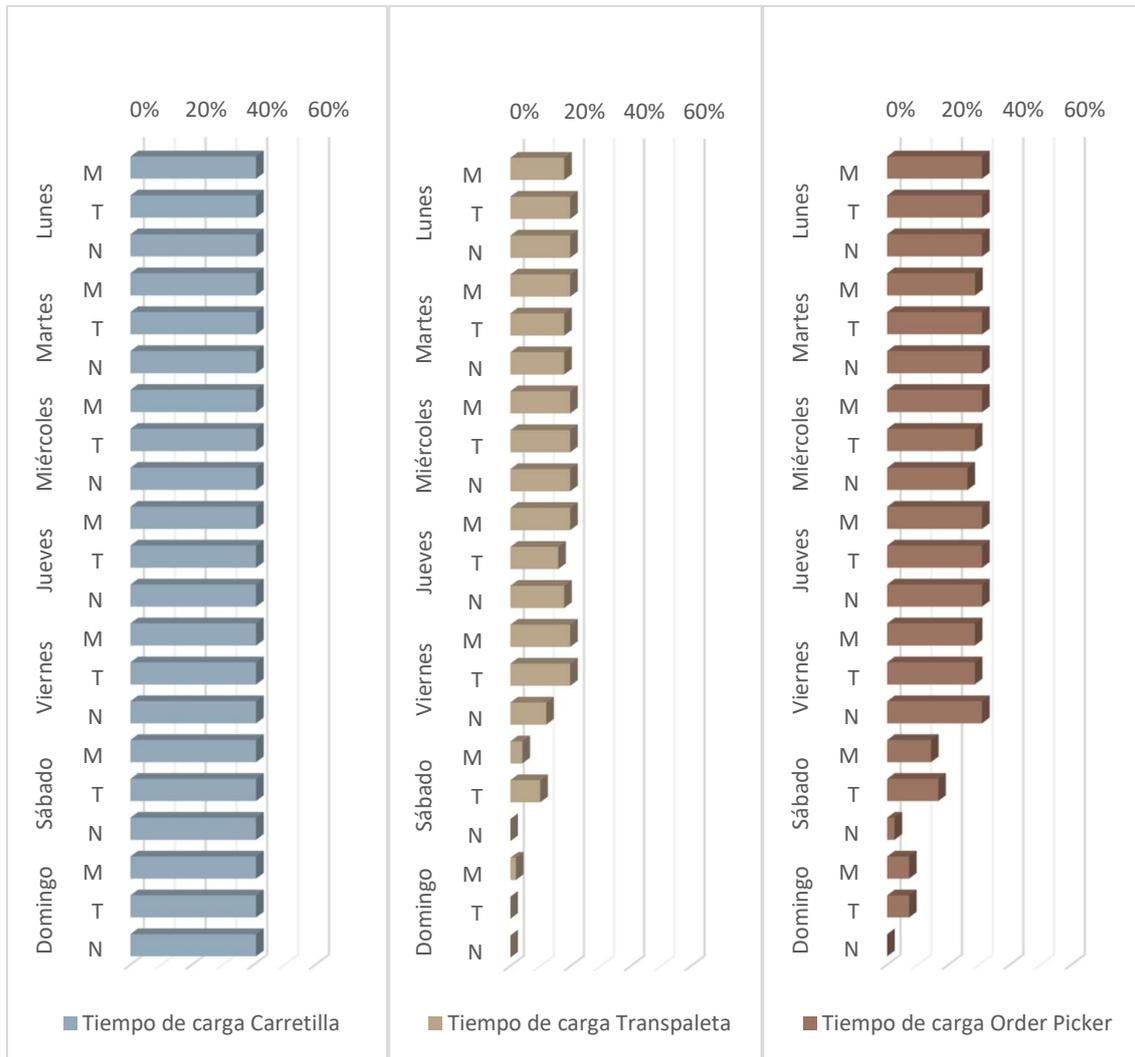


Gráfico 8. Porcentaje de tiempo de carga para cada tipo de AGV, por día, por turno.

Además, es interesante analizar el tiempo de carga de los equipos, ya que es un factor limitante en la operación debido a su importante porcentaje frente al tiempo de operación. Como se menciona en el marco teórico, los equipos auto guiados cuentan con baterías y cargadores específicos de diferentes características.

Las *carretillas* se cargan todos los días el mismo tiempo porque todos los días operan el máximo, en cambio las *transpaletas* y los *order pickers* cargan de forma relativamente constante de lunes a viernes mientras que los fines de semana cargan muy poco, incluso hay turnos que no es necesario cargarlos, debido a las pocas olas que deben realizar.

El tiempo de carga de cada tipo de equipo, queda determinado directamente por el tiempo de operación, pero también se ve afectado directamente por el factor de autonomía específico de cada AGV. El mismo, ya definido previamente, se relaciona con la potencia nominal de cada equipo, la potencia de carga de su respectivo cargador, y el porcentaje de uso de potencia de cada equipo al operar. En ese sentido el análisis debe contemplar estos múltiples factores. Consideramos interesante analizar la alternativa de eliminar este tiempo de carga para

umentar la productividad de los equipos y así disminuir la cantidad necesaria, por lo que luego ahondaremos en este estudio en el análisis de sensibilidad y alternativas.

7.6.3.4 TIEMPOS TOTALES

En este apartado detallamos los tiempos totales que son la suma de: el tiempo de operación, tiempo de carga y el tiempo inactivo. Se muestran agrupados para cada tipo de AGV, por día y por turno, como se ve en los gráficos siguientes.

Carretillas

Para las *carretillas*, nuestro modelo busca aprovechar su tiempo inactivo utilizándolo como tiempo disponible para las operaciones realizadas con *transpaleta*. Tal es así, que el tiempo inactivo de estos equipos llega a ser nulo. Como se observa en el *Gráfico 9*, la *carretilla* tiene solamente tiempo de operación y tiempo de carga.

El comportamiento del modelo nos da en la primera fase un tiempo inactivo para las *carretillas* pero luego, en la segunda fase, ese tiempo se utiliza para que se puedan realizar operaciones propias de las *transpaletas*. Esto es lo que explica que no haya tiempo inactivo de las *carretillas*.

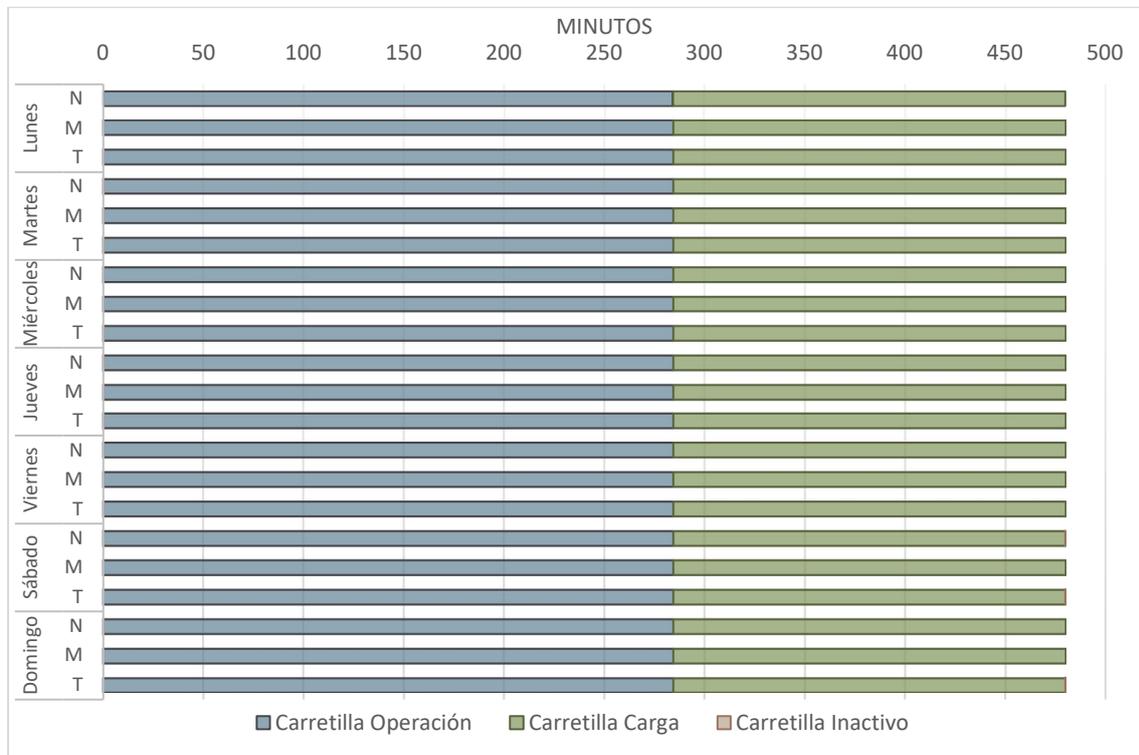


Gráfico 9. Tiempos totales de la carretilla, por día, por turno.

La relación entre el tiempo de carga y de operación está dado por el factor de autonomía, que en el caso de la *carretilla* es 1,45.

Transpaletas

En el caso de las *transpaletas*, la distribución de los tiempos es más heterogénea como se observa en el *Gráfico 10*, pero respeta un comportamiento similar de lunes a viernes y varía el fin de semana siendo la mayoría tiempo inactivo. La distribución es muy dispar, hay días y turnos donde hay muy poco tiempo inactivo mientras que el sábado y domingo el tiempo inactivo ocupa la gran mayoría.

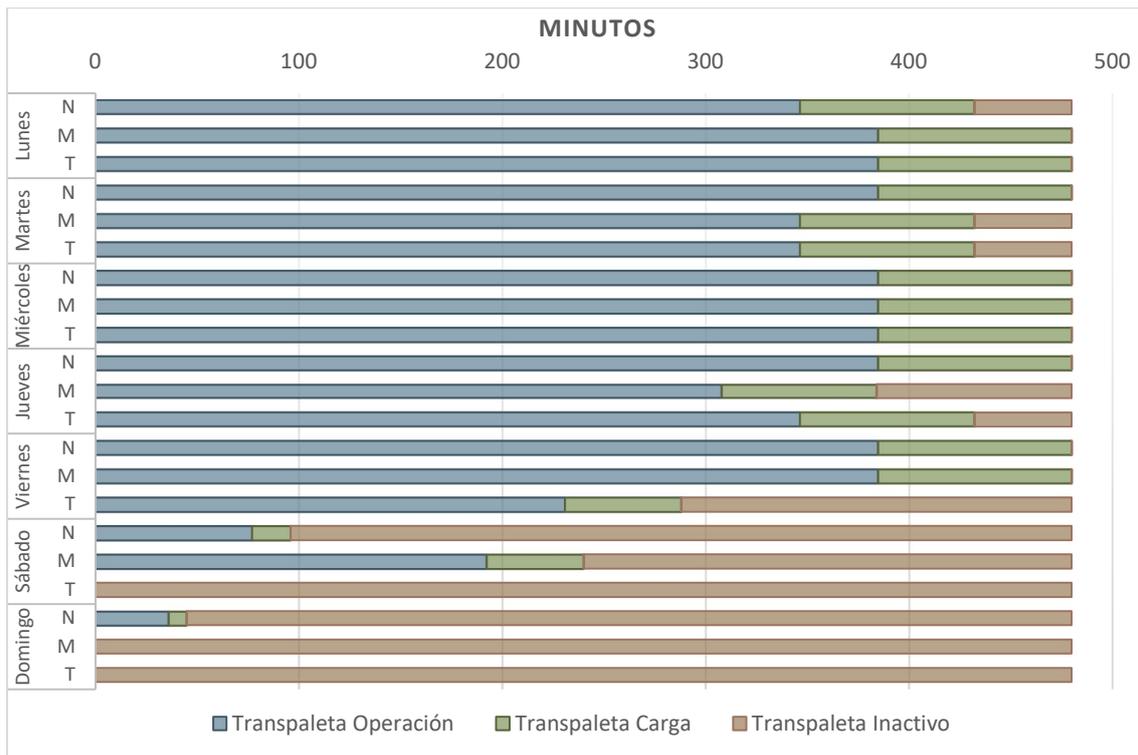


Gráfico 10. Tiempos totales de las transpaletas, por día, por turno.

Vemos en el Gráfico 11 la incidencia de un factor de autonomía mucho más alto, en este caso es de 4,03. Esto nos proporciona una relación mucho mejor entre el tiempo de operación y el tiempo de carga, como se puede observar los días en el que no hay tiempo inactivo.

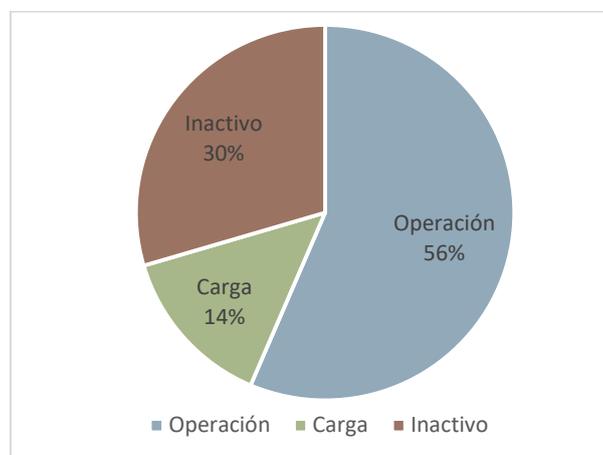


Gráfico 11. Distribución de tiempos totales semanal en las transpaletas.

Order Pickers

En el caso de los order pickers, notamos en el Gráfico 12 una distribución uniforme de lunes a viernes, mientras que sábado y domingo se observa la incidencia de la falta de carga de trabajo. En comparación con las transpaletas, los order pickers tienen un comportamiento más uniforme

de lunes a viernes y de sábado a domingo. Son varios los turnos donde se llega a consumir todo el tiempo disponible para operar y trabajar únicamente.

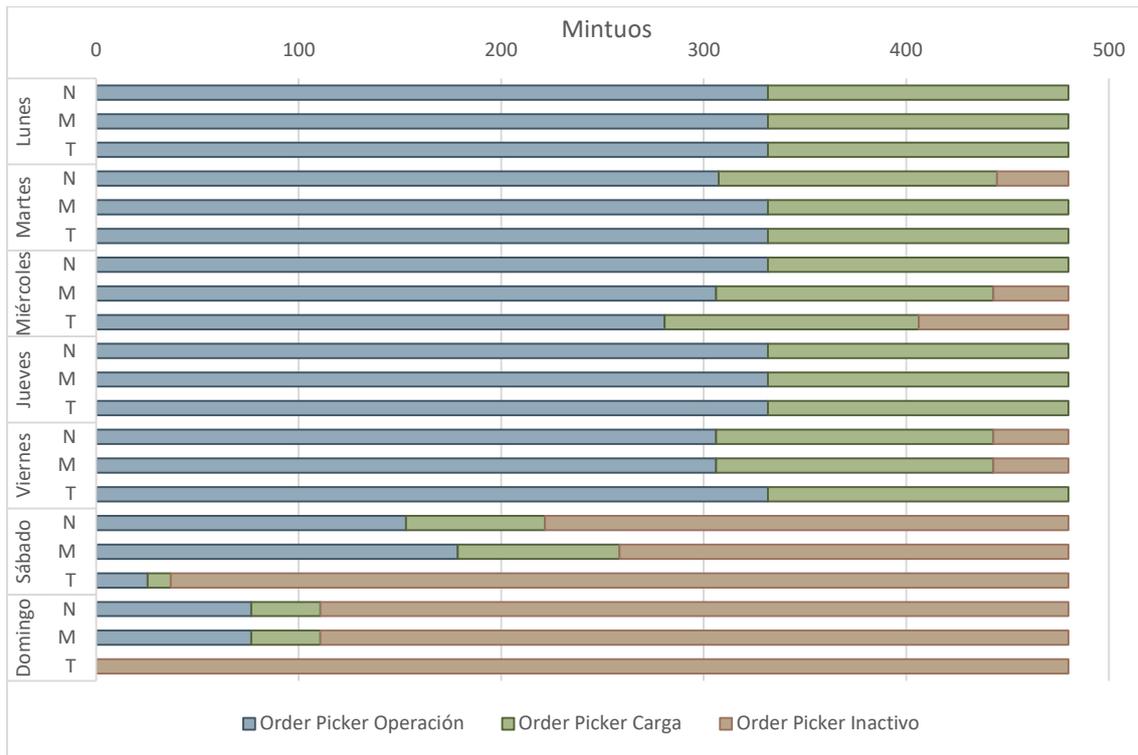


Gráfico 12. Tiempos totales de los order pickers, por día, por turno de cada equipo.

Los *order pickers* cuentan con un factor de autonomía de 2,24 siendo un valor intermedio entre las factor de autonomía de las *carretillas* y las *transpaletas*. En el Gráfico 13 se observa la relación semanal entre los dos distintos tiempos, siendo el tiempo inactivo y el tiempo de carga muy similar.

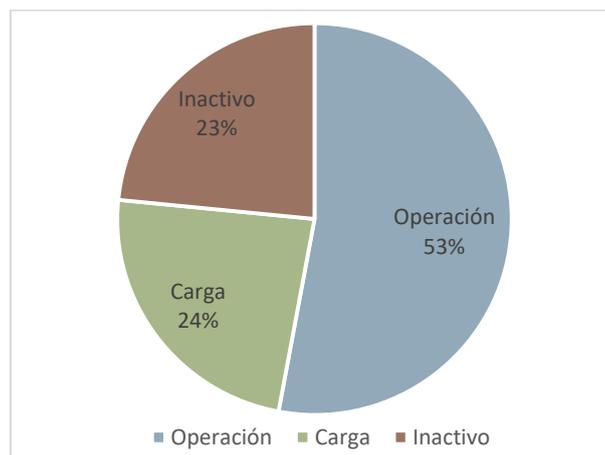


Gráfico 13. Distribución de tiempos totales semanal order pickers

7.6.4 COMPARACIÓN CON ACTUALIDAD

7.6.4.1 TIEMPOS DE OPERACIÓN

El primer punto para comparar entre un sistema de AGV y la operación con equipos manuales es el tiempo de ejecución de cada tarea. En la *Tabla 33* se exponen de forma comparativa los tiempos de ejecución de cada operación para el sistema actual y para el sistema propuesto de AGVs.

Tabla 33. Comparativa de tiempos de operación entre manual y AGV.

	Tiempos de Operación	MANUAL	AGV
1	Extracción	5,06	3,54
2	Almacenaje	2,85	2,89
3	Repos. Cajas	7,65	3,93
4	Reposición	7,00	3,68
5	Reparto	21,63	9,66
6	Reparto base	8,52	4,06
7	Picking	26,51	15,60
8	Reubicación para Reparto	2,68	2,12
9	Reubicación para Expedición	2,71	2,09
10	Reubicación Pre Recepción Expedición	9,46	2,11
11	Recepción	69,60	37,90
12	Expedición	60,76	36,04

En la *Tabla 33* podemos observar en primer lugar, que para todas las operaciones exceptuando la de *almacenaje*, los equipos auto guiados tienen un tiempo de ejecución considerablemente menor. Si bien los vehículos auto guiados se trasladan a velocidades menores que los manuales por normativa de seguridad, estos equipos realizan rutas que optimizan las distancias recorridas en el layout del depósito. Esto los diferencia de la operativa con equipos manuales, si bien el sistema le indica al operario un orden de recorrido óptimo, ellos realizan los recorridos guiándose según su propio conocimiento del depósito.

Se puede destacar a partir del *Gráfico 13* las tres operaciones que se ejecutan con *order picker* (*picking*, *reparto* y *reparto base*), por ser operaciones que se realizarían de forma mucho más eficiente con los *order pickers* auto guiados, reduciendo entre un 40% y un 50% los tiempos de operación. Esto se debe a la diferencia en la dinámica de la operación, con un equipo manual el operario debe subir al equipo, manejar, detenerse, manipular la mercadería, colocarla en el vehículo y volver a conducir, y se repite el proceso para cada posición de *pickeo*. Por otro lado, con AGV el proceso se reduce a que el operario camine al lado del equipo y coloque la mercadería en el mismo cuando éste se detiene.

En cuanto a las operaciones de *recepción* y *expedición* también se puede visualizar una reducción en los tiempos de ejecución. Para entender y justificar esta diferencia nos fue necesario conocer y comprender el proceso actual de estas operaciones.

Para la expedición, actualmente sucede que los pedidos no siempre están todos listos en los canales al momento en que se comienza a cargar el camión, iniciada la operación de *expedición*, muchas veces se debe esperar a que se realice la operación de *reubicación*, *pre-expedición*, lo que retrasa la operación de *expedición*. Consideramos que este retraso no aplicaría en un sistema de AGVs. Si bien no contemplamos la sincronización de las operaciones, entendemos,

conociendo la operativa del depósito, que este desfase entre operaciones se deben netamente a contratiempos de la operativa humana.

De igual forma sucede con la operación de *recepción*, se “lanza” la operación cuando el camión está en el muelle pronto para la descarga y con frecuencia recién antes de iniciar la descarga se termina de generar el espacio disponible en los canales generando retrasos indeseados.

Por otra parte, tenemos la operación de *almacenaje*, la cual tiene un tiempo aproximadamente equivalente para los dos tipos de equipos, manual y auto guiado. Este hecho no se aleja de lo supuesto, ya que la trayectoria realizada para la operación inicia en los canales hacia su ubicación final de almacenamiento, sin necesidad de mayores maniobras o detenimiento del equipo. Análogo es el caso de la *extracción*, siendo esta una operación similar de forma inversa. Para esta última encontramos en la realidad de la operación que muchas veces sucede el problema reiterativo del espacio disponible en los canales, una vez más sucede que se “lanza” la operación y se tienen que detener por unos instantes al llegar a los canales para la liberación del espacio. Este factor justifica un menor tiempo para los equipos auto guiados, considerando la inexistencia de estos imprevistos en un Sistema de AGVs.

Es importante agregar que el tiempo promedio de operación para los equipos manuales, se mide una vez que ya fue iniciada la operación, pero previamente es necesario que el operario ingrese a la PDA con su usuario y seleccione el equipo que utilizará. Este proceso lleva entre 2 y 5 minutos que no son contemplados en los tiempos plasmados en la planilla comparativa. Como contrapartida, el sistema de AGV, no requerirá de este procedimiento previo, lo que lo hace más eficiente.

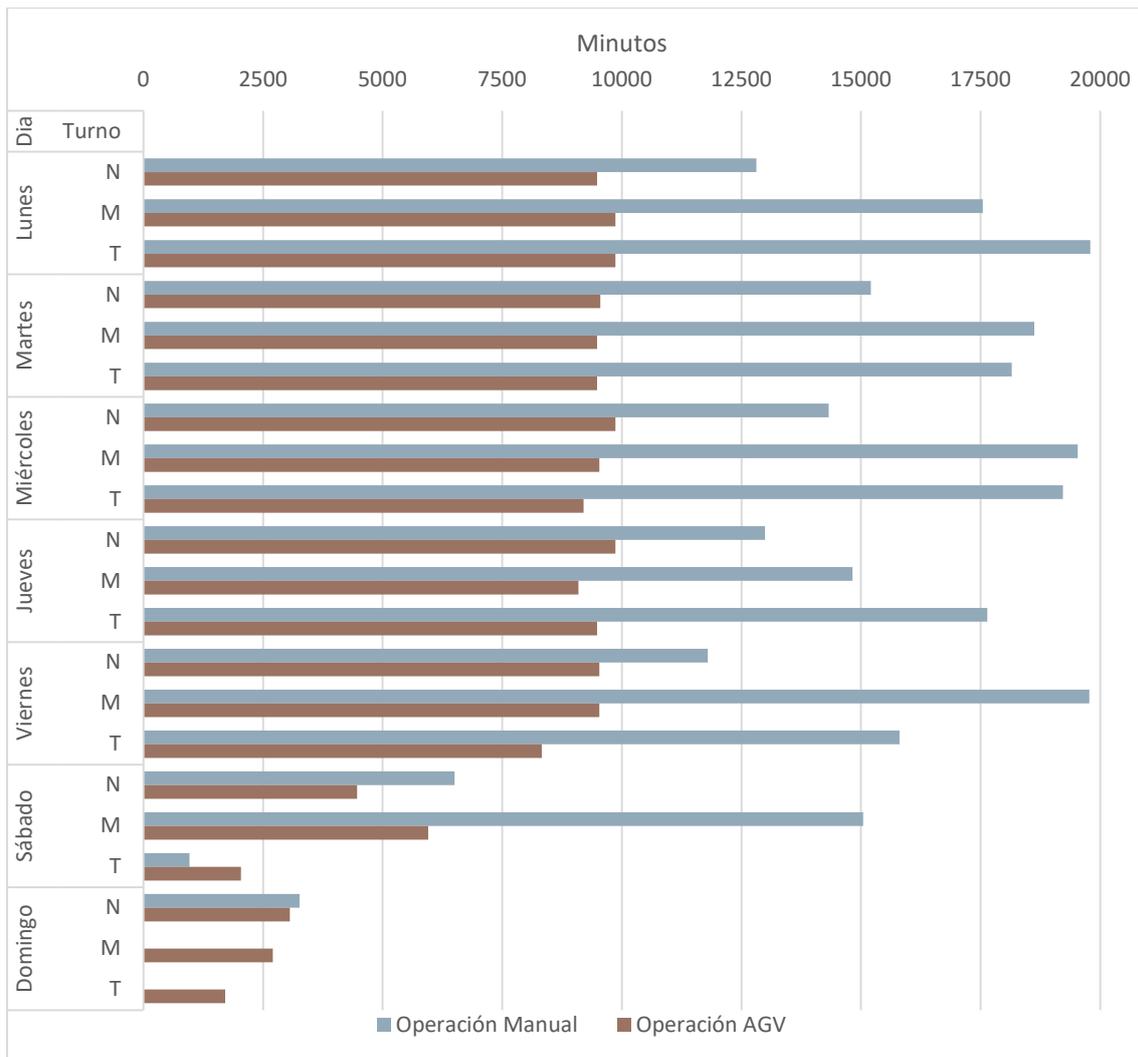


Gráfico 14. Tiempos totales comparativos de operación.

En *Gráfico 14* se muestra en detalle el tiempo de operación del total de equipos por turno y día. Para la mayoría de los turnos y días, los equipos manuales trabajan más tiempo que los AGVs. Por el contrario, los días sábados en la tarde y domingos en la mañana y la tarde, los auto guiados asignan un tiempo de operación, mientras que en la actualidad no se opera en estos turnos.

Esta redistribución más uniforme del tiempo de operación para los AGVs se debe a factores que la operación auto guiada tiene como ventaja frente a la manual. En el modelo, se define el “factor de cumplimiento mínimo” que exige realizar una mínima cantidad de operaciones pero permite distribuir las restantes de una forma más conveniente.

Los AGVs tienen la libertad de operar a un mismo ritmo en cualquier turno y cualquier día, diferenciándose de los equipos manuales dirigidos por operarios, quienes están limitados en tiempo de trabajo.

Actualmente la operación está adaptada a la mano de obra, reduciendo el trabajo en horarios nocturnos y días no hábiles por motivo de costos. Por este motivo, los días sábados y domingos hay una disminución abrupta en la operación. En un Sistema de AGVs se prescinde de esta limitación.

Puede notarse en la gráfica comparativa, que los AGVs eligen operar de noche para equilibrar la exigencia de demanda de la mañana y la tarde, aprovechado este turno sin necesidad de generar un costo operativo mayor.

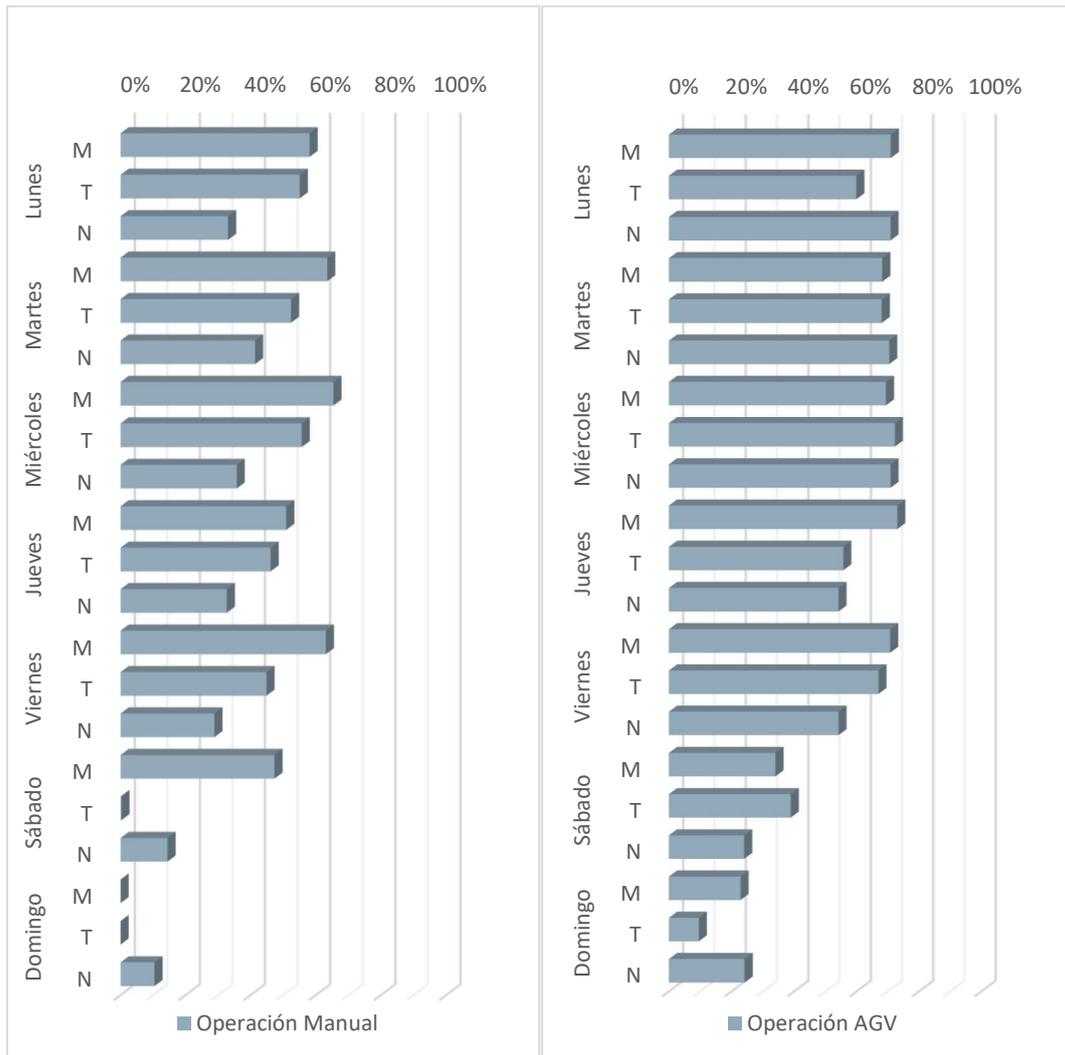


Gráfico 15. Porcentaje comparativo de operación con la situación actual.

En el *Gráfico 15* podemos visualizar el porcentaje de tiempo de operación para las dos alternativas. Se puede observar de forma directa que para el Sistema de AGVs no solo hay mayor aprovechamiento del tiempo (un porcentaje del tiempo total de operación mayor), sino que también una distribución más homogénea de los tiempos de operación para los distintos días y turnos. Los equipos manuales apenas alcanzan un aprovechamiento del tiempo total de un 60% en algunos turnos, mientras que los equipos auto guiados se acercan a un 70% en la mayor parte de los turnos. Se destaca en forma particular los días sábado y domingo que actualmente prácticamente no se trabaja.

Para estos días, los AGVs aprovechan a realizar las operaciones a las cuales otorgamos flexibilidad de cumplimiento semanal. De todas formas, no se alcanza un tiempo de trabajo a niveles del resto de los días de la semana, nuestros factores de mínimo cumplimiento diario de lunes a viernes, limitan a que la operativa sea completamente homogénea.

Además, no existen operaciones de *recepción* y *expedición* para estos días porque no llegan proveedores al depósito ni se abastece a los locales los domingos, ya que en la planificación de

abastecimiento se contempla toda la demanda del fin de semana en los pedidos armados y enviados los sábados en la mañana.

7.6.4.2 CANTIDAD DE EQUIPOS

En comparación con la actualidad, la alternativa de vehículos auto guiados reduce en una cantidad de 9 equipos los que corresponden a las *carretillas manuales*, en 10 equipos los que corresponden a *auto elevadores* y en 6 los *order pickers*.

Se pasaría de utilizar 53 equipos totales a utilizar un total de 29 equipos. Esta diferencia es considerable, ya que hablamos de una reducción de 45% en el total de equipos.

En los equipos que se nota una mayor reducción de cantidad requerida es en las *carretillas de gran altura*, exigiendo 10 equipos menos frente a los *auto elevadores manuales*. Puede esto resultar inesperado ya que si vemos las operaciones que se realizan actualmente por los *auto elevadores*; *extracción, almacenaje, reposición de cajas y reposición*, son operaciones que no varían en gran medida en el tiempo de ejecución entre el equipo manual y el auto guiado. Pero lo que permite explicar esta diferencia es la reasignación de las operaciones para este equipo, por lo que no es representativa la comparación estricta. Se propone para las *carretillas de gran altura* la ejecución de 4 operaciones en lugar de 6, justificando esta diferencia tan grande en cantidad de equipos. Las operaciones de *reparto y reparto base* fueron asignadas al *order picker*, ya que son operaciones que no requieren altura y requieren a su vez, de un operario.

Para los *order pickers* sucede lo inverso ya que es esperable que si la operación de *picking* reduce en el orden de un 40% en el tiempo de ejecución, entonces los equipos deberían reducir en cantidad en este mismo orden. En este caso sucede también que a este equipo se le asignan las operaciones de *reparto y reparto base* como se explicaba anteriormente.

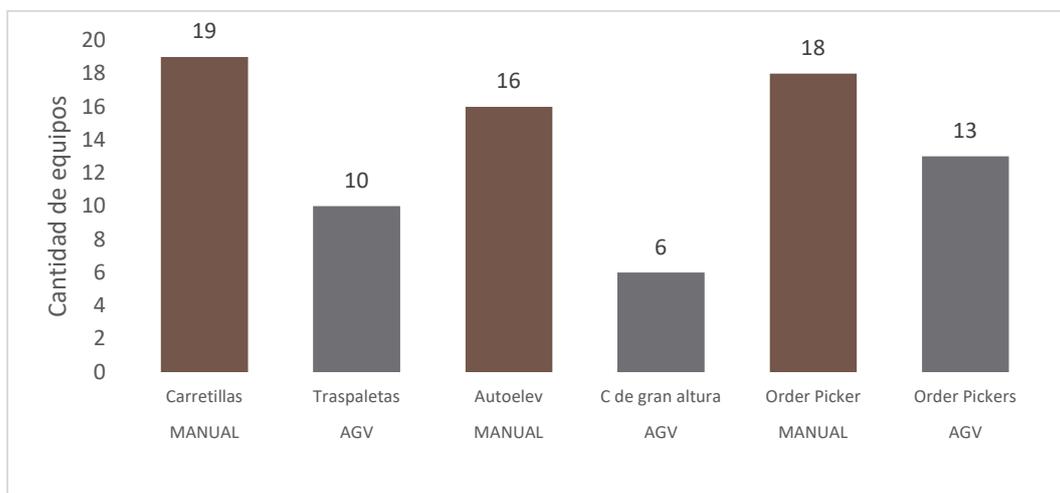


Gráfico 16. Comparación de cantidad de equipos requeridos.

Luego del análisis realizado hasta el momento, podemos resaltar un aspecto importante a considerar; la cantidad de equipos con la que actualmente opera la compañía está sobredimensionada para la demanda requerida en estudio.

Entendemos que una comparación directa entre la cantidad de equipos utilizados actualmente y la obtenida a partir de nuestro modelo no es del todo realista. Consideramos fundamental remarcar el punto mencionado anteriormente ya que nos permitirá desviar nuestro análisis hacia un enfoque más conservador. Para esto realizaremos un modelo representativo de la realidad actual con sus recursos optimizados (equipos manuales) y así poder comparar éste con el modelo de AGVs propuesto, permitiendo luego realizar una mejor

evaluación sobre nuestro proyecto. Esto será presentado en nuestro capítulo de *Evaluación de Alternativas y Análisis de sensibilidad*.

7.6.4.3 TIEMPOS TOTALES

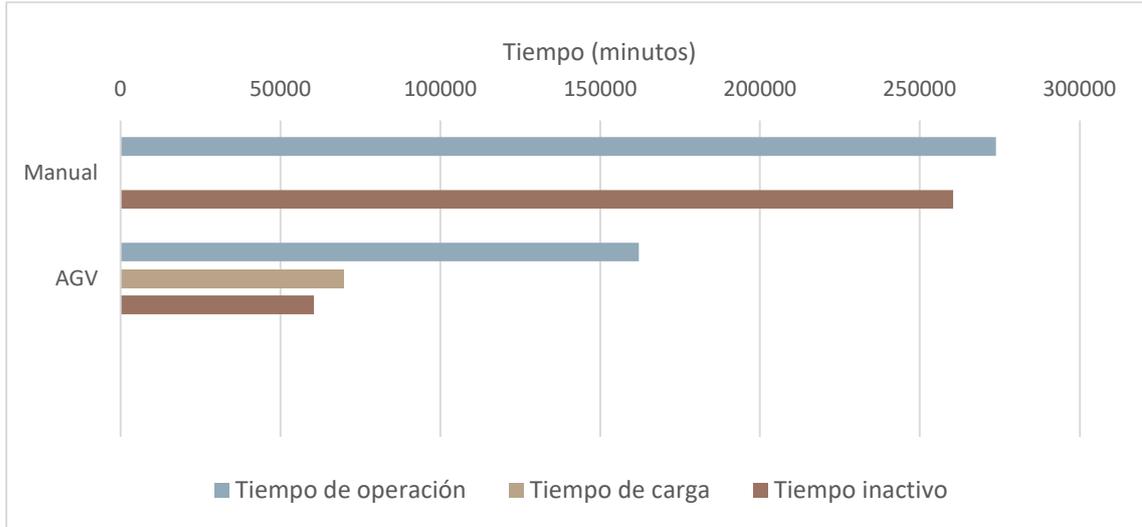


Gráfico 17. Comparación de tiempos totales con situación actual.

Se puede visualizar de forma comparativa en el *Gráfico 17* la diferencia entre los tiempos de operación, inactivo y de carga entre las dos alternativas. Los equipos autoguiados aventajan a los manuales en el porcentaje de tiempo de operación por equipo. Mientras que los equipos actuales pasan un 49% del tiempo inactivo, los equipos autoguiados lo hacen en un 21%.

Consideramos valioso estudiar el comportamiento tanto del tiempo de operación, como el tiempo de carga y el tiempo inactivo, ya que van a ser factores que impactarán en distintos aspectos; el valor de la inversión, la demanda cumplida por unidad de tiempo y el aprovechamiento del tiempo para poder realizar otras tareas de valor para la operación. Estos tres tiempos se analizarán de forma particular a continuación.

7.6.4.4 TIEMPO INACTIVO

En el sistema de equipos auto guiados, los tiempos inactivos están relaciones indirectamente al factor de mínimo cumplimiento. Éstos determinan el tiempo de operación mínimo, y por ende el tiempo inactivo máximo. A mayor flexibilidad en el cumplimiento de las operaciones, mejor distribución del tiempo de operación lo que lleva a alcanzar un menor tiempo inactivo. Esto no sucede en la situación actual.

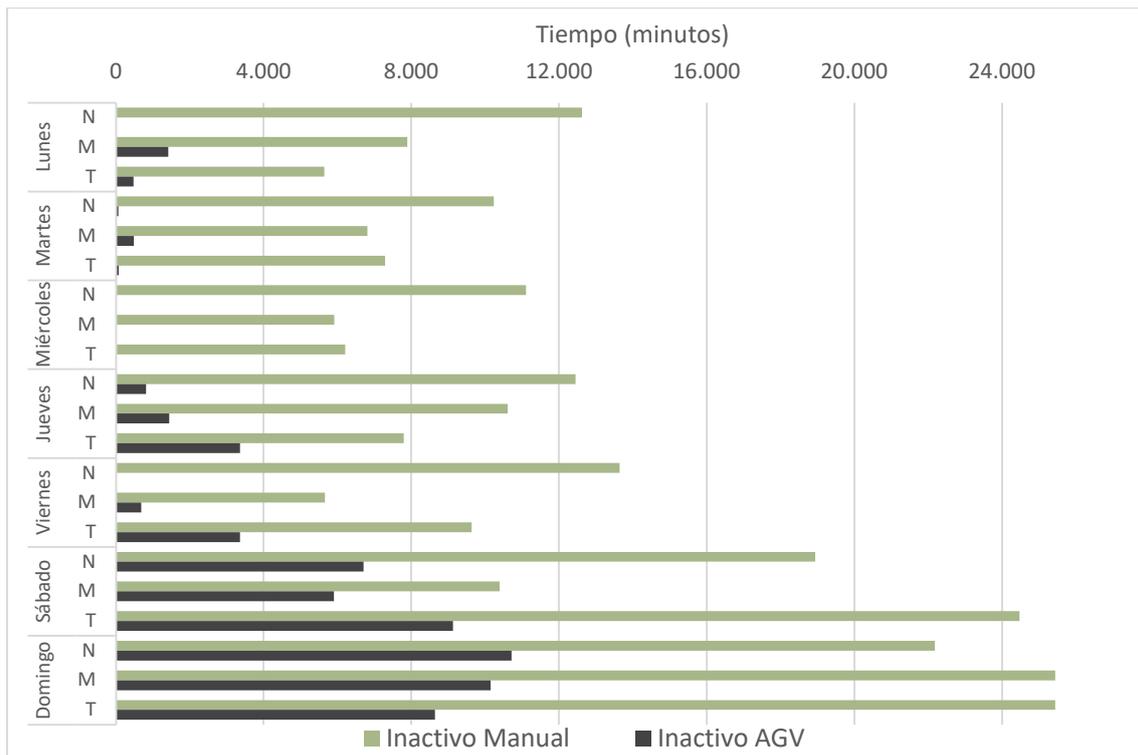


Gráfico 18. Comparación tiempo inactivo con situación actual.

Podríamos pensar que el tiempo inactivo de los AGVs debería ser cercano o igual a cero para todos los días, pero en nuestro modelo base propuesto de AGVs, este “factor de mínimo cumplimiento” no permite que los equipos realicen operaciones en cualquier turno y las distribuyan libremente, sino que exige un determinado cumplimiento por turno. Consideramos este como un punto interesante de analizar por lo que será profundizado en el capítulo de análisis de sensibilidad.

El turno de mayor demanda tendrá incidencia en el tiempo inactivo, ya que será el determinante de la cantidad de equipos necesaria para cumplir con lo requerido lo que luego generará en el resto de los turnos de menor demanda un tiempo inactivo. Para esta observación nos podemos apoyar en el *Gráfico 18*.

Puede visualizarse también a partir del *Gráfico 18* la fluctuación del tiempo inactivo durante la semana para ambos modelos, mientras que el modelo manual presenta entre 6000 y 12000 minutos de tiempo inactivo durante toda la semana, el modelo de AGVs hay días que éste es casi nulo. En particular se puede notar un incremento los días sábados y domingos debiéndose esto a la disminución de la operación.

Al analizar más en detalle el tiempo inactivo de los equipos manuales impacta tener un 49% de tiempo inactivo total. Esto nos permite remarcar lo mencionado anteriormente acerca del sobredimensionamiento de equipos en la actualidad. Al profundizar en esto, vemos que el turno que menos tiempo inactivo tiene es de un 21% del tiempo total (lunes de mañana), por lo que en ningún turno se están utilizando el máximo de los equipos. De los 53 equipos que se utilizan actualmente no se requieren todos. Ese 21% equivale a 11 equipos, por lo que podría llegar a suponerse que con 11 equipos menos se podría operar satisfactoriamente.

7.6.4.5 TIEMPO DE CARGA

En cuanto al tiempo de carga, los equipos actuales tienen un tiempo de carga fijo según el tipo de equipo. Las autoelevadores tienen una carga diaria de 7 horas, mientras que las carretillas tienen un tiempo de carga de 4 horas y el picker de 6 horas.

Actualmente, este tiempo de carga no incide en los tiempos de operación, ya que cuentan con baterías adicionales para cada uno de los equipos. Por otra parte, el modelo de AGVs planteado en esta primera alternativa sí tiene un tiempo de carga que incide en el tiempo de operación, ya que el tiempo en el que el equipo está cargando, no está disponible para operar.

Consideramos este factor como un punto importante a analizar de nuestro modelo, tal es así que luego lo profundizaremos en nuestro análisis de sensibilidad.

Esta comparación entre los tiempos de carga nos resultará de interés a la hora de valorar el consumo eléctrico de la carga de los equipos, lo cual no es menor ya que hoy en día representan aproximadamente un 40% del consumo total de energía eléctrica del Centro de Operaciones.

7.6.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

Nuestro caso base busca determinar la cantidad mínima de equipos para poder cumplir con la demanda y sustituir a los equipos actuales. Es previsto por la compañía un determinado crecimiento anual de la demanda, no obstante, se tomará en consideración el mismo aumento tanto para el caso actual como para el Sistema de AGVs propuesto.

A su vez, los ingresos serán los mismos para ambos casos, por lo que no serán parte de la evaluación económica y financiera. La misma consistirá en comparar tanto la inversión requerida como los costos operativos de la propuesta de AGVs frente a la situación actual.

Trabajaremos sobre todos los rubros necesarios y haremos una evaluación de proyecto a 10 años.

7.6.5.1 INVERSIÓN EN AGV

Definiremos algunos grandes rubros en referencia a la inversión requerida para instalar los AGVs; consultoría previa, infraestructura y obra civil, maquinaria, instalaciones mecánicas y suministros, instalaciones eléctricas, software y capacitaciones.

Tomaremos como referencia para el costo de los equipos, un estudio de mercado realizado por un proveedor desarrollador de sistemas de navegación de AGVs, que trabaja en conjunto con la mayoría de los fabricantes de maquinaria. Para el resto de los costos utilizaremos información proporcionado por distintos proveedores. [20]

Vale destacar que la tecnología LGV elegida en el proyecto tiene un costo de instalación relativamente bajo, no requiere de mayores adecuaciones a nivel de infraestructura, los principales componentes son reflectores de bajo costo. Por lo tanto es una solución de relativo bajo costo, de fácil y rápida instalación.

Agregaremos además costos asociados a la compra, transporte, kits de repuestos, entre otros.

Como comentario definimos nuestro “año 0” como el año donde se realiza la compra de equipos, estos van a tener un plazo de fabricación, suministro y puesta en marcha, para comenzar a operar en el “año 1”.

En la *Tabla 34* reflejamos la de inversión para el Año 0. La empresa prevé anualmente un crecimiento del 7% de la demanda, por lo cual, para acercar nuestro análisis a una situación más real, calculamos la cantidad de AGVs requeridos considerando dicho aumento. El personal que hay que contratar para atender este crecimiento, no es un valor de incidencia.

Elevación de carga	500kg	1000kg	1500kg	2000kg	3000kg	4000kg
Nivel de Piso						
1m	\$50000				\$65000	
2m		\$60000		\$70000		
3m						
4m					\$85000	
5m						
8m	\$80000		\$85000			\$95000
10m						

Tabla 34. Estudio de mercado. (Fuente: Proveedor de sistemas Kollmorgen)

Utilizaremos las cantidades de equipos requeridos en cada año calculadas a partir de nuestro modelo considerando el aumento de la demanda anual presentado en el punto 4 del capítulo de *Evaluación de Alternativas y Análisis de Sensibilidad*.

Agregaremos como inversión en nuestro flujo de fondos la compra anual de los mismos. El detalle de las cantidades requeridas a comprar en el año 0 se ve en la *Tabla 36* y para los siguientes años en la *Tabla 35*.

Tabla 35. Cantidad de AGV a comprar anualmente.

Compra de equipos x año (aumento 7%)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Cant. Carretillas	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
Cant. Transpaletas	0	1	2	0	1	1	1	1	1	1
Cant. Order Pickers	0	1	1	0	3	2	0	1	1	2

Tabla 36. Inversión inicial en AGV [20]

Concepto	Precio USD	Cantidad	Precio Total USD
Consultoría			
<i>Estudio de prefactibilidad</i>		1	15.000
Infraestructura y obra civil			
<i>Área de Mantenimiento</i>		1	1.500
<i>Área de Supervisión</i>		1	1.500
<i>Área de Carga</i>		1	12.500
Maquinaria			
<i>Carretilla de gran altura</i>	100.000	6	600.000
<i>Transpaleta autoguiada</i>	65.000	10	650.000
<i>Order picker</i>	80.000	13	1.040.000
<i>Kit de repuestos críticos</i>	1.500	29	43.500
<i>Transporte marítimo de maquinaria</i>		1	44.000
<i>Inspección en fábrica</i>		1	3.000
Instalaciones mecánicas y suministros			
<i>Suministro de sistema de guiado</i>		1	35.000
<i>Instalación de sistema de guiado</i>		1	15.000
<i>Puesta en marcha del sistema</i>		1	5.000
<i>Elementos de seguridad</i>		1	3.000
Instalación eléctrica			
<i>Instalaciones en Zona de carga</i>		1	1.500
Software			
<i>Sistema de control de guiado</i>		1	45.000
<i>Integración de software</i>		1	3.000
<i>Instalación del sistema</i>		1	5.000
Capacitación			
<i>Capacitación de software</i>		1	2.000
<i>Capacitación de manejo equipos</i>		1	4.500
<i>Capacitación de mantenimiento</i>		1	2.500
Imprevistos			
<i>Imprevistos 10% total inversión</i>		1	251.450
Total			2.784.250

Como comentario relativo a la reestructura del personal, podrían plantearse diversos escenarios y suposiciones. Por ejemplo, puede ser que exista la posibilidad de asignar el personal a nuevos puestos de trabajo en otras áreas de la empresa. Por otro lado, si se consideraran despidos, el costo sería relativo a la antigüedad y a otras consideraciones necesarias a evaluar al momento de la reestructuración. No se considerará el rubro despidos por ser un tema sensible.

Por otra parte, se podría incluir también en la inversión la venta de la maquinaria actual, reduciendo los costos y haciéndolo económicamente más favorable. Si bien este punto no fue contemplado, se verá más adelante que, en caso de considerarlo, no influirá en las conclusiones finales.

7.6.5.2 COSTO OPERATIVO DE LOS AGV

En relación con los costos operativos, definimos cuatro rubros donde se van a presentar diferencias de la situación actual comparado con la propuesta de AGV. Estos son: mano de obra, software informático, consumo de energía eléctrica y mantenimientos.

Dentro de los costos de mano de obra requerida, considerando los tres turnos y la necesidad de trabajar en turnos rotativos, serán 52 operarios de depósito adjudicando 4 operarios para cada order picker, considerando que, 4 supervisores del sistema de AGV y 4 mecánicos especializados.

Se requerirá un software particular para la gestión de los AGV. Para el consumo de energía eléctrica utilizamos los tiempos de carga de nuestro caso base y la potencia de los cargadores elegidos inicialmente.

Será necesario un servicio de mantenimiento para los equipos, en este punto definimos, por un lado, un servicio de mantenimiento preventivo anual y por otro un servicio de mantenimiento programado cada 4000 horas de operación o, en su defecto, cada 2 años y también un mantenimiento correctivo cada 4 años. Finalmente, un contrato de servicio permanente (*Long term service agreement "LTSA"*) con el fabricante/proveedor de los equipos.

Tabla 37. Costos operativos anuales para el sistema de AGV en el año 1.

Concepto Anual	Cantidad	Unitario anual en USD	Precio total anual en USD
Mano de obra			
<i>Salario Operario depósito</i>	52	10.909	567.273
<i>Salario Supervisor de sistema</i>	4	32.727	130.909
<i>Salario Mecánico especializado</i>	4	24.545	98.182
<i>Costo anual empresa</i>	1		238.024
Software informático			
<i>Mantenimiento anual</i>	1		3.600
Electricidad			
<i>Cargo variable UTE</i>	1		54.480
Mantenimiento			
<i>Preventivo</i>	1	3.000	3.000
<i>Programado</i>	0,50	4.500	2.250
<i>Correctivo</i>	0,25	8.000	2.000
<i>Contrato de servicio permanente</i>	1	4.000	4.000
<i>Kit de repuestos anuales</i>	1	3.000	3.000
Total			USD 1.103.245

7.6.5.3 INVERSIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

En relación con el sistema actual, al igual que para el sistema de AGVs vamos a contemplar un crecimiento del 7% en la operación.

Simplificaremos el cálculo aumentando anualmente un 7% la cantidad requerida de equipos, manteniendo la lógica de operación actual e ineficiencias existentes. En la *Tabla 38* vemos la cantidad requerida año a año. Estos costos los reflejaremos en el flujo de fondos de la situación actual.

Tabla 38. Cantidad de equipos manuales a comprar anualmente.

Compra de equipos x año (aumento 7%)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Cant. Carretillas	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
Cant. Transpaletas	0	1	2	0	1	1	1	1	1	1
Cant. Order Pickers	0	1	1	0	3	2	0	1	1	2

7.6.5.4 COSTO OPERATIVO DEL SISTEMA ACTUAL

Para el costo operativo del sistema actual, definimos los costos de operación asociados a las operaciones que forman parte de nuestro caso de estudio. Se analizó la cantidad de operarios requeridos, el consumo de energía eléctrica y costos de mantenimiento.

Siguiendo la línea de razonamiento planteada anteriormente, en nuestro flujo de fondos consideraremos un aumento de la cantidad de operarios anual, por cada equipo nuevo que se compra, se contratarán 3 nuevos operarios, 1 por cada turno.

Tabla 39. Costo operativo anual del sistema actual en el año 1.

Concepto Anual	Cantidad	Unitario anual en USD	Precio total anual en USD
Mano de obra			
<i>Salario Operario depósito</i>	190	9.545	1.813.636
<i>Salario Supervisor de sistema</i>	4	16.364	65.455
<i>Salario Mecánico especializado</i>	4	16.364	65.455
<i>Costo anual empresa</i>	1		581.203
Electricidad			
<i>Cargo variable UTE</i>	1		44.804
Mantenimiento			
<i>Preventivo</i>	1		500
<i>Programado</i>	0,50	1.500	750
<i>Correctivo</i>	0,25	3.000	750
<i>LTSA</i>	1		
<i>Kit de repuestos anuales</i>	1	3.000	3.000
Total			USD 2.575.552

7.6.5.5 CÁLCULOS DE VAN Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Algunas de las consideraciones que tuvimos al realizar el flujo de fondos, el horizonte del proyecto lo fijamos a 10 años, un aumento salarial anual del 8%, un aumento en el costo de la energía eléctrica del 9% anual y finalmente un aumento del dólar del 3% anual.

Tabla 40. Parámetros para el flujo de fondos y VAN.

Concepto	Valor
Cotización del dólar	\$ 44
Cotización del euro dólar	USD 1,18
Ajuste salarial anual	% 8
Aumento dólar anual	% 3
Aumento costo energía eléctrica	% 9

En la *Tabla 41* vemos la comparativa de los flujos de fondo para cada sistema, en los documentos anexos se puede ver el detalle de los cálculos. Vale aclarar que los VAN son negativos porque solo se están comparando costos operativos, los ingresos serán los mismos, ya que la demanda permanece fija, y por lo tanto los ingresos no varían según el sistema.

Tabla 41. Flujo de fondos comparativo y VAN.

Años	Flujos de fondos Sistema de AGV	Flujos de fondos Sistema actual
0	-USD 2.784.250	USD -
1	-USD 1.103.245	-USD 2.575.552
2	-USD 1.308.671	-USD 2.803.103
3	-USD 1.429.591	-USD 2.936.059
4	-USD 1.373.623	-USD 3.075.652
5	-USD 1.642.895	-USD 3.222.220
6	-USD 1.725.537	-USD 3.376.119
7	-USD 1.526.688	-USD 3.565.907
8	-USD 1.676.995	-USD 3.735.615
9	-USD 1.850.607	-USD 3.913.841
10	-USD 2.007.686	-USD 4.101.025
VAN	-USD 12.930.312	-USD 21.656.303

En el *Gráfico 19* observamos los valores acumulados para cada flujo de fondos, vemos que al cabo de 3 años se logra un ahorro que iguala la inversión en el sistema de AGVs

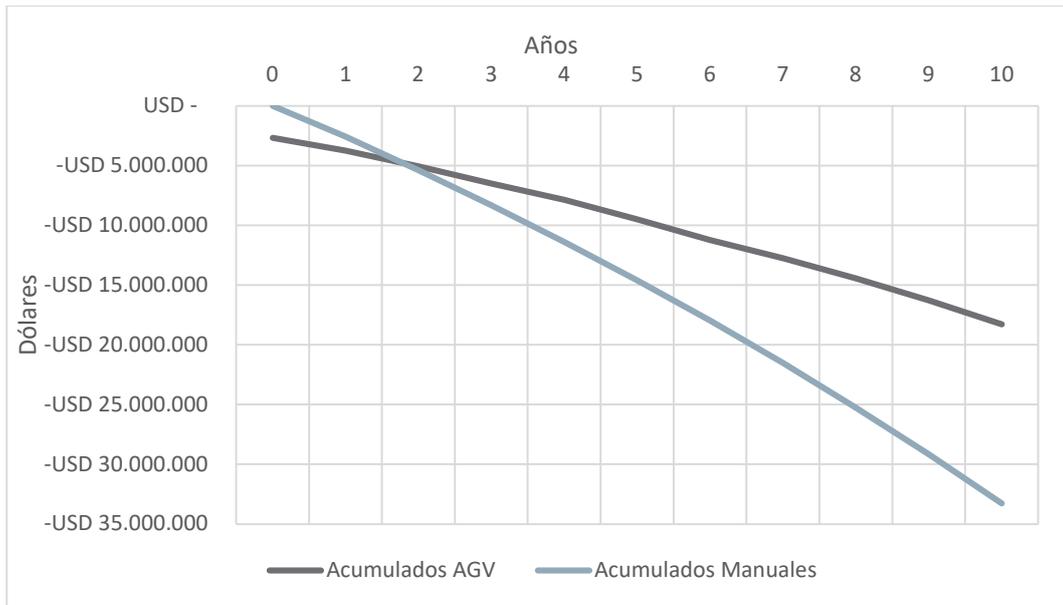


Gráfico 19. Recuperación de la inversión del Caso Base.

7.6.6 CONCLUSIONES DEL CASO BASE

Como conclusiones primarias obtenemos que el proyecto de sustitución de los equipos manuales por vehículos autoguiados es ampliamente rentable. La comparación de los VAN de cada flujo de fondos arroja un resultado sumamente alentador para la propuesta.

Además, vemos que al cabo de 3 años se logra un ahorro que iguala la inversión en el sistema de AGVs, el presupuesto del sistema actual en valores actualizados, casi duplica al presupuesto del sistema de AGV.

Habiendo llegado a este punto del proyecto comprendimos que el Sistema de AGVs propuesto no es francamente comparable con la situación actual. En la actualidad existe un sobredimensionamiento en la cantidad de equipos, lo que se concluyó a partir del análisis realizado hasta el momento. Esto lo consideraremos a continuación.

En nuestra evaluación de alternativas y análisis de sensibilidad haremos algunas consideraciones y suposiciones para analizar más en detalle estos resultados.

7.7 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad es una herramienta que sirve para conocer cómo se comporta el modelo al hacer variar alguna de las variables, parámetros en particular o incluso cambiar supuestos establecidos inicialmente.

Estos cambios del modelo para su posterior estudio pueden aportar información muy relevante para la toma de decisiones futuras en la ejecución del proyecto.

Esto permite plantear distintos escenarios que podrían suceder el día de mañana o que pueden dar información muy valiosa. Como resultado puede surgir que la situación planteada en el caso base es la mejor opción, o pueden aparecer alternativas más favorables que sean de interés.

Los distintos análisis de sensibilidad se pueden enfocar en aspectos muy concretos y al mismo tiempo muy variados según lo que se busque estudiar. A continuación, se plantean varios análisis, alternativas y la comparación de los distintos resultados.

7.7.1 MODELO ACTUAL OPTIMIZADO

7.7.1.1 MOTIVACIÓN

Cómo se mencionó anteriormente, comprendemos que el Sistema de AGVs propuesto no es francamente comparable con la situación actual debido a que en la actualidad existe un sobredimensionamiento en la cantidad de equipos. Por este motivo, entendemos que sería más significativo comparar nuestra propuesta de equipos autoguiados frente a un sistema actual con sus recursos optimizados, tanto de equipos como de mano de obra, siendo este último el principal costo operativo.

Esto proporcionaría, en cierta forma, una “penalización” a nuestro modelo, que permite evaluar finalmente si aún con un modelo actual optimizado, éste sigue resultando favorable.

Si bien la propuesta de una situación actual óptima puede resultar evidente, entendemos que a nivel práctico es esperable encontrarse con una sobrestimación de los recursos, ya que es preferible para la compañía asegurar un correcto funcionamiento de la operación, aunque esto implique mayores costos.

7.7.1.2 PROCEDIMIENTO

Para este análisis realizamos el estudio de la cantidad de equipos efectivamente necesaria para cumplir con la demanda operativa. Distribuimos las distintas operaciones para cada tipo de equipo como realmente se realiza en la actualidad, la misma es la esquematizada en la *Tabla 42*.

Tabla 42. Distribución de operaciones por equipos manuales y tiempos de operación.

Equipo Manual	Operación	Tiempo de operación promedio (min/ola)
Auto elevadores	Extracción	5,06
	Almacenaje	2,85
	Repos. Cajas	7,65
	Reposición	7,00
Order Picker	Picking	26,51
Carretillas	Reparto	21,63
	Reparto base	8,52
	Reubicación para Reparto	2,68
	Reubicación para Expedición	2,71
	Reubicación	9,46
	Pre-recepción Expedición	8,40
	Recepción	8,40
	Expedición	1,53

Frente a esta distribución de operaciones manuales con sus respectivos tiempos y considerando la demanda en olas de operaciones establecida para nuestro modelo base (demanda máxima anual), obtendremos la cantidad de equipo requerida para cumplir con la demanda en cada turno, cada día. Esta cantidad de equipos obtenida representará un modelo de equipos manuales optimizado, con el cual finalmente realizaremos la comparación con nuestra propuesta de sistema de AGVs.

7.7.1.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Habiendo calculado el tiempo de operación total de cada turno que se requiere para cada tipo de equipo, basados en los tiempos de operación presentados en la *Tabla 42*, se obtuvo la cantidad requerida de cada tipo de equipo en cada turno y día, la cual se presenta a continuación en la *Tabla 43*.

Tabla 43. Cantidad de equipos manuales requeridos para cumplir la demanda por turno.

Día	Turno	Auto elevadores	Order Pickers	Carretillas
Lunes	Noche	4	10	13
	Mañana	6	13	17
	Tarde	5	12	21
Martes	Noche	6	10	16
	Mañana	6	13	17
	Tarde	6	13	19
Miércoles	Noche	5	7	18
	Mañana	6	13	18
	Tarde	7	12	21
Jueves	Noche	4	8	14
	Mañana	4	12	13
	Tarde	6	8	21
Viernes	Noche	4	7	14
	Mañana	6	13	19
	Tarde	6	8	19
Sábado	Noche	3	2	9
	Mañana	6	11	14
	Tarde	0	0	2
Domingo	Noche	1	3	2
	Mañana	0	0	0
	Tarde	0	0	0

Luego de obtenida la *Tabla 43*, tomamos el máximo de estos valores para cada equipo, los cuales se muestran a continuación en la *Tabla 44*. Como resultado tenemos que la cantidad real requerida por la operación actual del Centro de Distribución es de 7 *auto elevadores*, 13 *Order Pickers* y 21 *carretillas*, si se opera de forma óptima. De todos modos, para una consideración real es conveniente plantear una cobertura frente a posibles fallas de un 10%, lo que daría un total de 8 *auto elevadores*, 15 *Order Pickers* y 23 *carretillas*.

A modo de comparación, se presentan los resultados para las situaciones óptimas y se incluye la cantidad de equipos promedio necesarias en un modelo óptimo.

Tabla 44. Cantidad de equipos para los distintos casos.

	Auto elevadores	Order Pickers	Carretillas
Cantidad promedio de equipos manuales en situación óptima	4	8	14
Cantidad máxima de equipos manuales en situación óptima	7	13	21
Cantidad de equipos manuales actualmente	10	18	25

El análisis nos da un total de 41 equipos requeridos para cumplir con nuestros turnos de máxima de demanda. Analizando comparativamente con la situación real actual en la que se

cuenta con 53 equipos, podemos decir que la misma tendría un potencial de optimización de un 23% de sus recursos, tanto en cantidad de equipos como de personal.

A modo de comprender mejor el incorrecto dimensionamiento de los equipos actuales, nos resulta interesante presentar los valores del total de equipos para cada turno y día, que quedarían inutilizados si se utilizara eficientemente. Los mismos se muestran en la *Tabla 45*.

Tabla 45. Cantidad de equipos manuales que no requieren ser utilizados en la operativa actual.

Día	Turno	Cantidad total de equipos no requeridos
Lunes	Noche	26
	Mañana	18
	Tarde	15
Martes	Noche	21
	Mañana	18
	Tarde	15
Miércoles	Noche	23
	Mañana	16
	Tarde	13
Jueves	Noche	26
	Mañana	23
	Tarde	18
Viernes	Noche	28
	Mañana	15
	Tarde	20
Sábado	Noche	39
	Mañana	22
	Tarde	51
Domingo	Noche	46
	Mañana	53
	Tarde	12

Llama notoriamente la atención los números obtenidos en la *Tabla 45*, ya que muestra cuantos equipos menos podrían estar utilizándose para cumplir con la misma demanda. Esto no indica que toda esta cantidad de equipos este actualmente sin operar, sino que refleja lo que en una situación de trabajo optimizado podría reducirse en cantidad de equipos.

7.7.1.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica de este modelo implicará como única diferencia con la situación actual una reducción del personal encargado del manejo de estos equipos, dado que se reduce en cantidad de maquinaria, también en cantidad de personal.

Como mencionamos vamos a considerar una reducción del 23% del personal y la cantidad de equipos requeridos, el resto de los valores y consideraciones se mantendrán igual que en la evaluación realizada en el caso base.

En la *Tabla 46* vemos los cambios en los costos operativos asociados a mano de obra. En el flujo de fondos de la *Tabla 47* además se ve reflejado una menor cantidad de equipos que se tienen que ir comprando año a año.

Tabla 46. Cambios en los costos operativos optimizando la situación actual.

Concepto Anual	Cantidad	Monto Año en USD	Precio total Año en USD
Mano de obra			
<i>Salario Operario depósito</i>	147	9.545	1.403.182
<i>Salario Supervisor de sistema</i>	4	16.364	65.455
<i>Salario Mecánico especializado</i>	4	16.364	65.455
<i>Costo anual empresa</i>	1		458.523

Tabla 47. Flujo de fondos comparativo con la situación actual optimizada.

Años	Flujos de fondos Sistema de AGV	Flujos de fondos Sistema actual optimizado
0	-USD 2.784.250	USD -
1	-USD 1.103.245	-USD 2.112.418
2	-USD 1.308.671	-USD 2.225.111
3	-USD 1.429.591	-USD 2.330.930
4	-USD 1.373.623	-USD 2.442.069
5	-USD 1.642.895	-USD 2.558.802
6	-USD 1.725.537	-USD 2.681.417
7	-USD 1.526.688	-USD 2.837.607
8	-USD 1.676.995	-USD 2.972.921
9	-USD 1.850.607	-USD 3.115.083
10	-USD 2.007.686	-USD 3.264.452
VAN	-USD 12.930.312	-USD 17.272.486

La comparación de los VAN de cada flujo de fondos ahora con la situación actual optimizada sigue dando un resultado favorable para la realización del proyecto.

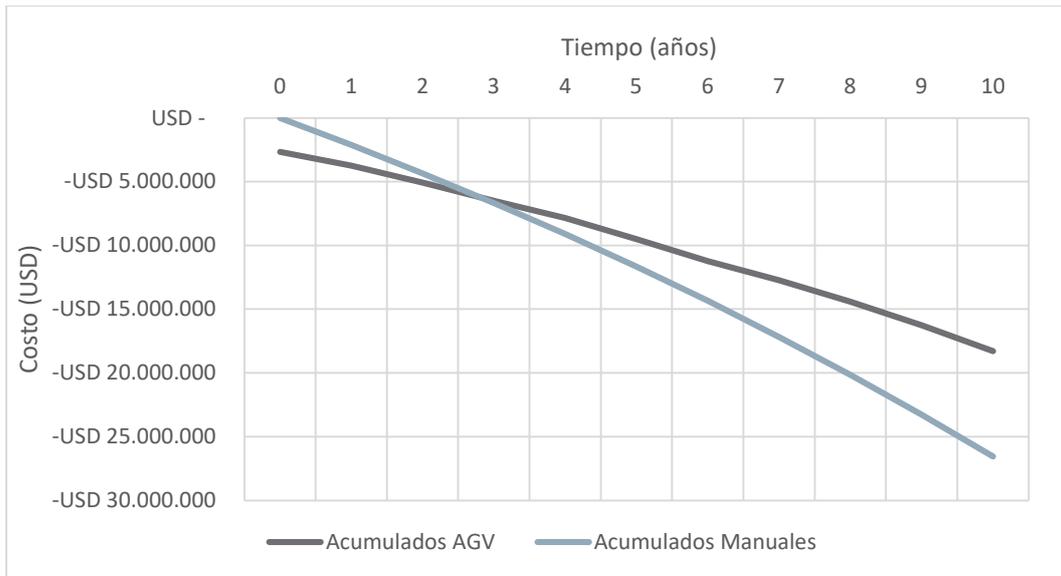


Gráfico 20. Recuperación de la inversión para la comparación con la situación actual optimizada.

El período de recuperación de la inversión inicial aumenta a 4 años, y el presupuesto del sistema actual en valores optimizados, aún sigue siendo considerablemente superior.

7.7.2 MODELADO SIN COMPARTIR EQUIPOS

7.7.2.1 MOTIVACIÓN

No siempre es viable utilizar distintos tipos de equipos para una misma operación, como sucede en nuestro caso de estudio. Puede existir el caso donde las operaciones puedan ser ejecutadas específicamente por un único tipo de AGV.

Es de interés generar un modelo donde cada operación se limite a un único tipo de AGV. Por otro lado, esto nos permitirá conocer el beneficio de nuestro modelo base que permite compartir *transpaletas* y *carretillas* para algunas operaciones puntuales y evaluar si efectivamente compartir operaciones genera una solución más favorable.

7.7.2.2 PROCEDIMIENTO

En relación con nuestro caso base, limitaremos la flexibilidad de las siguientes operaciones: *Reubicación para reparto*, *Reubicación para expedición* y *Reubicación de recepción y expedición*, exigiéndoles ser ejecutadas únicamente por *transpaletas*.

Se define un nuevo *Modelo 2*, donde utilizaremos solamente la “Fase 1” del modelo base, incluyendo todas las operaciones dentro de su respectivo grupo. Se llevará a cabo con la misma demanda de trabajo que en el modelo base.

7.7.2.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Debido a que el tiempo inactivo de las *carretillas* ya no se podrá aprovechar para realizar operaciones que generalmente se hace con la *transpaletas*, es esperable que el número mínimo de las *transpaletas* aumente. Por otro lado, la cantidad mínima de *carretillas* y *order pickers* no se debería ver afectada por estos cambios.

La cantidad mínima necesaria que obtuvimos como resultado es de 13 *order pickers*, 11 *transpaletas* y 6 *carretillas*. Notamos como único cambio el aumento en una unidad de la cantidad mínima requerida de *transpaletas*. Por otro lado, la cantidad de *carretillas* y *order pickers* permaneció igual como era de esperar.

En cuanto los perfiles, era esperable que el perfil de *order pickers* permanezca incambiado, ya que el mismo no se ve afectado por la condición de compartir equipos. Mientras que en los

perfiles de *carretillas* y *transpaletas* notamos cambios, vemos dos perfiles cuya distribución es mucho menos homogénea a la del caso base. Podemos notar picos de tiempo inactivo de la carretilla en diferentes turnos.

Aquí también podemos observar el aprovechamiento de la *carretilla* que obtenemos en nuestro caso base, hay una diferencia notoria en el perfil del caso base que es homogéneo en torno a las 6 unidades mientras que para este caso es muy distinto como se observa en el nuevo perfil del *Gráfico 21*.

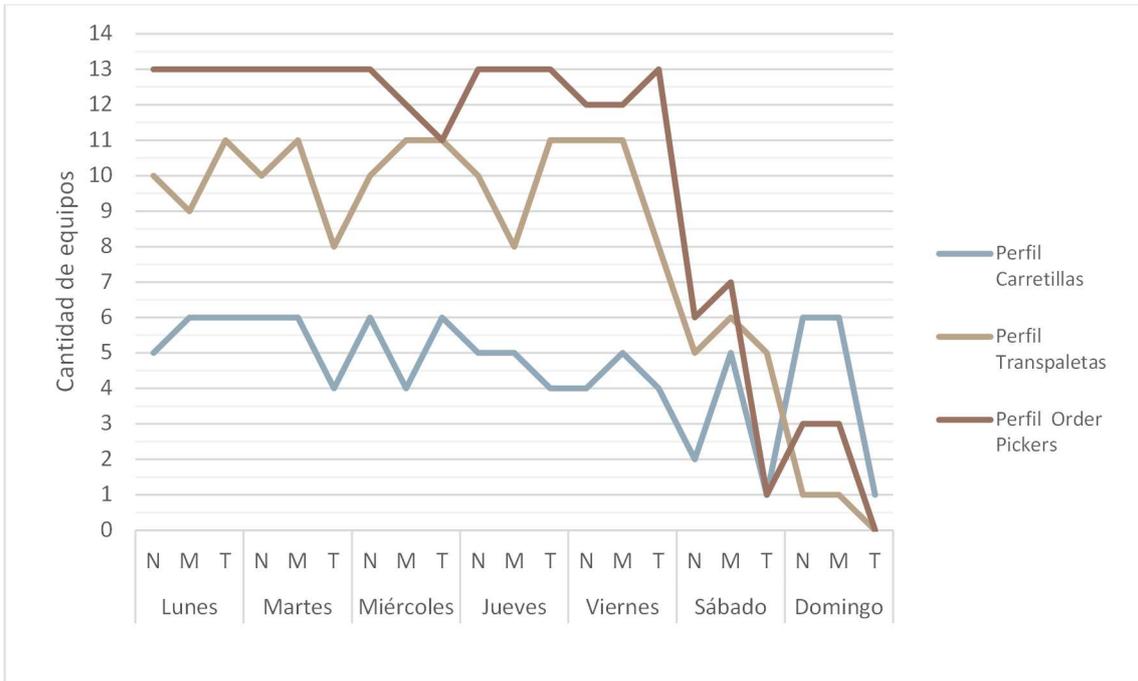


Gráfico 21. Perfil de cantidad de equipos sin compartir equipos, Modelo 2.

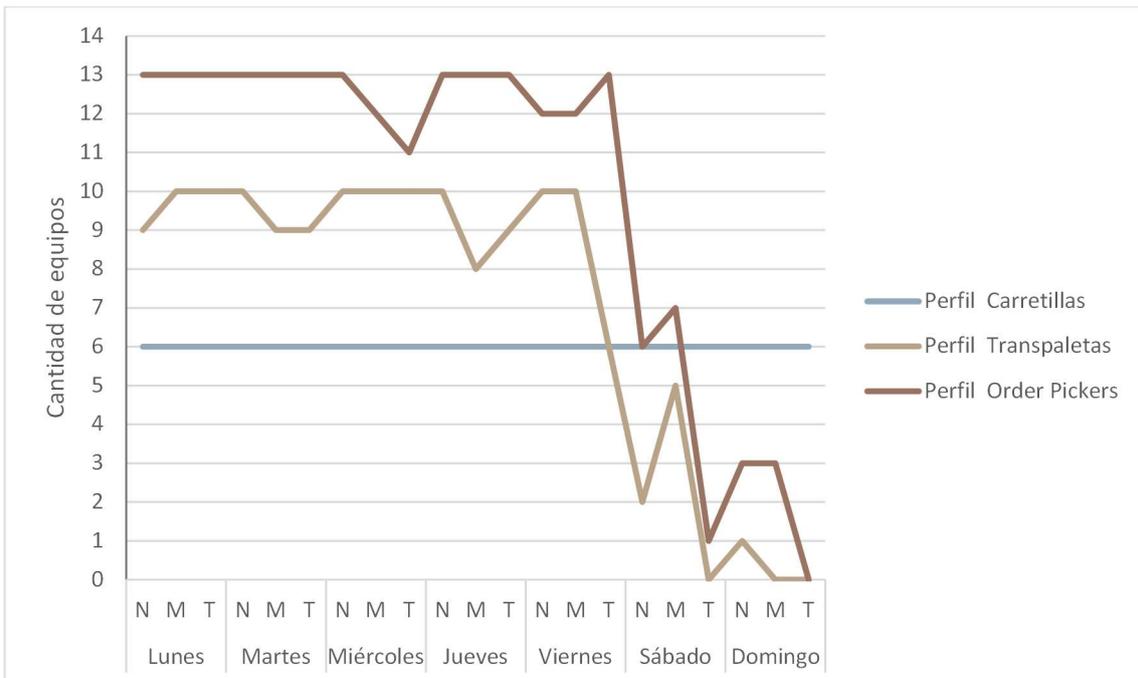


Gráfico 22. Perfil de cantidad equipos caso base.

En relación con el tiempo inactivo, vemos en el *Gráfico 23* que aparecen tiempos inactivos de la carretilla. Mientras que el caso base teníamos una cantidad de tiempo inactivo nula semanal, aprovechando todo ese tiempo para operaciones de *transpaleta*.

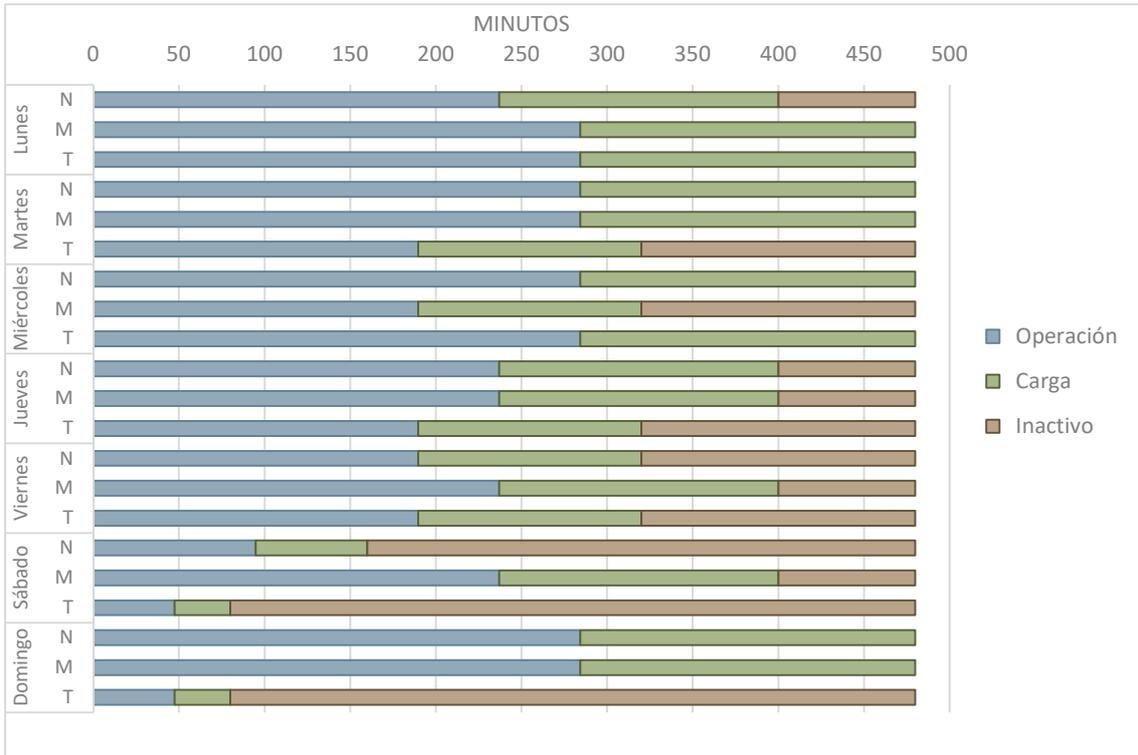


Gráfico 23. Tiempos de la carretilla totales sin compartir operaciones.

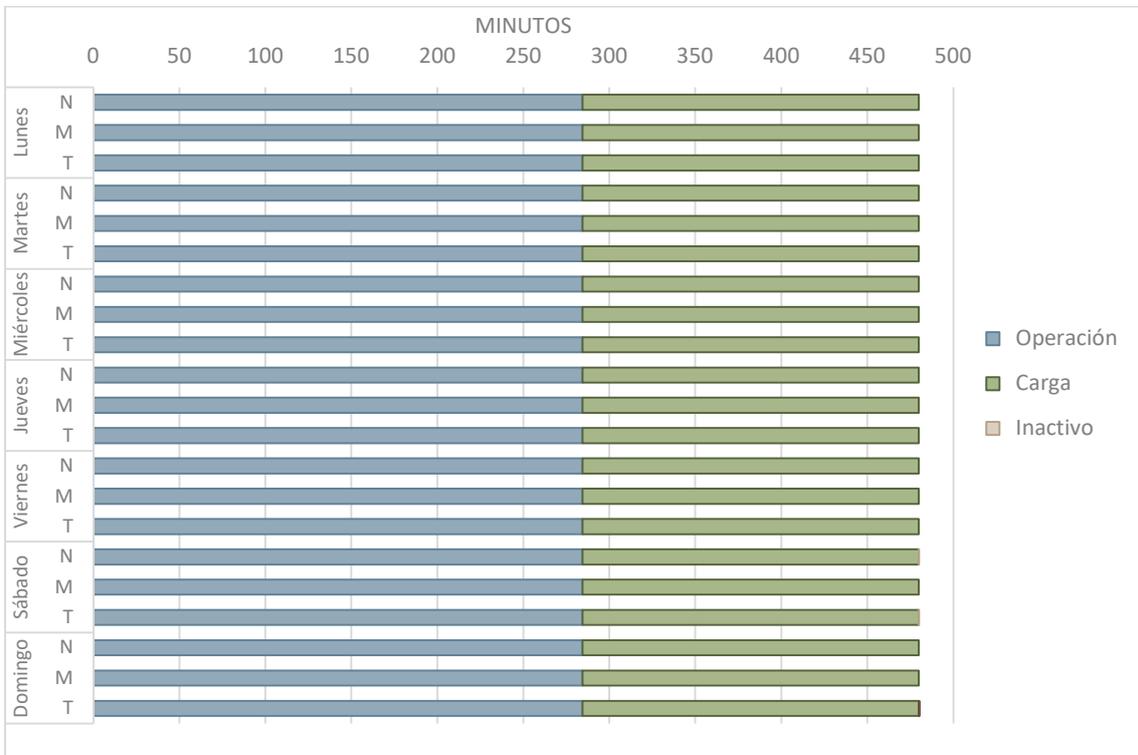


Gráfico 24. Tiempos de la carretilla totales del caso base.

En relación con lo económico financiero, tomar esta alternativa no implica mayores cambios frente a los resultados del caso base. Simplemente se genera un adicional en la inversión inicial

asociado a la compra de una unidad más de *transpaleta*. Los gastos operativos son insignificantes.

7.7.3 AUMENTO DE LA DEMANDA EN UN 20% ANUAL

7.7.3.1 MOTIVACIÓN

Dado que la compañía estima un crecimiento anual de 7% de la demanda, consideramos de interés analizar el comportamiento del modelo propuesto frente a un mayor crecimiento anual, para esto propusimos un valor de aumento en 20%.

Por otro lado, el Centro de Operaciones cuenta con posibilidad de albergar más mercadería pudiendo alcanzar a almacenar un 60% más de la mercadería acompañado de una optimización del espacio y los tiempos de operación.

Otro aspecto que nos invita a interesarnos en esta evaluación es considerar una posible ampliación y crecimiento de la empresa en los años futuros por encima del crecimiento ya previsto.

7.7.3.2 PROCEDIMIENTO

Para este análisis, se tomará el mismo modelo que el utilizado en el caso base, solamente se trabaja modificando valores paramétricos. Se aumentará la demanda actual de forma escalonada de a 20% hasta llegar a duplicarse.

7.7.3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

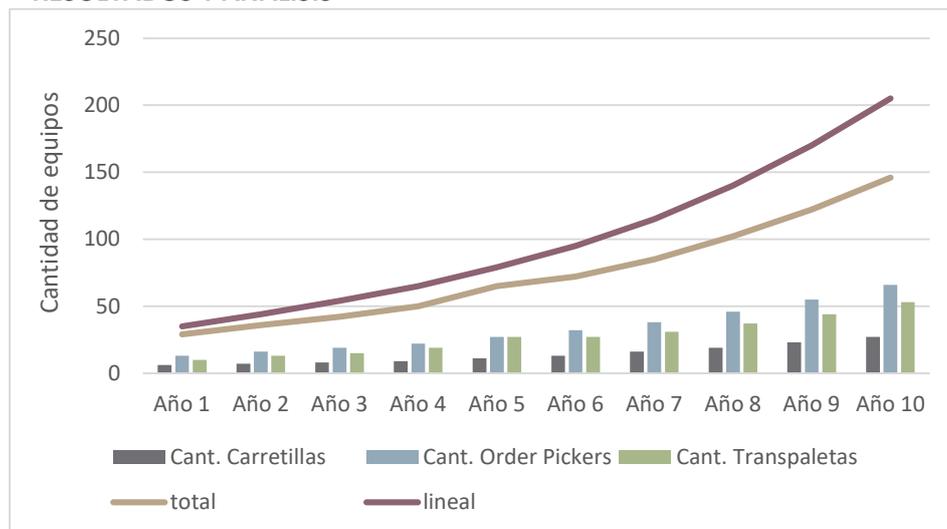


Gráfico 25. Crecimiento de cantidad de equipos requeridos frente a crecimiento anual de la demanda en un 20%.

En el *Gráfico 25* podemos observar el aumento de la cantidad de equipos respecto al aumento de la demanda. El crecimiento se comporta según lo esperado, a medida que crece la cantidad de operaciones a realizar, la cantidad de equipos incrementa, pero no de una forma estrictamente lineal. Podemos visualizar comparativamente en el gráfico las curvas de crecimiento real y “lineal”.

La curva que se observa como “lineal” refiere a el incremento directo del 20% en el número de equipos anualmente. Para ello fue necesario discretizar los valores ya que el número de equipos no se puede fraccionar.

Si examinamos los valores obtenidos a partir del análisis frente a los valores correspondientes a un aumento lineal, podemos encontrar una diferencia entre la cantidad de equipos requerida que va en aumento ante mayores niveles de demanda. Esto nos permite entender que hay un mayor aprovechamiento de los equipos ante una mayor demanda.

Nos resulta interesante, a partir de esto, querer conocer hasta cuando sigue aumentando esa diferencia, y como sigue comportándose esta relación entre el crecimiento de la demanda y el aumento de la cantidad de equipos requeridos.

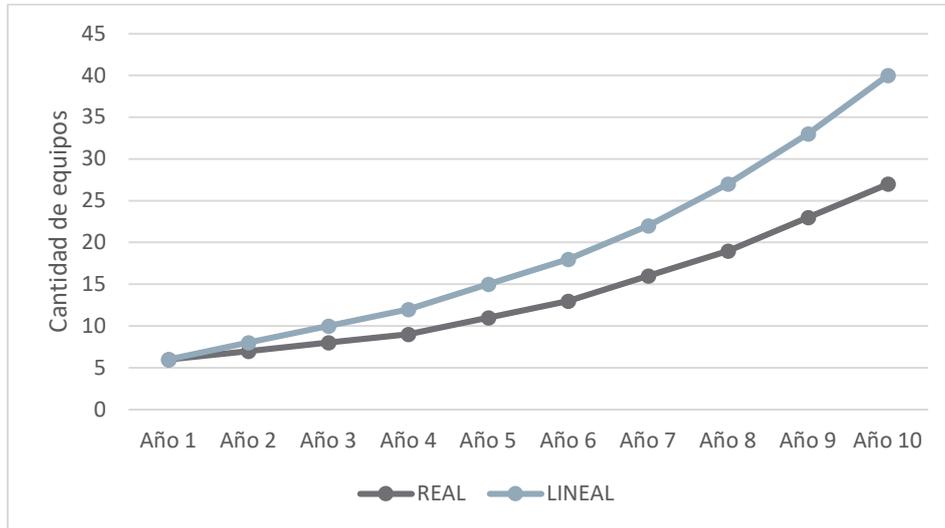


Gráfico 26. Comparación de cantidad de Carretillas frente a crecimiento anual de la demanda del 20% , curva Lineal vs Real.

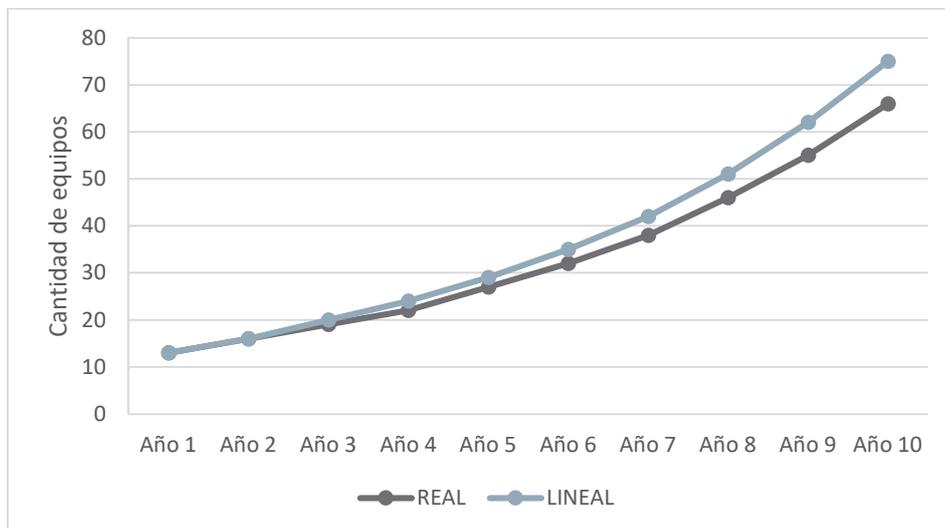


Gráfico 27. Comparación de cantidad de Order Picker frente a crecimiento anual de la demanda del 20% , curva Lineal vs Real.

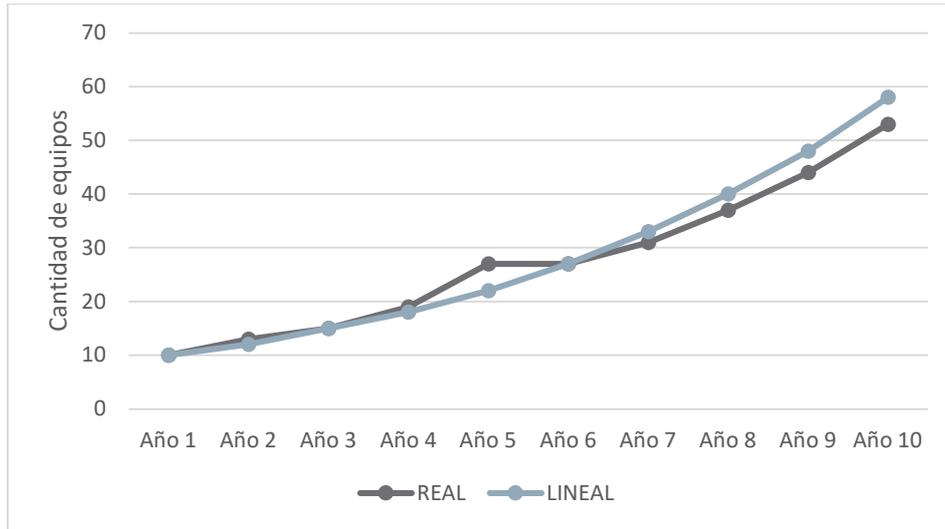


Gráfico 28. Comparación de cantidad de Transpaletas frente a crecimiento anual de la demanda del 20%, curva Lineal vs Real.

7.7.4 COMPARACIÓN ENTRE DEMANDA MÁXIMA Y PROMEDIO

7.7.4.1 MOTIVACIÓN

Para poder determinar la cantidad de AGVs que cumplieran con todas las operaciones del CDO nos fijamos en la semana de mayor demanda como se explicó anteriormente en el tratamiento de los datos. Por otro lado, para la parte del análisis económico consideramos la cantidad de equipos que se necesitan para cumplir con el promedio de la demanda de todas las semanas y así obtener costos más realistas y ajustados.

Con este análisis se busca comparar estas dos alternativas y ver si la diferencia es significativa. Nos interesa conocer si la semana de mayor demanda está muy por arriba de la semana promedio en cuanto a la cantidad de equipos que se precisan para cumplir con la operativa.

7.7.4.2 PROCEDIMIENTO

Los AGVs obtenidos en el Caso Base son los que se precisan para cumplir con la semana de demanda máxima. Al mismo tiempo, cuando desarrollamos el análisis económico y financiero obtuvimos la demanda promedio para cada una de las operaciones.

Una vez obtenidos los nuevos datos corrimos nuevamente el modelo para determinar la cantidad mínima de vehículos necesaria y la distribución de sus tiempos de operación, carga e inactivo.

7.7.4.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan las diferencias obtenidas entre la cantidad de equipos para cumplir con la semana de demanda máxima y la demanda de semana promedio como se explicó anteriormente. En primer lugar, es importante comparar la cantidad de vehículos que son necesarios como se presenta en la *Tabla 48*.

Tabla 48. Comparación de vehículos entre demanda máxima y promedio.

Tipo de AGV	Demanda Máxima	Demanda Promedio
Carretillas	6	5
Transpaletas	10	9
Order Pickers	13	10

Al analizar los datos observamos que la cantidad de AGVs no varía de forma similar para los distintos tipos de vehículos. Tanto para las Carretillas como para las Transpaletas la diferencia es de una unidad. Esto es esperable ya que las operaciones que se llevan a cabo con estos dos equipos son de ingreso y egreso de mercadería y en la semana de mayor demanda aumenta principalmente el flujo que egresa y no tanto el flujo que ingresa.

En cambio, para las Order Pickers hay una gran diferencia, hay un salto de 10 a 13 AGVs entre la semana promedio y la máxima. Este cambio se debe a que en una semana de demanda máxima las operaciones que se ven más comprometidas son las que tienen que preparar la salida de camiones cargados hacia los locales por la época zafra. Los Order Pickers se ven más comprometidos al realizar sus operaciones durante este período en comparación con una semana promedio.

Si observamos como se distribuyen los tiempos para cada tipo de demanda nos encontramos con que el tiempo inactivo total de los equipos es menor para la demanda promedio como se puede ver en el *Gráfico 29*

Esto es esperable y coherente debido a que la demanda promedio incluye las olas de operaciones de los seis meses de estudio, esto permite homogenizar la cantidad de trabajo eliminando los picos de trabajo que se pueden dar en la semana de demanda máxima de trabajo. Como consecuencia de reducir esos picos, se reducen los tiempos inactivos. Esto ocurre principalmente para los Order Pickers por lo que vemos que se vincula directamente con el aumento tan grande de la cantidad de equipos que se mostró anteriormente. En cambio, el tiempo inactivo de las *transpaletas* se mantiene prácticamente igual.

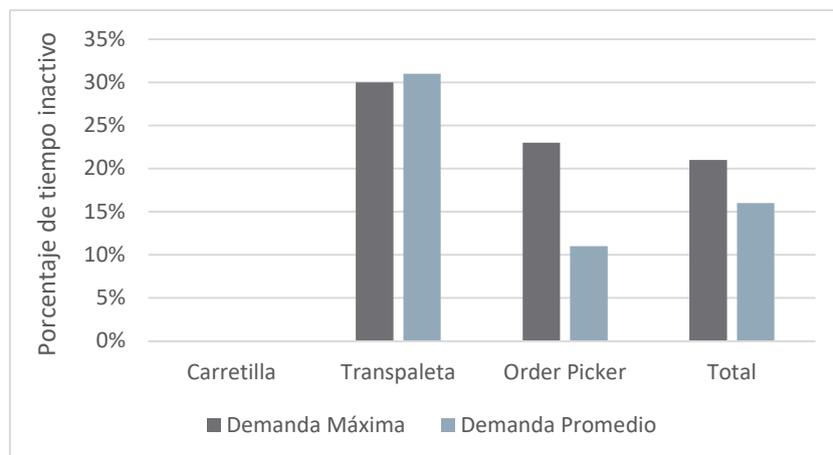


Gráfico 29 Comparación de tiempo inactivo para cada demanda.

Al estudiar cómo se distribuyen los tiempos de operación, carga e inactivo para cada equipo notamos que para las *carretillas* no hay cambios porque debido a las características del modelo se agota toda su capacidad de trabajo. Para las *transpaletas*, los tiempos se distribuyen de forma similar, pero con un pico de trabajo el viernes por la tarde lo que termina restringiendo el número de equipos y por lo tanto generando más tiempo inactivo los demás días como se observa en el *Gráfico 31*.

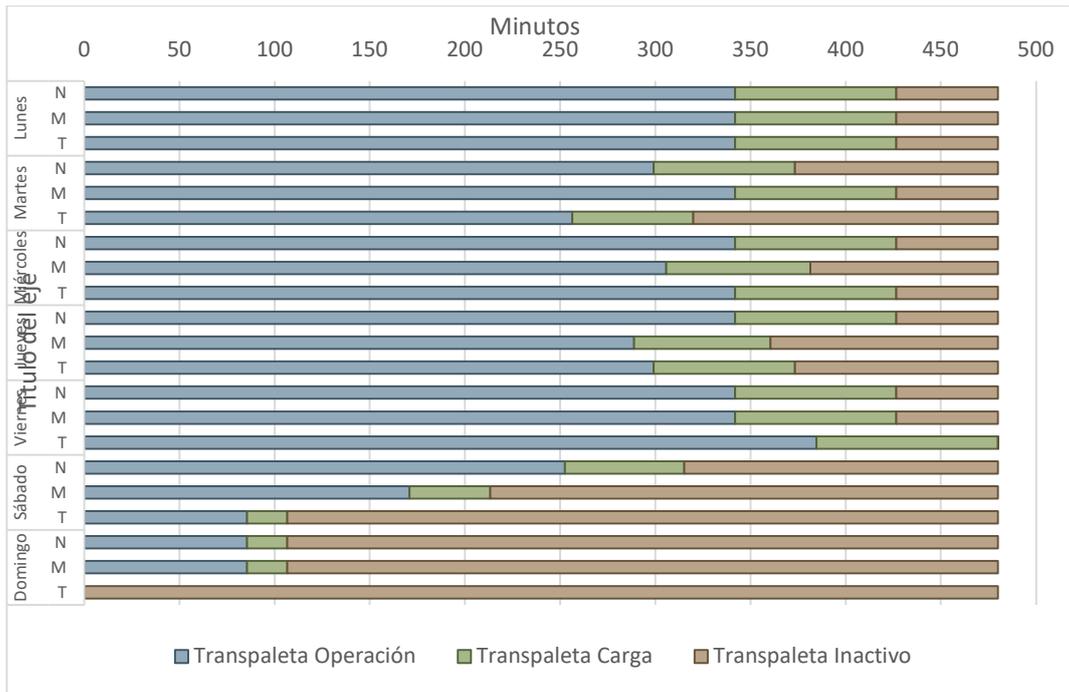


Gráfico 30. Distribución de tiempo para el order picker en el caso de demanda promedio.

La distribución del tiempo para los *order pickers* se encuentra más homogénea a lo largo de la semana para la demanda promedio como se adelantó previamente.

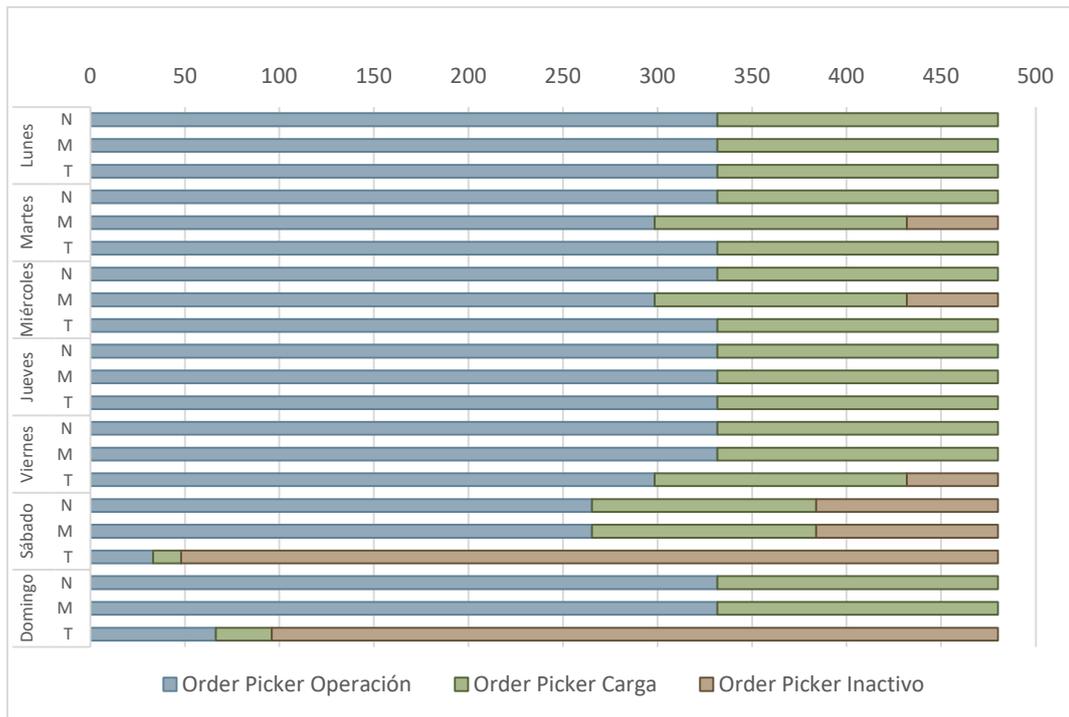


Gráfico 31. Distribución de tiempo para el order picker en el caso de demanda promedio.

7.7.5 INSTALAR AGV CON RECAMBIO DE BATERÍAS

7.7.5.1 MOTIVACIÓN

Existen AGVs con la posibilidad de intercambiar la batería de forma autónoma para seguir trabajando de forma continua. Mientras los vehículos se encuentran operando se carga la batería de repuesto en el punto de carga para luego ser utilizada. Esta tecnología está siendo

cada vez más desarrollada y los costos de instalar un sistema automático que cumpla con esta operativa, cada vez son más bajos. [20]

Es de interés analizar el comportamiento de un nuevo modelo eliminando el tiempo de carga de las restricciones operativas. Además, hacer una evaluación económica entre los costos de instalar esta nueva tecnología y la esperable disminución de cantidad de AGVs requeridos.

7.7.5.2 PROCEDIMIENTO

Cambiamos la tecnología de los equipos elegidos en el caso base. Se define un nuevo *Modelo 3* donde eliminamos la variable tiempo de carga y volvemos a calcular la cantidad de AGV requeridos para cumplir con nuestra demanda. Obtenida la nueva cantidad de AGV requeridos, vamos a comparar contra la cantidad requerida en el caso base.

En la práctica lo que se instala en la zona de carga es un equipo automático capaz de realizar el intercambio de baterías cuando esto sea requerido por el AGV. Tendremos un costo inicial de inversión en el sistema de carga y recambio automático, y la necesidad de aumentar la cantidad de baterías totales.

7.7.5.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La cantidad requerida de equipos para cumplir con la demanda baja según lo que vemos en el *Gráfico 33* que muestra el perfil de AGV. Se necesitan 4 *carretillas*, 8 *transpaletas* y 9 *order pickers*.

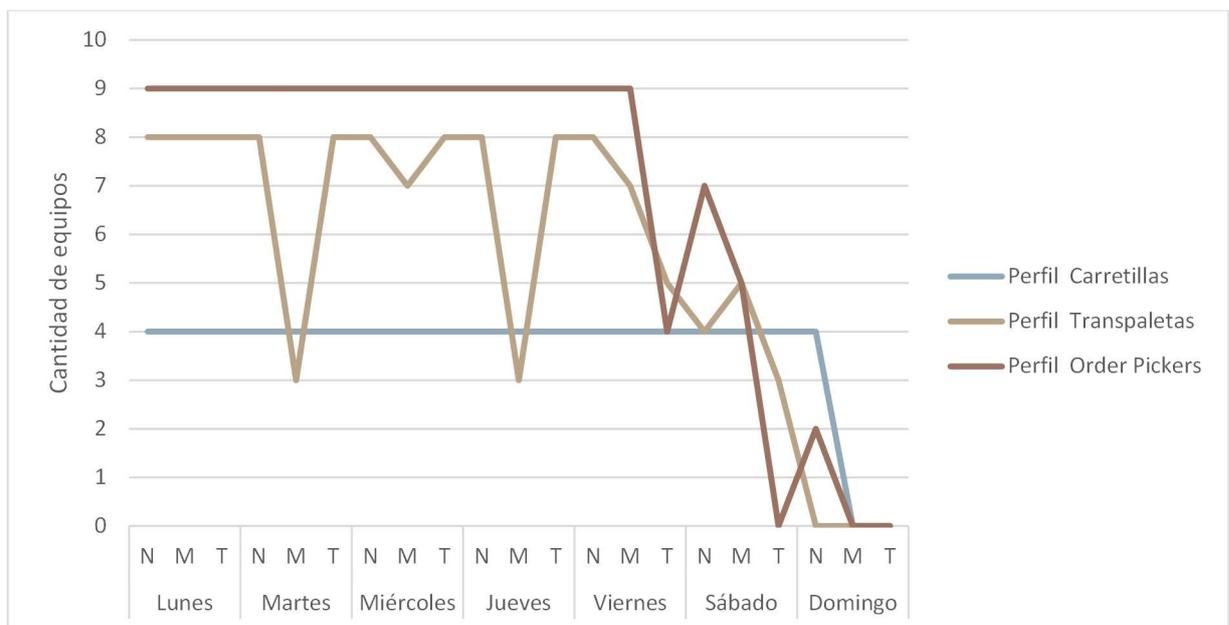


Gráfico 32. Perfil de cantidad de equipos con recambio de batería, Modelo 3.

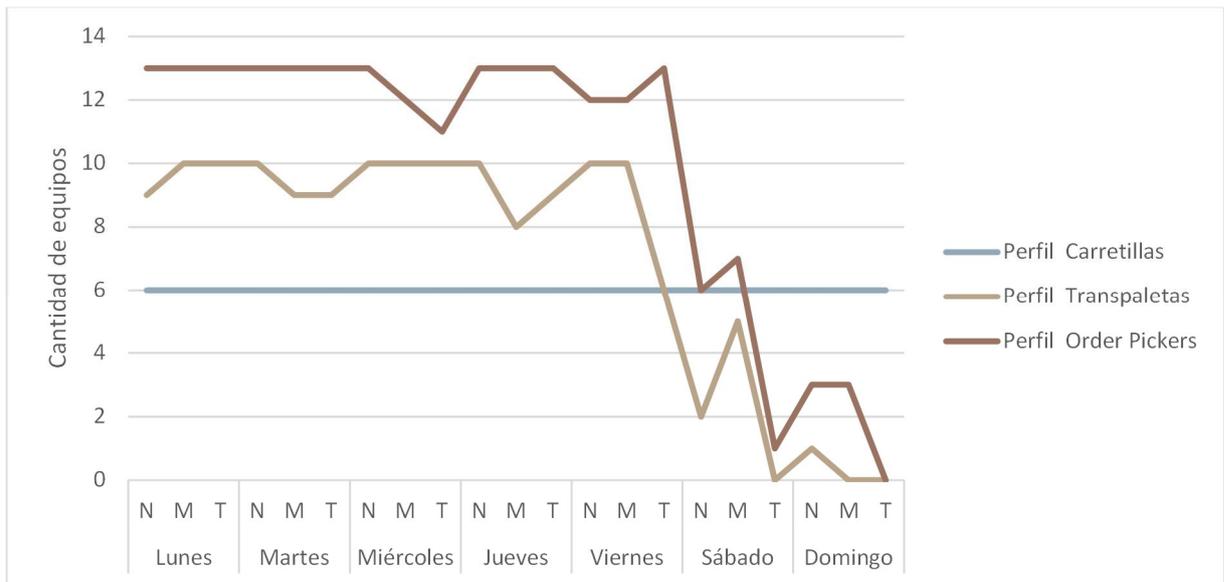


Gráfico 33. Perfil de cantidad equipos caso base.

7.7.5.4 INVERSIÓN EN AGV

Referente a los cambios en la inversión, ajustamos la nueva cantidad de AGV requeridos y los costos asociados. Además, incluiremos el costo de suministro e instalación del sistema de estación de carga y recambio automático de baterías, y baterías adicionales. En la *Tabla 49* vemos la inversión inicial necesaria. [20]

Tabla 49. Inversión total para la instalación de AGV con recambio de batería

Concepto	Precio USD	Cantidad	Precio Total USD
Consultoría			
<i>Estudio de prefactibilidad</i>		1	15.000
Infraestructura y obra civil			
<i>Área de Mantenimiento</i>		1	1.500
<i>Área de Supervisión</i>		1	1.500
<i>Área de Carga</i>		1	12.500
Maquinaria			
<i>Carretilla de gran altura</i>	100.000	4	400.000
<i>Transpaleta autoguiada</i>	65.000	8	520.000
<i>Order picker</i>	80.000	9	720.000
<i>Kit de repuestos críticos</i>	1.500	21	31.500
<i>Transporte marítimo de equipos</i>		1	33.000
<i>Inspección en fábrica</i>		1	3.000
Instalaciones mecánicas y suministros			
<i>Suministro de sistema de guiado</i>		1	35.000
<i>Instalación de sistema de guiado</i>		1	15.000
<i>Puesta en marcha del sistema</i>		1	5.000
<i>Elementos de seguridad</i>		1	3.000
<i>Baterías</i>		21	8.400
<i>Sistema de recambio de baterías</i>		1	120.000
Instalación eléctrica			
<i>Instalaciones en zona de carga</i>		1	1.500
Software			
<i>Sistema de control de guiado</i>		1	45.000
<i>Integración de software</i>		1	3.000
<i>Instalación del sistema</i>		1	5.000
Capacitación			
<i>Capacitación de software</i>		1	2.000
<i>Capacitación de manejo equipos</i>		1	1.500
<i>Capacitación de mantenimiento</i>		1	2.500
Imprevistos			
<i>Imprevistos 5% total inversión</i>		1	98.495
Total			2.655.225

7.7.5.5 COSTO OPERATIVO DE LOS AGV

En relación con los costos operativos, vamos a tener menos operarios ya que disminuye la cantidad de order pickers, el resto de las consideraciones permanece igual a la evaluación realizada en el caso base.

Tabla 50. Costos operativos anuales para el sistema de AGV con recambio de batería.

Concepto Anual	Cantidad	Monto Año en USD	Precio total Año en USD
Mano de obra			
<i>Salario Operario depósito</i>	36	10.909	392.727
<i>Salario Supervisor de sistema</i>	4	32.727	130.909
<i>Salario Mecánico especializado</i>	4	24.545	98.182
<i>Costo anual empresa</i>	1		185.855
Software informático			
<i>Mantenimiento mensual</i>	12	300	3.600
Electricidad			
<i>Cargo variable UTE</i>	1	2500	54.480,03
Mantenimiento			
<i>Preventivo</i>	1	3.000	3.000
<i>Programado</i>	0,50	4.500	2.250
<i>Correctivo</i>	0,25	8.000	2.000
<i>Contrato de servicio permanente</i>	1	4.000	4.000
<i>Kit de repuestos anuales</i>	1	3.000	3.000
Total			876.529

7.7.5.6 CÁLCULOS DE VAN Y RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

El resultado obtenido es superior a lo concluido en el caso base determinando una solución aún más favorable para el proyecto.

El sistema de recambio de batería permite una menor inversión en cantidad de AGV requeridos, disminuye los costos de operación al necesitar menor cantidad de personal para operar los order pickers y en comparación con la inversión requerida para instalar el sistema de recambio de baterías, la evaluación económica es favorable. En la *Tabla 51 vemos* el nuevo flujo de fondos.

Tabla 51. Flujo de fondos para el sistema con recambio de batería.

Años	Flujos de fondos Sistema de AGV	Flujos de fondos Sistema actual
0	-USD 12.930.312	USD -
1	-USD 12.930.312	-USD 2.575.552
2	-USD 12.930.312	-USD 2.803.103
3	-USD 12.930.312	-USD 2.936.059
4	-USD 12.930.312	-USD 3.075.652
5	-USD 12.930.312	-USD 3.222.220
6	-USD 12.930.312	-USD 3.376.119
7	-USD 12.930.312	-USD 3.565.907
8	-USD 12.930.312	-USD 3.735.615
9	-USD 12.930.312	-USD 3.913.841
10	-USD 12.930.312	-USD 4.101.025
VAN	-USD 10.385.064	-USD 21.656.303

Observamos en este además que el período de recuperación de la inversión en relación con el Caso Base también disminuye.

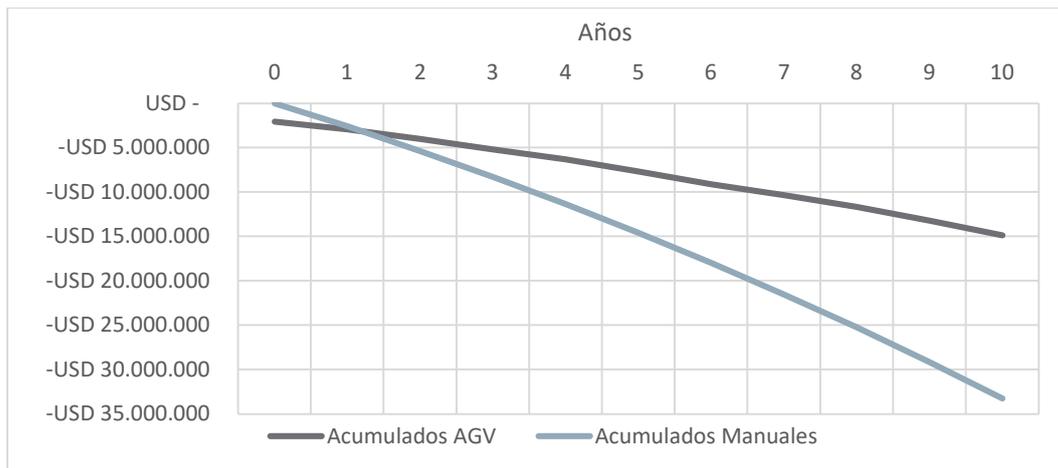


Gráfico 34. Recuperación de la inversión para el sistema de recambio de baterías.

7.7.6 APROVECHAMIENTO DEL TIEMPO INACTIVO

7.7.6.1 MOTIVACIÓN

Una de las principales ventajas que tienen los AGVs es poder trabajar de forma continua siempre que tenga carga suficiente. Es por esto que buscamos aprovechar los tiempos inactivos en los que el vehículo podría estar operando sin importar la hora. Con este análisis planteamos la forma de aprovechar ese tiempo inactivo para realizar tareas que luego faciliten el trabajo. Se busca a partir de este análisis, obtener la cantidad de olas de operación que podrían realizarse si el AGV nunca dejara de trabajar y así utilizar el 100% del tiempo disponible de cada equipo.

7.7.6.2 PROCEDIMIENTO

Para este análisis partiremos del resultado del tiempo inactivo obtenido del caso base. Distribuiremos este tiempo inactivo entre las 12 operaciones ya nombradas a lo largo del trabajo que realiza el depósito. El tiempo inactivo se agrupa por equipo y será redistribuido según el porcentaje de tiempo que actualmente esos equipos adjudican a cada operación.

Por ejemplo, si la operación 1 en la semana ocupa el 12% del tiempo total de las *transpaletas*, entonces, del tiempo inactivo total de la *transpaleta*, se adjudicará un 12% como tiempo disponible para realizar la operación 1. Así se distribuirá el tiempo inactivo total de cada equipo para su grupo de operaciones correspondiente.

Se obtendrá finalmente la cantidad de olas de cada operación que se podría realizar en ese tiempo inactivo disponible, logrando un aprovechamiento al 100%.

Es importante partir de que, por la forma en la que está definido nuestro modelo base, este análisis se realizará únicamente para las *transpaletas* y los *order pickers*, ya que el tiempo inactivo de las *carretillas* ya está siendo aprovechado por las operaciones que se realizan con *transpaletas*.

A su vez, es importante recordar que el tiempo inactivo no es el tiempo total disponible, sino que se tendrá en consideración el tiempo de carga correspondiente a ese nuevo tiempo de operación.

7.7.6.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Basándonos en el tiempo inactivo de cada equipo que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 52. Tiempo inactivo para cada equipo en cada turno.

Día	Turno	Tiempo inactivo Transpaleta (minutos)	Tiempo inactivo Order Picker (minutos)
Lunes	Noche	480	0
	Mañana	0	0
	Tarde	0	0
Martes	Noche	0	457
	Mañana	480	0
	Tarde	480	0
Miércoles	Noche	0	0
	Mañana	0	480
	Tarde	0	960
Jueves	Noche	0	0
	Mañana	960	0
	Tarde	480	0
Viernes	Noche	0	480
	Mañana	0	480
	Tarde	1920	0
Sábado	Noche	3840	3360
	Mañana	2400	2880
	Tarde	4800	5760
Domingo	Noche	4351	4800
	Mañana	4800	4800
	Tarde	4800	6240

Y el porcentaje de tiempo semanal de cada equipo adjudicado a cada operación, que se representa en la *Tabla 53*.

Tabla 53. Porcentaje del tiempo total semanal de cada equipo que se dispone para cada tipo de operación.

Equipo	Operación	Número de operación	% del tiempo total disponible
Order Picker	Reparto	5	42%
	Reparto base	6	13%
	Picking	7	45%
Transpaleta	Reubic. para Reparto	8	3%
	Reubic. para expedición	9	23%
	Reubic. Pre Recep. Expe.	10	34%
	Apertura de expedición	11	27%
	Cierre de expedición	12	12%

Tabla 54. Aumento de productividad con aprovechamiento de tiempo inactivo.

Equipo	Número de operación	Cantidad total de olas nuevas por operación	Porcentaje de aumento de capacidad
Order Picker	5	1787	95%
	6	629	
	7	3952	
Transpaleta	8	335	27%
	9	2458	
	10	216	
	11	176	
	12	172	

Tabla 55. Comparativa de cantidad de olas totales realizadas por todos los equipos.

Modelo	Cantidad de olas semanales
Sin aprovechamiento del tiempo inactivo	25304
Aprovechando tiempo inactivo	35551
Aumento	40%

A partir de la obtención de los resultados pudimos alcanzar la cantidad de olas que podrían aumentar de cada operación realizada por order pickers y transpaletas (operaciones desde la 5 y la 12), y también el porcentaje de aumento de la productividad.

Para las operaciones realizadas por el order picker se observa una capacidad extra disponible de hasta un 95%, mientras que para las operaciones de la transpaleta hasta un 27%. El drástico aumento para las operaciones 5, 6 y 7 se debe principalmente al factor de la baja actividad en los fines de semana. Al aprovechar todo este tiempo inactivo, aumenta en gran medida la cantidad de operaciones realizables.

Se puede observar en el *Gráfico 36* el aumento en cantidad de olas totales para las operaciones de picker y transpaletas cuando hay un aprovechamiento del tiempo inactivo frente al modelo base.

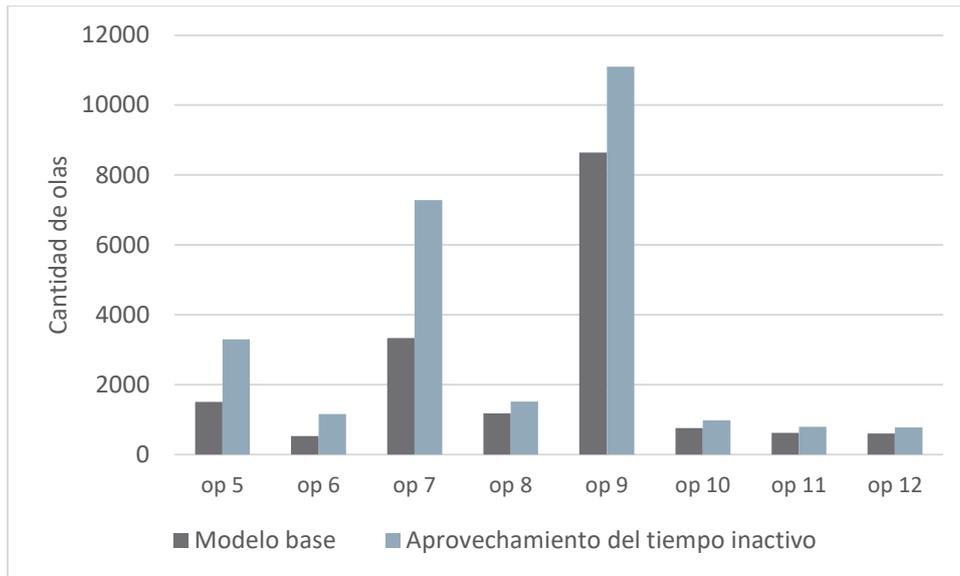


Gráfico 35. Comparación de cantidad de olas realizables aprovechando tiempo inactivo frente a las realizadas en el Caso Base.

Obtenemos un 40% de aumento total en la cantidad de olas realizadas si se aprovecha el tiempo inactivo.

7.7.7 CICLOS COMBINADOS

7.7.7.1 MOTIVACIÓN

Dado que nuestro modelo base imita la operación actual y a modo de simplificar, no fue considerado el aprovechamiento de los viajes de retorno vacíos. Por eso entendemos que un importante análisis a realizarse e incluso trabajo a futuro es la posibilidad de implementar en nuestro sistema de AGVs los ciclos de operación combinados.

El ciclo combinado es el movimiento que hace un equipo cuando, partiendo desde la ubicación de salida realiza una operación de ida hasta la ubicación correspondiente y luego de finalizada ésta, desde esa misma ubicación se dirige a realizar la siguiente operación. Como es evidente, esta combinación de operaciones permite acortar las distancias recorridas haciendo la gestión mucho más eficiente, ya que en un solo movimiento y durante el viaje se realizan dos acciones, generando una multiplicación en el rendimiento del depósito.

La motivación de este análisis de aprovechamiento de viajes vacíos es poder estimar a grandes rasgos, y a un nivel más bien teórico, cuanto se podría llegar a optimizar el tiempo de operación si los equipos auto guiados trabajaran con ciclos combinados. Vale destacar que las tecnologías y los sistemas de control y gestión de AGV que existen hoy en el mercado permiten operar con esta lógica.

7.7.7.2 PROCEDIMIENTO

Comenzaremos planteando las operaciones que podrían llegar a ser combinables entre sí para aprovechar viajes de retorno. El motivo de esta selección es porque no todas las operaciones realizadas en el CDO tendrían sentido ser combinadas, como lo es por ejemplo la operación de *Picking, Recepción y Expedición*.

A su vez, se deberá considerar el tipo de equipo, ya que no todas las operaciones son realizables con cualquier equipo, lo que lleva a no poder combinar las operaciones de cualquier forma, sino únicamente con operaciones que se realicen con el mismo tipo de equipo. En el caso de las operaciones que se realizan con transpaleta, al igual que lo planteado en nuestro modelo

base, podrían ser realizables con carretillas, por lo que estas operaciones sí podrían ser combinables entre sí. Estos grupos se muestran en la *Tabla 56*.

Tabla 56. Operaciones combinables.

Operaciones combinables	Equipo AGV
Extracción	Carretilla
Almacenaje	
Repos. Cajas	
Reposición	
Reubic. para Reparto	
Reubic. para Expe.	
Reubic. Pre Recep. Expe.	
Reparto	Order Picker
Reparto base	
Reubic. para Reparto	Transpaleta
Reubic. para Expe.	
Reubic. Pre Recep. Expe.	

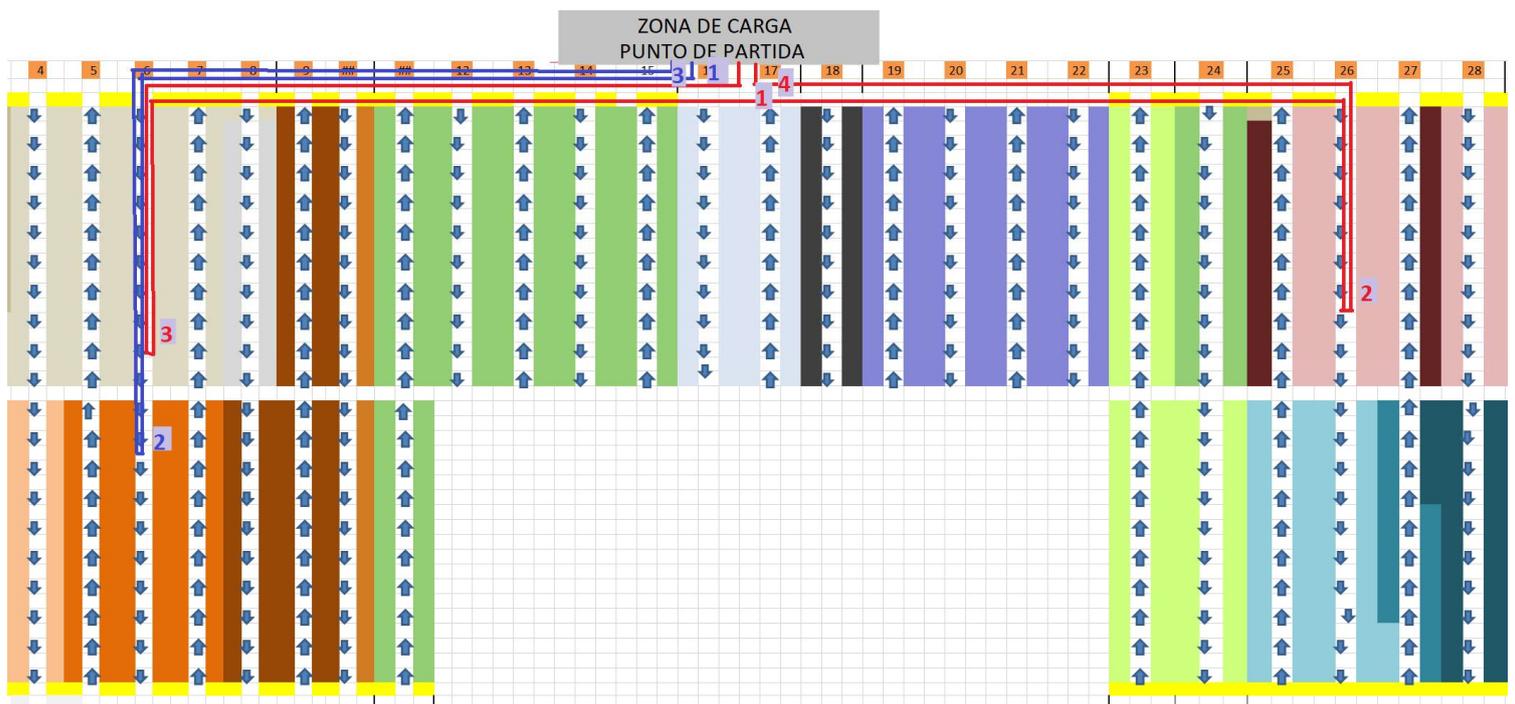
A modo de ejemplo tomamos dos operaciones que sean combinables, lo que quiere decir que la segunda operación comienza en la ubicación donde finaliza la primera. De la base de datos tomamos la información de recorrido y tiempos de cada ola. Esta información se presenta en las tablas a continuación.

Tabla 57. Recorrido de dos olas de operaciones ejemplo para ciclos combinados.

Operación	Pasillo origen	Pasillo destino	Rack origen	Rack destino
Repos. Cajas	26	6	47	42
Reposición	6	6	33	4

Tabla 58. Distancias y tiempos de dos olas de operación sin combinar.

Orden de ejecución	Operación	Distancia recorrida (metros)	Tiempo de cada operación con AGV (minutos)	Distancia total recorrida (metros)	Tiempo total del recorrido (minutos)
1	Repos. Cajas	257,6	4,90	467,4	9,40
2	Reposición	209,8	4,50		



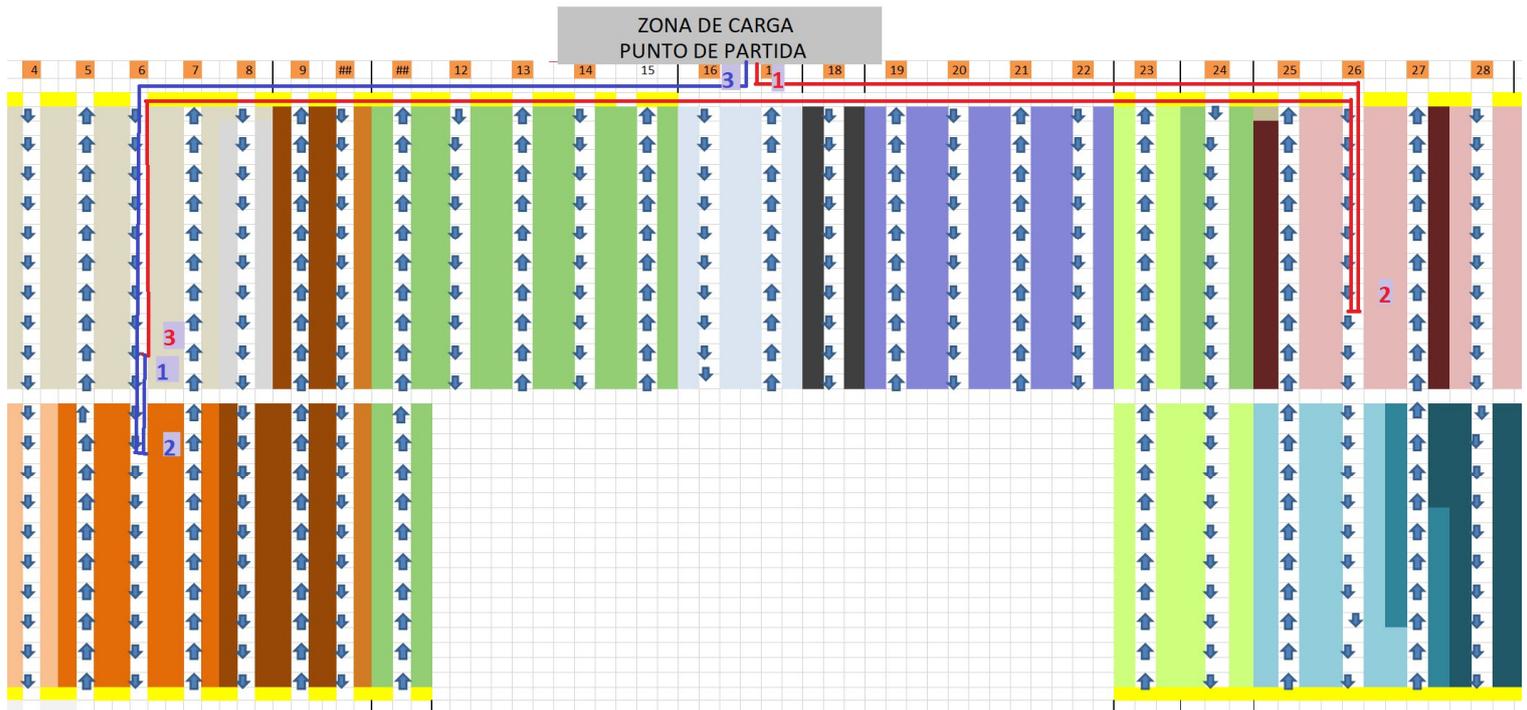
Plano 6. Diagrama de hilos para ola de Repo. Cajas y ola de Reposición por separado sin combinar.

- Recorrido operación 1: Reposición de cajas (sin combinar)
- Recorrido operación 2: Reposición (sin combinar)

Tabla 59. Combinación de dos olas de operación.

Recorrido ejemplo de Ciclos combinados de 2 olas de operación					
Orden de ejecución	Operación	Distancia recorrida (metros)	Tiempo de cada operación con AGV (minutos)	Distancia total recorrida (metros)	Tiempo total del recorrido (minutos)
1	Repos. Cajas	221,6	4,60		
(2)	Ir de posición final 1 a posición inicial 2	13,4	0,07	353,3	7,74
3	Reposición	118,3	3,07		

Para estos dos tipos de recorridos, fueron realizados sus correspondientes diagramas de hilos, de forma de poder visualizar el aprovechamiento de los recorridos. Primero las operaciones independientes y segundo el recorrido de estas dos mismas operaciones combinadas.



Plano 7. Diagrama de hilos para las olas de Repo. Cajas y Reposición combinadas.

- Recorrido operación 1: Reposición de cajas (combinado)
- Recorrido operación 2: Reposición (combinado)

7.7.7.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Habiendo realizado los cálculos para este ejemplo particular se obtuvieron los siguientes valores que se presentan a continuación.

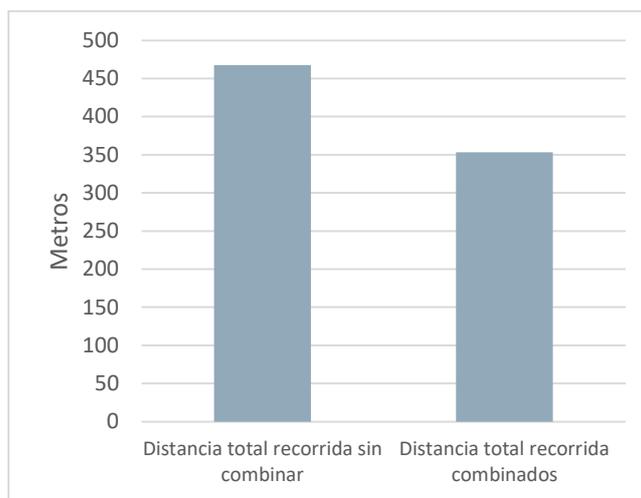


Gráfico 36. Comparación de distancias de recorridos combinados vs sin combinar.

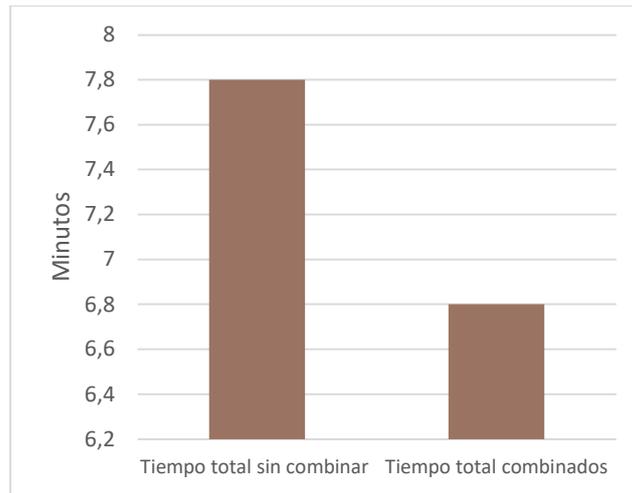


Gráfico 37. Comparación de tiempos de recorridos combinados vs sin combinar.

Tabla 60. Comparación de distancias de recorridos combinados vs sin combinar.

Distancia total recorrida sin combinar	Distancia total recorrida combinados	Porcentaje de reducción
467.4	353.3	24%

Tabla 61. Comparación de tiempos de recorridos combinados vs sin combinar.

Tiempo total sin combinar	Tiempo total combinados	Porcentaje de reducción
9.40	7.74	18%

Para este par de olas de operación se obtuvo una reducción del 18% del tiempo de trabajo y un 24% las distancias recorridas. Es esperable el porcentaje de reducción en distancia sea mayor que el de tiempo de trabajo, ya que los tiempos de arranque y parada son parte del tiempo total

Si bien este es un ejemplo de combinación de dos olas de operación en particular, se realiza a modo de entender el impacto que los ciclos combinados pueden tener en la productividad. Si para un par de operaciones se obtuvo un porcentaje de aumento en la eficiencia considerable, al extenderlo a todas las operaciones combinables se alcanzaría una importante reducción en las distancias recorridas y así a un efecto positivo en la productividad. Esto podría llevar a una reducción en la cantidad de equipos requeridos para abastecer la operación, lo que llevaría a un menor costo de inversión.

7.7.8 LÍMITES TEÓRICOS DEL SISTEMA

7.7.8.1 MOTIVACIÓN

Es razonable pensar que cuantos más AGVs haya en el CDO más eficiente puede ser la operativa, es decir, las distintas olas van a estar prontas antes si se cuenta con mayor cantidad de vehículos para operar. Este planteo es válido para el caso en que aumente la demanda de trabajo y haga falta contar con más equipos, no obstante, vamos a encontrar un límite que se puede dar por el espacio existente para almacenar productos en el CDO o por el tráfico debido a una elevada cantidad de AGVs.

La capacidad del lugar es fácil de conocer si sabemos sus dimensiones y el flujo de entrada y salida de camiones con mercadería. En cambio, la cantidad de AGVs puede aumentar para mejorar la velocidad de cumplimiento de las olas de trabajo, pero conocer la máxima cantidad de vehículos que pueden operar es más difícil de determinar. Por lo mencionado anteriormente nos detendremos en un análisis teórico.

7.7.8.2 PROCEDIMIENTO

La limitación física del centro de distribución está dada por sus dimensiones, por lo tanto, está limitada por la cantidad de lugares disponibles para almacenar pallets. Como se describió en la situación actual de la empresa, el CDO cuenta con 25 mil metros cuadrados para la parte de secos que es en la que estamos trabajando, que permite albergar 32 pasillos divididos en 35 módulos cada uno. Cada módulo cuenta con 5 niveles de estanterías, el primero destinado para el *picking* y del 2 al 5 donde se almacenan los pallets, lo que nos permite albergar aproximadamente 11 mil pallets.

Al mismo tiempo, se cuenta con 41 muelles de recepción de camiones, lo que permitiría, como máximo, estar cargando 21 camiones y descargando otros 20 camiones al mismo tiempo. Si se trata de camiones completos pueden llegar a albergar 28 pallets cada uno, esto permitiría un flujo de 588 y 560 pallets en direcciones opuestas demorando 61 y 70 minutos respectivamente según el tiempo que definimos para estas operaciones con AGVs.

Es importante remarcar que para este planteo se debería contar con al menos 41 *transpaletas* para cargar y descargar, y con una flota mayor de *carretillas* para poder ubicar en su destino los pallets que llegan, otra gran cantidad de *order pickers* para poder dejar disponibles los pallets que se deban cargar. Aumentarían en igual medida todas las operaciones.

7.7.8.3 ANÁLISIS

Por lo descrito anteriormente, en un plano teórico se podría llegar a mover 1148 pallets en el plazo de 70 minutos, esa cantidad de pallets representa poco más del 10% de la capacidad del CDO. Al ser un flujo repartido entre el ingreso y el egreso de mercadería la capacidad total se renovarían constantemente pero no sufriría un desabastecimiento u otro riesgo similar.

A continuación, nos detendremos a analizar las limitaciones del tráfico interno de vehículos que puede ser una limitante más grande que la capacidad del CDO. En esta situación se ocasionaría un gran tráfico de AGVs lo que haría que la eficiencia del sistema decayera de gran forma y no se estaría produciendo la optimización ideal. Algo similar a lo que ocurre con el tráfico de automóviles en las grandes ciudades en las horas pico. Además, habría que tener en cuenta la superficie destinada a la carga de todos estos vehículos.

Es difícil de calcular cuál es el número máximo de AGVs que pueden operar en simultáneo, pero hay varios estudios sobre esto. Uno de estos estudios realizado por *Sinreich y Tanchoco* [22] nos puede servir como referencia para mostrar que la máxima utilidad del sistema de AGVs está acotada superiormente por el número de vehículos. Como se observa en el *Gráfico 39*, luego de que se alcanza la cota superior comienza a decaer la utilidad del sistema si se agregan más vehículos.

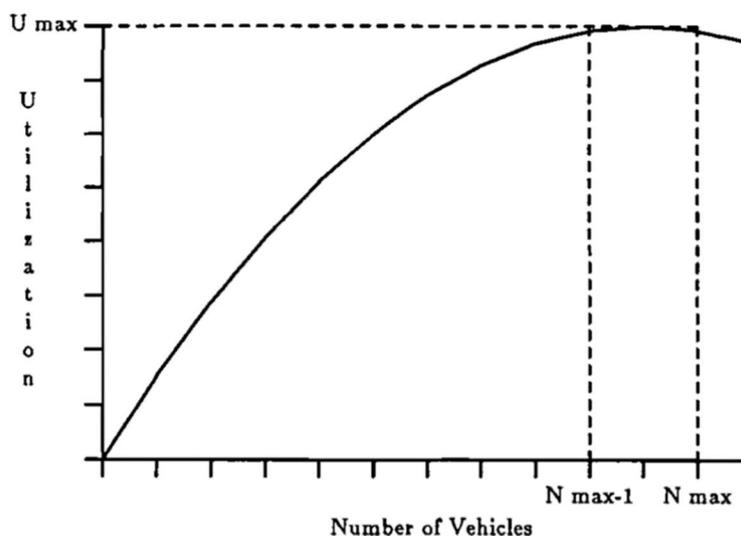


Gráfico 38. Relación entre la utilidad y el número de vehículos. (Fuente: Sinriech & Tanchoco) [22]

Por otro lado, a partir de investigaciones y entrevistas hechas a proveedores y expertos en el dimensionamiento de equipos obtuvimos una ecuación utilizada para una estimación del límite máximo de equipos que pueden circular en un depósito según el flujo de mercadería. El mismo se representa por la siguiente ecuación:

$$\text{Cant. Max AGVs} = (\text{bultos out/hora}) / 11 \text{ (i)}$$

En el Centro de Distribución, el número de *bultos out* promedio ronda en los 14 mil diarios, calculando un aproximado de 583 *bultos out* por hora. Realizando el cálculo a partir de la ecuación (i), obtendríamos un máximo de 53 AGVs para mantener una adecuada circulación de los equipos en el Centro de Distribución.

7.7.9 COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

En cuanto a la comparación final de alternativas consideramos dos de las alternativas técnicas que manejamos, la presentada en nuestro caso base, y alternativa de equipos con sistema de recambio de batería automático. Como vimos en el análisis de sensibilidad y se observa en la *Tabla 62*, la cantidad de equipos para el sistema de recambio es menor al caso base, además la evaluación económica también da un resultado más favorable. Tomaremos la alternativa con recambio de batería propuesta como recomendación de sistema a instalar.

Por otro lado, podemos tomar como valores de referencia final, la comparación económica entre el modelo presentado como optimización de la situación actual y la alternativa de recambio automático de baterías.

Tabla 62. Comparación de alternativas en cantidad de equipos.

Equipos	Sistema de AGV Caso Base	Sistema de AGV Recambio Baterías
Carretillas	6	4
Transpaletas	10	8
Order Pickers	13	9
Totales	29	21

Equipos	Sistema actual	Sistema actual optimizado
Auto Elevadores	10	7
Carretillas	25	21
Order Pickers	18	13
Totales	53	41

Tabla 63. Comparación de alternativas en flujo de fondos.

Años	Sistema de AGV Caso Base	Sistema de AGV Recambio Baterías	Sistema actual	Sistema actual optimizado
VAN	- USD 12.786.932	-USD 10.370.710	-USD 21.631.638	-USD 17.272.486

Finalmente es interesante observar en un mismo gráfico los distintos flujos de fondo acumulados para los cuatro escenarios mencionados, donde quedan definidos los puntos de recuperación de la inversión según se considere.

Para la comparación del sistema actual optimizado y el sistema de AGVs con recambio de baterías, vemos el punto de recuperación en el primer semestre del segundo año de operación, a los tres años de haber ejecutado el proyecto y la inversión inicial.

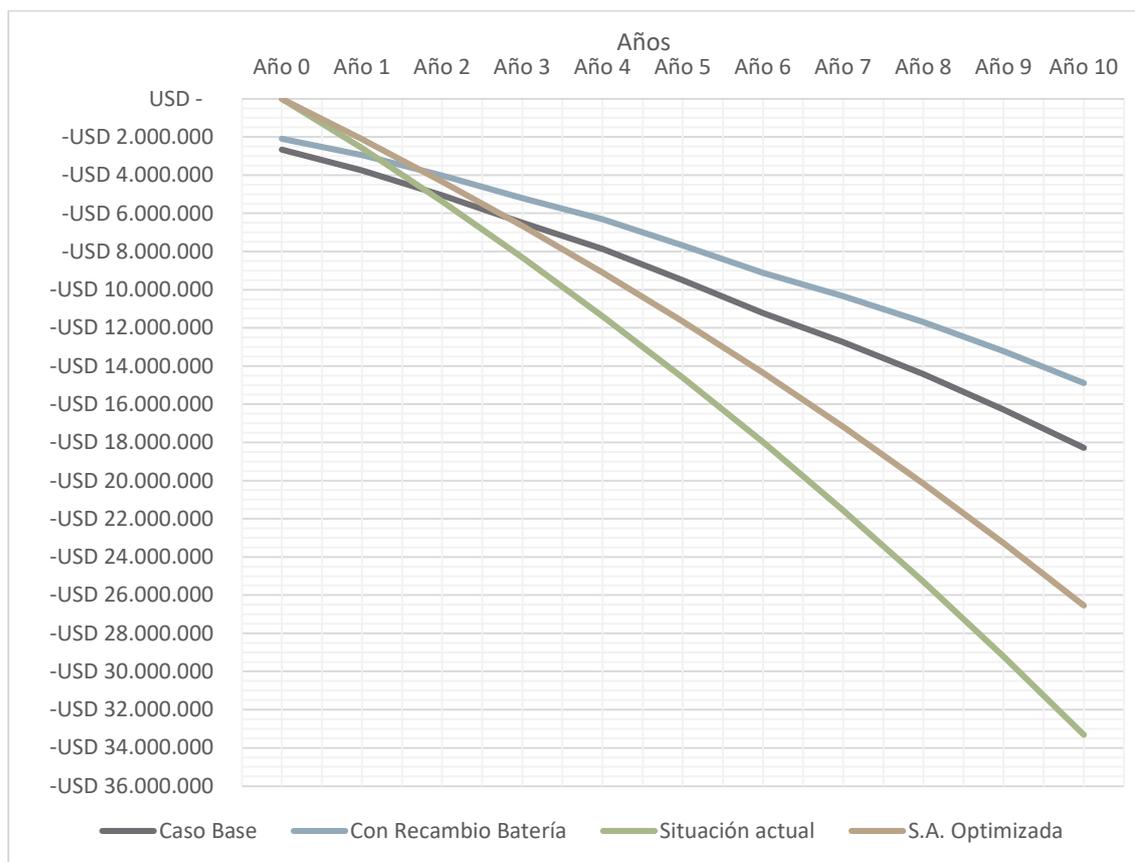


Gráfico 39. Flujos de fondo acumulados para los cuatro escenarios planteados.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 INTRODUCCIÓN

Como objetivo principal del proyecto se planteó realizar un análisis de la viabilidad de la implementación de un Sistema de Vehículos Auto guiados en el Centro de Distribución de TATA. A partir de una minuciosa investigación bibliográfica fuimos capaces de profundizar en el tema a modo de alcanzar un entendimiento global sobre los AGVs. En este proceso conocimos la variedad de estos equipos existentes en el mercado, su tecnología y la metodología de trabajo para así poder ahondar en la forma de realizar la implementación.

A lo largo de esta etapa fue necesario investigar sobre ejemplos de implementación, analizando distintos casos de éxito a nivel mundial y local en diferentes sectores productivos. En Uruguay son escasas las industrias que tienen incorporada la automatización como parte de su operativa y aún menos o prácticamente nula, los casos de funcionamiento con equipos auto guiados, primando la utilización de equipos manuales, razón por la cual encontramos un interés y motivación particular en la continuación de este estudio.

Los vehículos auto guiados se encuentran en un notable proceso de expansión, los costos son cada vez más accesibles y los desarrollos de soluciones cada vez más potentes en cuanto a los sistemas de gestión.

La implementación de un Sistema de AGVs trae consigo múltiples ventajas frente a un sistema manual. Eficacia en el desplazamiento de recorridos definidos, alta confiabilidad en el manejo de la mercadería, flexibilidad en la incorporación de nuevas rutas y nuevos equipos, sistemas fácilmente escalables y de fácil integración con sistemas propios de la compañía. Estas características llevan a una mejora en la calidad de trabajo, reducción en el tráfico de equipos, disminución de accidentes laborales y por tanto en averías. Todo esto impacta en la cadena de suministro, generando un mejor nivel servicio al cliente interno y externo.

En una primera instancia, definimos el alcance de nuestro caso de estudio incluyendo todas aquellas operaciones que actualmente son ejecutados con equipos manuales. Posteriormente, seleccionamos los equipos disponibles en el mercado que mejor se adecúan a nuestra operativa, entendiendo cómo se adaptarían a la realidad del CDO y sus operaciones. Concluimos trabajar con los siguientes tipos de equipos auto guiados: *transpaletas*, para las operaciones a nivel de piso, *carretillas de gran altura* para operaciones en altura, y *order pickers*, para las que necesitan de un operario para manipulación de la mercadería.

Modelar un sistema de AGVs para su implementación en nuestro depósito en estudio requirió previamente entender de forma rigurosa el funcionamiento actual del centro con sus respectivas operaciones con equipos manuales. Una vez hecho esto se desarrolló el modelado propuesto con equipos auto guiados, alcanzando finalmente la cantidad de equipos requerida para el abastecimiento de la operativa actual. A partir de allí pudimos sacar algunas de las siguientes conclusiones.

8.2 CONCLUSIONES

Un total de 29 equipos auto guiados podría sustituir la maquinaria manual actual de 53 equipos. Distribuidos en, 6 *carretillas de gran altura*, 10 *transpaletas autoguiadas* y 13 *order pickers*. Mientras que actualmente los equipos manuales operan un promedio de 45% del tiempo total, los equipos auto guiados lo hacen en un 60%, siendo limitados por su tiempo de carga y respetando los días de poca flexibilidad de operación.

Realizado el estudio económico y financiero de la inversión, concluimos que la propuesta es rentable. Si bien la inversión inicial en AGVs es elevada, el reemplazo de la mano de obra permite

que esta inversión sea recuperada al tercer año y reduce los costos totales de diez años aproximadamente a un 50%.

Habiendo concluido esto, creímos necesario penalizar nuestro modelo propuesto y realizar una comparación menos favorable al mismo para revisar su rentabilidad. Para ello simulamos un modelo que optimizara los recursos con los que se cuentan actualmente, manteniendo los tiempos de operación y la demanda requerida. Este modelo actual optimizado nos exigió un total de 41 equipos para cubrir todos los turnos de mayor demanda, mientras que actualmente se tienen 53 equipos. Esto nos permite concluir de manera clara que el dimensionamiento de los equipos en la actualidad no es el óptimo. Concluido esto, entendimos adecuado realizar la comparación de alternativas frente al modelo actual optimizado.

El análisis anterior nos permitió profundizar en la ineficiencia que puede traer consigo un sistema manual. Un depósito que trabaje con equipos manuales no solo implica que se necesite un operario para su manejo, sino que trae consigo los recursos humanos que tienen otro tipo de requerimientos e implicancias. Con la maniobra manual de los vehículos puede haber una mayor probabilidad de equivocaciones, un mayor tiempo perdido, se puede generar tiempo ocioso durante el tiempo de trabajo y pueden surgir problemas interpersonales que incidan en el rendimiento del trabajo. Éste es también un factor a favor de la implementación de los equipos autónomos.

Ante la comparación de este modelo optimizado frente al sistema de AGVs propuesto, el resultado fue favorable, aún con una mejora en el uso de los recursos actuales, la inversión en el cambio hacia un sistema autónomo sigue siendo rentable.

A modo de ahondar en el desarrollo de la propuesta y evaluar, por otra parte, la robustez de la misma, se decidió realizar diversos análisis de sensibilidad y planteo de posibles alternativas.

Generamos un modelo que, a diferencia de nuestro caso base, no tenga la flexibilidad de compartir equipos para distintos grupos de operaciones, limitando que cada operación solo puede ser ejecutada por un único tipo de equipo. Esta lógica representa una facilidad operativa comúnmente adoptada por las empresas de forma de mantener un orden y mejor seguimiento de los equipos. Los resultados determinaron, como era esperable, un mayor requerimiento de equipos. Nos permite concluir también que nuestro modelo base es más eficiente por permitir a las operaciones compartir equipos.

Presentamos también en nuestro análisis el comportamiento de nuestro modelo ante un aumento de 20% de la demanda anual, en lugar del 7% esperado. Descubrimos que a medida que aumenta la carga operativa, los equipos hacen un uso más eficiente de su tiempo, alejándose del crecimiento lineal y aumentando la productividad por equipo. Este hecho nos admite concluir que a mayores escalas de demanda los equipos se vuelven más productivos.

Una de las propuestas más interesantes y aplicables a nuestro modelo fue la de implementar AGVs con recambio de batería automática, de forma de quitar esta limitación al aprovechamiento máximo de los equipos. Esta alternativa resultó la más rentable, obteniéndose el menor VAN, siendo la alternativa que requiere menos equipos, un total de 21. Consideramos esta alternativa la más beneficiosa para su implementación, no solo por la rentabilidad sino por la accesibilidad de su implementación.

Luego analizamos cuánto sería posible aumentar la producción si se aprovecharan los tiempos inactivos de *las transpaletas* y los *order pickers*, considerando la bondad de trabajar con un sistema de AGVs. Como resultado, llegamos a que esta propuesta permitiría un aumento en la producción de un 33%.

Como un último estudio de alternativa presentamos también la propuesta de combinación de ciclos de operación, a modo de exponer, de forma teórica, el aumento en la eficiencia que proporcionaría la adaptación de un sistema de este tipo. Mediante un ejemplo, se pudo mostrar una reducción de 23% en la distancia recorridas y en un 18% los tiempos de ejecución, lo que nos lleva a concluir que es una alternativa que podría generar un impacto positivo en la productividad.

8.3 RECOMENDACIONES

Luego de la evaluación de alternativas posibles para un sistema de AGVs, pudimos concluir que, si bien la propuesta base es rentable y recomendamos la inversión, consideramos aún mejor alternativa, la instalación de equipos con sistema de recambio automático de batería.

El reemplazo de personas por equipos tecnológicos a nivel industrial no es un proceso sencillo, por lo que es importante que sea bien ejecutado. Creemos que no hay una única forma de proceder en su implementación, por lo que planteamos diversas alternativas que consideramos aplicables para la compañía en estudio.

La primera opción es un proceso paulatino para no afectar la operación que, en una primera etapa, se busque optimizar los recursos actuales, llevándolo a una operación similar a la planteada en el capítulo 7.7.1. Una vez llegado a este punto, como segunda etapa, proceder a sustituir los equipos manuales por auto guiados.

Otra de las alternativas consideradas para no alterar la operativa, es lanzar como plan piloto un sector paralelo, donde se comience “desde cero” a operar de forma 100% automatizada, con una migración gradual de todo el depósito a un sistema de tecnología auto guiada. Por último, si bien no es la alternativa más recomendable, se puede considerar también una incorporación radical de AGVs, requiriendo previamente de una importante planificación y reubicación de personal.

Finalmente, como puntos de profundización a futuro nos genera un particular atractivo, en primera instancia, ahondar en la investigación sobre ciclos combinados ya que encontramos en éste una oportunidad de generar mayor ventaja a nuestro sistema propuesto.

Por otra parte, consideramos sumamente interesante el estudio de la incorporación de brazos robóticos para operaciones de manipulación de mercadería (*picking, reparto base*, etc.) para así alcanzar una automatización total del depósito.

Como último punto, consideramos que podría ser una buena alternativa al sistema propuesto la investigación sobre los sistemas AMR o robots móviles autónomos por sus siglas en inglés. Al igual que los AGVs son robots auto guiados, pero sin la necesidad de tener rutas pre definidas, utilizan la navegación inteligente para crear sus propias rutas en función de la información recibida del entorno en tiempo real.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización mundial del Comercio. (2021) Desplome del comercio ante la pandemia de COVID-19, que está perturbando la economía mundial. https://www.wto.org/spanish/news_s/pres19_s/pr840_s.htm
- [2] Camilla Feledy & Mark Schiller Luttenberger. *A State of the Art Map of the AGVS Technology and a Guideline for How and Where to Use It.* (2017)
- [3] Günter Ullrich. *Automated Guided Vehicle Systems. A Primer with Practical Applications* (2015)
- [4] Jing Long, Chun Liang Zhang. (2012, November) *The Summary of AGV Guidance Technology.*
- [5] Marina Raineri, Simone Perri, Corrado Guarino Lo Bianco. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing.* (2019)
- [6] Dematic. Dematic Multishuttle. (2021) <https://www.dematic.com/es-pe/productos/informacion-general-de-productos/sistemas-de-almacenamiento/dematic-multishuttle/>
- [7] ECA Group. *Innovative Solutions For Your Safety.* <https://www.ecagroup.com/en/solutions/automated-guided-vehicle-agv>
- [8] Puneeth Valmiki, Abhinav Simha Reddy, Gowtham Panchakarla, Kranthi Kumar, Rajesh Purohit, Amit Suhane. *A Study on Simulation Methods for AGV Fleet Size Estimation in a Flexible Manufacturing System* (2018)
- [9] Yan Xing, Yunpeng Yang, Qi Zu, Jinjiang Yu. *Application of AGV technology and design and calculation of driving system.* (2019)
- [10] DTA. *The smart move.* <https://www.dta.es/productos/agv/>
- [11] Camilla Feledy & Mark Schiller Luttenberger. *A State of the Art Map of the AGVS Technology and a Guideline for How and Where to Use It.* (2017)
- [12] Hee-Woon Cheonga, Hwally Leeb. *Concept Design of AGV.* (2018)
- [13] S. Rajotia , K. Shanker & J.L. Batra (1998) *Determination of optimal AGV fleet size for an FMS, International Journal of Production Research.* (Publicado: 2018). Link del artículo: <http://dx.doi.org/10.1080/002075498193273>
- [14] Kelen C. Teixeira Vivaldini, Jorge P. M. Galdames, Marcelo Becker, Glauco A. P. Caurin, *Automatic Routing of Forklift Robots in Warehouse Applications.* (2019)
- [15] Chen Wang, Jian Mao. *Summary of AGV Path Planning* (2020)
- [16] Nenad Smolic-Rocak, Stjepan Bogdan. *Time Windows Based Dynamic Routing in Multi-AGV Systems* (2010)
- [17] Andrea Ferrara, Elisa Gebennini, Andrea Grassi. *Fleet sizing of laser guided vehicles and pallet shuttles in automated warehouses* (2014)
- [18] Goran Vasiljević, Damjan Miklić , Ivica Draganjac, Zdenko Kovačić, Paolo Lista. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. High-accuracy vehicle localization for autonomous warehousing.* (2016)
- [19] AGV network. *Automated Guided Vehicle Return on Investment (ROI) Calculator. AGV Battery Charging Systems Comparison.* <https://www.agvnetwork.com/agv-roi-calculator>
- [20] Kollmorgen. <https://www.kollmorgen.com/>
- [21] Jungheinrich. *Proveedor líder de soluciones intralógicas.* <https://www.jungheinrich.es/>
- [22] D. SINRIECH & J. M. A. TANCHOCO (1992) *An economic model for determining AGV fleet size, International Journal of Production Research.* (Publicado: 2018). Link del artículo: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549208942955>
- [23] Matías González Russo, Fernando Islas De Maio. *Formulación y resolución de problema de planificación de la producción.* (Febrero de 2014)

- [24] Germán Mailing. *Algoritmos heurísticos y el problema de job shop scheduling*. (Enero 2013). Link de artículo:
- [25] Logistics Inside. *Test jungheinrich*. <https://logisticsinside.eu/test-jungheinrich-ece-225-with-easypilot-tapping-instead-pushing/>
- [26] Jing L. (2012). *The summary of AGV Guidance Technology*
- [27] Mecalux. *Soluciones inteligentes de almacenaje*. <https://www.mecalux.es/>
- [28] González Russo y Islas De Maio. *Formulación y resolución de problema de planificación de la producción*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3026/1/tg-islas.pdf>
- [29] Logistics inside. Información técnica Jungheinrich ECE 225 <https://logisticsinside.eu/test-jungheinrich-ece-225-with-easypilot-tapping-instead-pushing/>
- [30] Jungheinrich. *Cargadores estacionarios, Información Técnica*. <https://www.jungheinrich.es/productos/baterias-y-tecnologia-de-carga/tecnologia-de-carga/cargadores-estacionarios-482220>
- [31] Querol Jorba. *Implantación de AGVs en ruta de vacíos de un almacén logístico*. (2018) <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/123225/implantaci-n-agvs-en-ruta-de-contenedores-vac-os-definitivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [32] Madrigal Moreno, David Muñoz Ceballos. *VEHÍCULOS DE GUIADO AUTÓNOMO (AGV) EN APLICACIONES INDUSTRIALES: UNA REVISIÓN*. (2019) <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1478/1208>
- [33] Jungheinrich. *Carretilla de gran altura automatizada*. <https://www.jungheinrich.es/sistemas-log%C3%ADsticos-soluciones-a-medida-para-su-negocio/veh%C3%ADculos-autoguiados/vehiculos-de-guiado-automatico/etx-515a-482692>
- [34] Definición de Slotting. Beetrack. www.beetrack.com

10 GLOSARIO

- *AGV*. Vehículos autoguiados, por sus siglas en inglés “Automated guided vehicle”.
- *CDO*. Centro de Operaciones.
- *SGA*. Sistema de Gestión de Almacenes
- *Sorter*. Un sistema que realiza la clasificación de productos según sus destinos
- *Ola*. Es una línea de trabajo de una determinada operación.
- *Bultos*. Puede referirse tanto a cajas, packs o pallets de mercadería.
- *Bultos in*. Bultos que ingresan al depósito.
- *Bultos out*. Bultos que salen del depósito.
- *Caddie*. Lo que usualmente se le llama al roll container, un contenedor con rejillas metálicas donde se guarda la mercadería que va a los locales.
- *Estadístico*. De uso interno, para llamarle a un producto en particular al que se le asigna un único código. Ejemplo, el estadístico 39280030 corresponde al arroz de 1kg de marca “Blue Patna”.
- *Sku*. (Stock Keeping Unit). Unidad de almacenaje.
- *Monitorista*. El operario responsable de controlar las operaciones desde el monitor.
- *Pickeo*. Acción de tomar la mercadería y escanearla, *pickear*.
- *Slotting*. Conjunto de operaciones logísticas consistentes en asignar a los productos tanto ubicaciones óptimas en el almacén como códigos de identificación que faciliten la rápida localización y recolección que realiza el área de logística de una empresa, con el fin de incrementar la productividad en las tareas del picking.

11 ANEXOS

ANEXO I. MODELO BASE PARA EL CÁLCULO DE CARRETILLAS FASE I

```
/*Conjuntos*/
set I; /*conjunto de operaciones dentro de cada grupo de operaciones
*/
set L; /*conjunto de días de trabajo*/
set K; /*conjunto turnos de trabajo */

/*Variables*/
/*Variables continuas*/
var tcc{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo de carga*/
var tic{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo inactivo*/

/*Variables discretas*/
var mc{l in L, k in K} integer; /*cantidad de carretillas de gran
altura automatizadas por día y turno*/

/*Variables auxiliares de maximo de cantidad de equipos*/
var maxclun;
var maxcmar;
var maxcmie;
var maxcjue;
var maxcvie;
var maxcsab;
var maxcdom;
var maxc;

/*Variables discretas de cantidad de olas*/
var op{i in I, l in L, k in K}; /*cantidad de olas realizadas por
operación, por turno y por día*/
var otoc{l in L, k in K}; /*tiempo de operación de la carretilla*/

/*Parámetros generales*/
/*P1-Atributos AGVs*/
param vc; /*velocidad de la carretillas de gran altura automatizadas*/
param potnc; /*Potencia nominal Carretilla*/
param potcc; /*Potencia cargador Carretilla*/
param avgc; /*Porcentaje de carga de operación Carretilla*/
param fac:= potcc/(potnc*avgc); /*factor de autonomía de Carretilla*/

/*P2-Tiempos*/
param tm{i in I}; /*tiempo promedio de manipulación de cada operación
por ola*/
param td{i in I}; /*tiempo promedio de demora de cada operación por
ola*/
param ttt; /*turno de trabajo*/

/*P3-Operación*/
param o{i in I, l in L, k in K}; /*matriz de demanda máxima en cant. de
olas por operación, por turno, por día*/
param d{i in I}; /* distancia promedio por cada operación por cada ola
*/
```

```

param fc{i in I, l in L, k in K}; /*factor de cumplimiento minimo de
olas por operación, por turno, por día*/
param toc{i in I}:=(d[i]/vc)+tm[i]+td[i];/* tiempo promedio por cada
ola de operación con carretilla de gran altura*/

/*Restricciones generales*/
/*R1-No negatividad de la solución*/
s.t. R1CantidadC{l in L, k in K}: mc[l,k] >=0;
s.t. R1tiempodecargaC{l in L, k in K}: tcc[l,k] >=0;

/*R2-Restricciones de autonomía.*/
s.t. R2Cautonomiacarga{l in L, k in K}: sum{i in
1..4}(toc[i]*(op[i,l,k]))=(tcc[l,k]*fac);

/*R3-Restricciones de operación.*/
s.t. R3Coperacioncarga{l in L, k in K}:sum{i in
1..4}(toc[i]*(op[i,l,k]))+(tcc[l,k])<= ttt*mc[l,k];

/*R4-Restricciones de nivel de cumplimiento*/
s.t. R4cumplimientoturnomin{i in I,l in L, k in
K}:o[i,l,k]*fc[i,l,k]<= op[i,l,k];
s.t. R4cumplimientodiaC{l in L,i in 1..2}: sum{k in K}o[i,l,k]<=sum{k
in K}op[i,l,k];
s.t. R4cumplimientosemanaCP{i in 3..4}: sum{l in L}sum{k in
K}o[i,l,k]<=sum{l in L}sum{k in K}op[i,l,k];

/*Definiciones*/
/*Tiempo inactivo de la carretilla por turno y por día*/
s.t. R5tinactivoC{l in L, k in K}: tic[l,k] = ttt*maxc - sum{i in
1..4}(toc[i]*op[i,l,k]) - (tcc[l,k]);
/*Tiempo de operación de la carretilla por turno y por día*/
s.t. R1otoc{l in L, k in K}: otoc[l,k]= (sum{i in
1..4}(toc[i]*op[i,l,k]));

/*Auxiliares para definir maximos*/
s.t. maxclunes{k in K}: maxclun >= mc['lun',k];
s.t. maxcmartes{k in K}: maxcmar >= mc['mar',k];
s.t. maxcmiercoles{k in K}: maxcmie >= mc['mie',k];
s.t. maxcjueves{k in K}: maxcjue >= mc['jue',k];
s.t. maxcviernes{k in K}: maxcvie >= mc['vie',k];
s.t. maxcsabado{k in K}: maxcsab >= mc['sab',k];
s.t. maxcdomingo{k in K}: maxcdom >= mc['dom',k];

s.t. maxctotal1: maxc >= maxclun;
s.t. maxctotal2: maxc >= maxcmar;
s.t. maxctotal3: maxc >= maxcmie;
s.t. maxctotal4: maxc >= maxcjue;
s.t. maxctotal5: maxc >= maxcvie;
s.t. maxctotal6: maxc >= maxcsab;
s.t. maxctotal7: maxc >= maxcdom;

/*Función Objetivo*/
minimize obj: maxc;

```

ANEXO II - MODELO BASE PARA EL CÁLCULO DE ORDER PICKERS FASE I

```
/*Conjuntos*/
set I; /*conjunto de operaciones de cada grupo de operaciones */
set L; /*conjunto de días de trabajo*/
set K; /*conjunto turnos de trabajo */

/*Variables*/
/*Variables continuas*/
var tcp{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo de carga*/
var tip{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo inactivo*/

/*Variables discretas*/
var mp{l in L, k in K} integer; /*cantidad de order pickers por dia y
turno*/

/*Variables auxiliares de maximo de cantidad de equipos*/
var maxplun;
var maxpmar;
var maxpmie;
var maxpjue;
var maxpvie;
var maxpsab;
var maxpdom;
var maxp;

/*Variables discretas de cantidad de olas*/
var op{i in I, l in L, k in K}; /*cantidad de olas realizadas por
operación, por turno y por día*/
var otop{l in L, k in K}; /*tiempo de operación del order picker*/

/*Parámetros generales*/
/*P1-Atributos AGVs*/
param vp; /*velocidad del pickers auto guiados*/
param potnp; /*Potencia nomianl order picker*/
param potcp; /*Potencia cargador order picker*/
param avgp; /*Porcentaje de carga de operación order picker*/
param fap:= potcp/(potnp*avgp); /*factor de autonomía de order
pickers*/

/*P2-Tiempos*/
param tm{i in I}; /*tiempo promedio de manipulación propio de cada
operación por ola*/
param td{i in I}; /*tiempo promedio de demora en ser lanzada la ola de
cada sub operación*/
param tmb{i in I}; /*tiempo de espera para que el operario manipule
la mercadería y la ponga sobre el vehículo por bulto*/
param ttt; /*turno de trabajo*/

/*P3-Operación*/
param d{i in I}; /* distancia promedio por cada operación x cada ola */
param bp{i in I}; /*bultos promedio por operación de picking por dia y
por turno*/
```

```

param o{i in I,l in L, k in K}; /*cant. de olas promedio por
operación, por turno, por día*/
param fc{i in I, l in L, k in K}; /*factor de cumplimiento de olas por
operación, por turno, por día*/
param top{i in I}:=(d[i]/vp)+(bp[i]*tmb[i])+td[i];/*tiempo promedio
por cada ola de operación con pickers por dia y por turno*/

/*Restricciones generales*/
/*R1-No negatividad de la solución*/
s.t. R1CantidadP{l in L, k in K}: mp[l,k] >=0;
s.t. R1tiempodecargaP{l in L, k in K}: tcp[l,k] >=0;

/*R2-Restricciones de autonomía.*/
s.t. R2Pautonomiacarga{l in L, k in K}: sum{i in
5..7}(top[i]*(op[i,l,k]))= (tcp[l,k]*fap);

/*R3-Restricciones de operación.*/
s.t. R3Poperacioncarga{l in L, k in K}:sum{i in
5..7}(top[i]*(op[i,l,k]))+(tcp[l,k])<= ttt*mp[l,k];

/*R4-Restricciones de nivel de cumplimiento*/
s.t. R4cumplimientoturnomin{i in I,l in L, k in
K}:o[i,l,k]*fc[i,l,k]<= op[i,l,k];
s.t. R4cumplimientosemanaCP{i in 5..6}: sum{l in L}sum{k in
K}o[i,l,k]<=sum{l in L}sum{k in K}op[i,l,k];
s.t. R4cumplimientodiaP{l in L}: sum{k in K}o[7,l,k]<=sum{k in
K}op[7,l,k];

/*Definiciones*/
/*Tiempo inactivo de la carretilla por turno y por día*/
s.t. R5tinactivoP{l in L, k in K}: tip[l,k] = ttt*maxp - sum{i in
5..7}(top[i]*op[i,l,k]) - (tcp[l,k]);
/*Tiempo de operación de la carretilla por turno y por día*/
s.t. R1otoP{l in L, k in K}: otop[l,k]= (sum{i in
5..7}(top[i]*op[i,l,k]));

/*Auxiliares para definir maximos*/
s.t. maxplunes{k in K}: maxplun >= mp['lun',k];
s.t. maxpmartes{k in K}: maxpmar >= mp['mar',k];
s.t. maxpmiercoles{k in K}: maxpmie >= mp['mie',k];
s.t. maxpjueves{k in K}: maxpjue >= mp['jue',k];
s.t. maxpviernes{k in K}: maxpvie >= mp['vie',k];
s.t. maxpsabado{k in K}: maxpsab >= mp['sab',k];
s.t. maxpdomingo{k in K}: maxpdom >= mp['dom',k];

s.t. maxptotal1: maxp >= maxplun;
s.t. maxptotal2: maxp >= maxpmar;
s.t. maxptotal3: maxp >= maxpmie;
s.t. maxptotal4: maxp >= maxpjue;
s.t. maxptotal5: maxp >= maxpvie;
s.t. maxptotal6: maxp >= maxpsab;
s.t. maxptotal7: maxp >= maxpdom;

/*Función Objetivo*/minimize obj: maxp;

```

ANEXO III. MODELO BASE PARA EL CÁLCULO DE TRANSPALETAS FASE II

```
/*Conjuntos*/
set I; /*conjunto de operaciones cada grupo de operaciones */
set L; /*conjunto de días de trabajo*/
set K; /*conjunto turnos de trabajo */

/*Variables*/
/*Variables continuas*/
var tct{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo de carga*/
var nti{l in L, k in K}; /*Variables continuas de tiempo inactivo*/

/*Variables discretas*/
var mt{l in L, k in K} integer; /*cantidad de transpaletas por dia y
turno*/

/*Variables auxiliares de maximo de cantidad de equipos*/
var maxtlun;
var maxtmar;
var maxtmie;
var maxtjue;
var maxtvie;
var maxtsab;
var maxtdom;
var maxt;

/*Variables discretas de cantidad de olas*/
var op{i in I, l in L, k in K}; /*cantidad de olas realizadas por
operación, por turno y por día*/
var noto{l in L, k in K}; /*tiempo de operación de la transpaleta*/

/*Parámetros generales*/
/*P1-Atributos AGVs*/
param vt; /*velocidad de tranpaleta*/
param potnt; /*Potencia nomianl transpaleta*/
param potct; /*Potencia cargador transpaleta*/
param avgt; /*Porcentaje de carga de operación transpaleta*/
param potnc; /*Potencia nomianl carretilla*/
param potcc; /*Potencia cargador carretilla*/
param avgc; /*Porcentaje de carga de operación carretilla*/

param fat:= potct/(potnt*avgt); /*factor de autonomía de transpaleta*/
param fac:= potcc/(potnc*avgc); /*factor de autonomía de carretilla*/

/*P2-Tiempos*/
param tm{i in I}; /*tiempo promedio de manipulación propio de cada
operación por ola*/
param td{i in I}; /*tiempo promedio de demora en ser lanzada la ola de
cada sub operación*/
param ttt; /*turno de trabajo*/
param tic{l in L, k in K};

/*P3-Operación*/
```

```

param o{i in I,l in L, k in K}; /*cant. de olas promedio por
operación, por turno, por día*/
param cp{i in I}; /*cantidad de pallets/caddies promedio por operación
de expedición o recepción*/
param fc{i in I, l in L, k in K}; /*factor de cumplimiento de olas por
operación, por turno, por día*/
param tot{i in I}:=((d[i]/vt)+tm[i]*cp[i]+td[i]);/* tiempo promedio
por cada ola de operación con transpaleta*/

/*Restricciones generales*/
s.t. R1CantidadT{l in L, k in K}: mt[l,k] >=0;
s.t. R1TiempodecargaT{l in L, k in K}: tct[l,k] >=0;
/*R2-Restricciones de autonomía.*/
s.t. R2Tautonomiacarga{l in L, k in K}: sum{i in 8..12}
(tot[i]*(op[i,l,k]))-tic[l,k]*(fac)/(fac+1)=(tct[l,k]*fat);
/*R3-Restricciones de operación.*/
s.t. R3Toperacioncarga{l in L, k in K}:sum{i in 8..12}
(tot[i]*(op[i,l,k]))-tic[l,k]*(fac)/(fac+1)+tct[l,k] <= ttt*mt[l,k];
/*R4-Restricciones de nivel de cumplimiento*/
s.t. R6cumplimientoturnominT{i in 8..12, l in L, k in
K}:o[i,l,k]*fc[i,l,k]<= op[i,l,k];
s.t. R6cumplimientosemanaT: sum{l in L}sum{k in K}o[8,l,k]<=sum{l in
L}sum{k in K}op[8,l,k];
s.t. R6cumplimientodiaT{i in 9..12, l in L}: sum{k in
K}o[i,l,k]<=sum{k in K}op[i,l,k];

/*Definiciones*/
/*Tiempo inactivo de la carretilla por turno y por día*/
s.t. tinactivoT{l in L, k in K}: nti[l,k] = tic[l,k]+maxt*ttt-(sum{i
in 8..12}(tot[i]*op[i,l,k]))- (tct[l,k]));
/*Tiempo de operación de la carretilla por turno y por día*/
s.t. R1otoT{l in L, k in K}: noto[l,k]= (sum{i in
8..12}(tot[i]*op[i,l,k]));

/*Auxiliares para definir maximos*/
s.t. maxtlunes{k in K}: maxtlun >= mt['lun',k];
s.t. maxtmartes{k in K}: maxtmar >= mt['mar',k];
s.t. maxtmiercoles{k in K}: maxtmie >= mt['mie',k];
s.t. maxtjueves{k in K}: maxtjue >= mt['jue',k];
s.t. maxtviernes{k in K}: maxtvie >= mt['vie',k];
s.t. maxtsabado{k in K}: maxtsab >= mt['sab',k];
s.t. maxtdomingo{k in K}: maxtdom >= mt['dom',k];

s.t. maxttotal1: maxt >= maxtlun;
s.t. maxttotal2: maxt >= maxtmar;
s.t. maxttotal3: maxt >= maxtmie;
s.t. maxttotal4: maxt >= maxtjue;
s.t. maxttotal5: maxt >= maxtvie;
s.t. maxttotal6: maxt >= maxtsab;
s.t. maxttotal7: maxt >= maxtdom;

/*Función Objetivo*/
minimize obj: maxt;

```

ANEXO IV. DATOS UTILIZADOS EN EL CASO BASE

```
/*Datos*/
data;
/*Conjuntos*/
/*Extracción Almacenaje Fusión de Bultos Reparto Reparto
base. Repos. Cajas Reposición Reubic. para Reparto Reubic.
para expedición Reubic. Pre Recep. Expe. Apertura de Expedición
Cierre de Expedición Picking */
set I:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12;
set K:= noche mañana tarde;
set L:= lun mar mie jue vie sab dom;

/*Parámetros*/
/*Atributos*/
param vc:= 175; /*metros/minuto*/
param potnc := 25; /*Potencia nomianl Carretilla*/
param potcc := 16; /*Potencia cargador Carretilla*/
param avgc := 0.44; /*Porcentaje de carga de operación Carretilla*/
param vp:= 120; /*metros/minuto*/
param potnp := 2.8; /*Potencia nomianl order picker*/
param potcp := 5.76; /*Potencia cargador order picker*/
param avgp := 0.92; /*Porcentaje de carga de operación order picker*/
param vt:= 432; /*metros/minuto*/
param potnt := 2.8; /*Potencia nomianl Transpaleta*/
param potct := 5.76; /*Potencia cargador Transpaleta */
param avgt := 0.51; /*Porcentaje de carga de operación Transpaleta */

/*Distancias*/
param d:= 1 42.8, 2 46.3, 3 93.4, 4 49.3, 5 80.3, 6 80.3, 7 119 8
48.2, 9 48.2, 10 48.2 11 179.2, 12 243.2; /*metros*/
/*Tiempos*/
param tm:= 1 2.3, 2 1.62, 3 2.4, 4 2.4, 5 0, 6 0, 7 0, 8 1, 9 1, 10 1,
11 2.28, 12 1.34; /*minutos*/
param td:= 1 1, 2 1, 3 1, 4 1, 5 1, 6 1, 7 1, 8 1, 9 1, 10 1, 11 1, 12
1; /*minutos*/
param tmb:=1 0, 2 0, 3 0, 4 0, 5 0.2, 6 0.2, 7 0.2, 8 0, 9 0, 10 0, 11
0, 12 0; /*minutos*/

/*Operación*/
param ttt:=480; /*minutos*/
param cp:= 1 0, 2 0, 3 0, 4 0, 5 0, 6 0, 7 0, 8 1, 9 1, 10 1, 11 16,
12 26; /*unidad*/
param bp:= 1 0, 2 0, 3 0, 4 0, 5 40, 6 12, 7 68, 8 0, 9 0, 10 0, 11 0,
12 0;
/*Demanda*/
param o:=
/*Extracción*/
[1,*,*]:
noche mañana tarde:=
lun 32 18 47
mar 36 10 36
mie 20 17 25
jue 13 1 13
vie 21 14 32
```

```

sab 11 33 0
dom 6 0 0
/*Almacenaje*/
[2,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 10 255 79
mar 10 260 172
mie 63 206 410
jue 103 295 248
vie 128 297 296
sab 40 373 0
dom 45 0 0
/*Repos.Cajas */
[3,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 60 74 127
mar 110 39 130
mie 32 64 131
jue 37 30 118
vie 33 83 92
sab 56 81 0
dom 7 0 0
/*Reposicion */
[4,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 180 186 150
mar 231 230 166
mie 237 254 173
jue 202 149 151
vie 166 201 142
sab 89 162 0
dom 63 0 0
/*Reparto*/
[5,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0 168 134
mar 25 173 75
mie 39 186 95
jue 0 146 117
vie 0 167 91
sab 0 86 0
dom 4 0 0
/*Reparto Base*/
[6,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 20 29 72
mar 2 49 31
mie 20 24 8
jue 17 51 2
vie 24 20 54
sab 0 101 0
dom 6 0 0
/*Picking*/
[7,*,*]:

```

```

noche manana tarde:=
lun 177 229 213
mar 187 291 236
mie 135 288 216
jue 148 222 145
vie 120 270 153
sab 39 199 0
dom 59 0 0
/*Reubic. para Reparto*/
[8,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 1 218 28
mar 0 97 16
mie 0 163 12
jue 25 141 44
vie 12 182 18
sab 8 35 0
dom 0 0 0
/* Reubic. para expedicion*/
[9,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 391 393 552
mar 649 342 622
mie 613 320 788
jue 563 236 687
vie 565 399 563
sab 369 175 3
dom 59 0 0
/*Reubic. Pre Recep. Expe.*/
[10,*,*]: noche manana tarde:=
lun 20 24 33
mar 21 18 23
mie 19 30 21
jue 23 16 12
vie 12 28 29
sab 15 24 0
dom 6 0 0
/*Recepcion*/
[11,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 40 27 49
mar 37 23 42
mie 48 25 45
jue 36 20 53
vie 40 31 38
sab 26 26 5
dom 9 0 0
/*Expedicion*/
[12,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 33 19 47
mar 41 18 38
mie 39 23 39
jue 42 11 45

```

```

vie 34 31 35
sab 21 24 10
dom 1 0 0; /*olas*/
/*Porcentaje cumplimiento*/
param fc:=
/*Extraccion*/
[1,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.7 0.7
mar 0.5 0.7 0.7
mie 0.5 0.7 0.7
jue 0.5 0.7 0.7
vie 0.5 0.7 0.7
sab 0.5 0.7 0.7
dom 0.5 0.7 0.7
/*Almacenaje*/
[2,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.7 0.7
mar 0.5 0.7 0.7
mie 0.5 0.7 0.7
jue 0.5 0.7 0.7
vie 0.5 0.7 0.7
sab 0.5 0.7 0.7
dom 0.5 0.7 0.7
/*Repos.Cajas */
[3,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5
dom 0.5 0.5 0.5
/*Reposicion */
[4,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5
dom 0.5 0.5 0.5
/* Reparto*/
[5,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5

```

```

dom 0.5 0.5 0.5
/*Reparto Base */
[6,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5
dom 0.5 0.5 0.5
/*Picking*/
[7,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5
dom 0.5 0.5 0.5
/*Reubic. para Reparto*/
[8,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.5 0.5 0.5
mar 0.5 0.5 0.5
mie 0.5 0.5 0.5
jue 0.5 0.5 0.5
vie 0.5 0.5 0.5
sab 0.5 0.5 0.5
dom 0.5 0.5 0.5
/*Reubicacion para expedicion*/
[9,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.7 0.7 0.7
mar 0.7 0.7 0.7
mie 0.7 0.7 0.7
jue 0.7 0.7 0.7
vie 0.7 0.7 0.7
sab 0.7 0.7 0.7
dom 0.7 0.7 0.7
/*Reubic. Pre Recep. Expe.*/
[10,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.7 0.7 0.7
mar 0.7 0.7 0.7
mie 0.7 0.7 0.7
jue 0.7 0.7 0.7
vie 0.7 0.7 0.7
sab 0.7 0.7 0.7
dom 0.7 0.7 0.7
/*Recepcion */
[11,*,*]:
noche manana tarde:=

```

```
lun 0.7 0.7 0.7
mar 0.7 0.7 0.7
mie 0.7 0.7 0.7
jue 0.7 0.7 0.7
vie 0.7 0.7 0.7
sab 0.7 0.7 0.7
dom 0.7 0.7 0.7
/*Expedicion*/
[12,*,*]:
noche manana tarde:=
lun 0.7 0.7 0.7
mar 0.7 0.7 0.7
mie 0.7 0.7 0.7
jue 0.7 0.7 0.7
vie 0.7 0.7 0.7
sab 0.7 0.7 0.7
dom 0.7 0.7 0.7;

end;
```

ANEXO V. CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CICLOS COMBINADOS

Cálculo de tiempo de operación

Para el cálculo del tiempo de operación en la combinación de ciclos se utilizó la velocidad de la carretilla porque las operaciones de ejemplo se realizan con este equipo. La fórmula para el cálculo del tiempo de operación fue la del modelo (se despliega a continuación) , utilizando las distancias correspondientes de cada recorrido, el tiempo de manipulación, tiempo de demora y la velocidad del equipo mencionado. Para el caso de combinación de olas se utilizó un único tiempo de demora para las dos operaciones.

$$\text{Ecuación: } \text{toc}\{i \text{ in } l\} = (d[i]/vc) + tm[i] + td[i];$$

Dato	valor
vc	175 metros/minuto
tm (Repos. Cajas)	2.4 minutos
tm (Reposición)	2.4 minutos
td (Repos. Cajas)	1 minuto
td (Reposición)	1 minuto

Cálculo de distancias

El cálculo de distancias fue realizado con el documento de AutoCAD del layout del depósito.

ANEXO VI. INVERSIÓN DEL CASO BASE

Concepto	Moneda	Precio USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Consultoría														
Estudio de prefactibilidad	USD		1	15.000										
Infraestructura y obra civil														
Área de Mantenimiento	USD		1	1.500										
Área de Supervisión	USD		1	1.500										
Área de Carga	USD		1	12.500										
Maquinaria														
Carretilla de gran altura	USD	100.000	6	600.000	0	0	0	100.000	0	100.000	0	0	100.000	100.000
Transpaleta autoguiada	USD	65.000	10	650.000	0	65.000	130.000	0	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000
Order picker	USD	80.000	13	1.040.000	0	80.000	80.000	0	240.000	160.000	0	80.000	80.000	160.000
Kit de repuestos críticos	USD	1.500	29	43.500	0	3000	4500	1500	6000	6000	1500	3000	4500	6000
Transporte marítimo	USD		1	44.000	0	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500
Inspección en fábrica	USD	3.000	1	3.000										
Instalaciones y suministros														
Suministro de sistema de guiado	USD		1	35.000										
Instalación de sistema de guiado	USD		1	15.000										
Puesta en marcha del sistema	USD		1	5.000										
Elementos de seguridad	USD		1	3.000										
Instalación eléctrica														
Adaptaciones Zona de carga	USD		1	1.500										
Software														
Sistema de control de guiado	USD		1	45.000										
Integración de software	USD		1	3.000										
Instalación	USD		1	5.000										
Capacitación														
Capacitación de software	USD		1	2.000										
Capacitación de manejo equipos	USD		1	1.500										
Capacitación de mantenimiento	USD		1	2.500										
Imprevistos % de total														
Imprevistos	%5		1	251.750										
Total				2.784.250		153.500	220.000	107.000	316.500	336.500	72.000	153.500	255.000	336.500

ANEXO VII. COSTOS OPERATIVOS DEL CASO BASE

COSTO OPERATIVO Anual	Unidad de medida	Monto	Moneda	Monto USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Mano de obra																
Sueldo Operario depósito	Sueldo	40.000	\$	10.909	52	567.273										
Sueldo Supervisor de sistema	Sueldo	120.000	\$	32.727	4	130.909										
Sueldo Mecánico especializado	Sueldo	90.000	\$	24.545	4	98.182										
Total sueldos		250.000		68.182		796.364	796.364	835.022	875.557	918.060	962.626	1.009.355	1.058.353	1.109.730	1.163.600	1.220.085
Costo anual empresa						299.078	299.079	313.597	328.820	344.782	361.520	379.069	397.470	416.765	436.996	458.210
Software informático																
Mantenimiento mensual	Mensual		USD		1	3.600	3.780	3.969	4.167	4.376	4.595	4.824	5.066	5.319	5.585	5.864
Electricidad																
Cargo variable UTE	KWh		\$	-		199.760	54.480	56.114	57.798	59.532	61.318	63.157	65.052	67.004	69.014	71.084
Mantenimiento																
Mtto Preventivo	Anual	3000	USD	1.500	1	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Mtto Programado	Anual	3000	USD	1.500	0,5	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250	2.250
Mtto Correctivo	Unitario	6000	USD	3.000	0,25	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
LTSA	Anual	4000	USD	2.000	1	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Kit de repuestos anuales	Unitario	3000	USD	3.000	1	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Total							1.164.299	1.219.190	1.276.717	1.337.008	1.400.196	1.466.421	1.535.829	1.608.574	1.684.817	1.764.726

ANEXO VIII. INVERSIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Concepto	Unidad	Moneda	Precio USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Maquinaria													
Autoelevador	Unidad	USD	25000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	50.000	50.000	50.000	50.000	25.000
Carretilla	Unidad	USD	15000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Picking	Unidad	USD	15000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
		USD		85.000	85.000	85.000	85.000	85.000	110.000	110.000	110.000	110.000	85.000

ANEXO IX. COSTOS OPERATIVOS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

COSTO OPERATIVO Anual	Unidad de medida	Monto	Moneda	Monto USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Mano de obra																
Sueldo Operario depósito	Sueldo	35.000	\$	9.545	190	1.813.636	0	15.909	15.909	15.909	15.909	15.909	19.091	19.091	19.091	19.091
Sueldo Supervisor de sistema	Sueldo	60.000	\$	16.364	4	65.455										
Sueldo Mecánico especializado	Sueldo	60.000	\$	16.364	4	65.455										
Total sueldos		155.000				1.944.545	1.944.545	2.038.941	2.137.919	2.241.701	2.350.521	2.464.624	2.584.266	2.709.716	2.841.256	2.979.181
Costo anual empresa						581.203	581.203	609.417	639.000	670.020	702.545	736.649	772.409	809.904	849.220	890.444
Software informático																
Mantenimiento mensual	Mensual	600	USD	600	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electricidad																
Cargo variable UTE	KWh	4	\$	0,091	16000	164.281	44.804	48.836	53.232	58.022	63.245	68.937	75.141	81.903	89.275	97.310
Mantenimiento																
Mtto Preventivo	Anual		USD	500	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Mtto Programado	Anual	1.500	USD	1500	0,5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Mtto Correctivo	Unitario	3.000	USD	3000	0,25	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
LTSA	Anual		USD	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kit de repuestos anuales	Unitario						3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Total							2.575.552	2.718.103	2.851.059	2.990.652	3.137.220	3.291.119	3.455.907	3.625.615	3.803.841	3.991.025

ANEXO X. INVERSIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA

Concepto	Unidad	Moneda	Precio USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Maquinaria													
Autoelevador	Unidad	USD	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	50.000	50.000	50.000	50.000	25.000	25.000
Carretilla	Unidad	USD	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Picking	Unidad	USD	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
		USD		70.000	70.000	70.000	70.000	70.000	95.000	95.000	95.000	95.000	70.000

ANEXO XI. COSTOS OPERATIVOS DE LA SITUACIÓN ACTUAL OPTIMIZADA

COSTO OPERATIVO Anual	Unidad de medida	Monto	Moneda	Monto USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Mano de obra																
Sueldo Operario depósito	Sueldo	35.000	\$	9.545	147	1.403.182	0	11.932	11.932	11.932	11.932	11.932	14.318	14.318	14.318	14.318
Sueldo Supervisor de sistema	Sueldo	60.000	\$	16.364	4	65.455										
Sueldo Mecánico especializado	Sueldo	60.000	\$	16.364	4	65.455										
Total sueldos		155.000				1.534.091	1.534.091	1.608.561	1.686.647	1.768.523	1.854.374	1.944.392	2.038.780	2.137.749	2.241.524	2.350.336
Costo empresa						458.523	458.523	480.781	504.120	528.592	554.252	581.157	609.369	638.950	669.967	702.489
Software informático																
Mantenimiento mensual	Mensual	600	USD	600	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electricidad																
Cargo variable UTE	KWh	4	\$	0,091	16000	164.281	44.804	48.836	53.232	58.022	63.245	68.937	75.141	81.903	89.275	97.310
Mantenimiento																
Mtto Preventivo	Anual		USD	500	1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Mtto Programado	Anual	1.500	USD	1500	0,5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
Mtto Correctivo	Unitario	3.000	USD	3000	0,25	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
LTSA	Anual		USD	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kit de repuestos anuales	Unitario	3.000	USD	3000	1	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Total							2.042.418	2.155.111	2.260.930	2.372.069	2.488.802	2.611.417	2.742.607	2.877.921	3.020.083	3.169.452

ANEXO XII. INVERSIÓN DEL SISTEMA CON RECAMBIO DE BATERÍAS

Concepto	Moneda	Precio USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Consultoría														
Estudio de prefactibilidad	USD		1	15.000										
Infraestructura y obra civil														
Área de Mantenimiento	USD		1	1.500										
Área de Supervisión	USD		1	1.500										
Área de Carga	USD		1	12.500										
Maquinaria														
Carretilla de gran altura	USD	100.000	4	400.000	0	0	0	100.000	0	100.000	0	0	100.000	100.000
Transpaleta autoguiada	USD	65.000	8	520.000	0	65.000	130.000	0	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000	65.000
Order picker	USD	80.000	9	720.000	0	80.000	80.000	0	240.000	160.000	0	80.000	80.000	160.000
Kit de repuestos críticos	USD	1.500	21	31.500	0	3000	4500	1500	6000	6000	1500	3000	4500	6000
Transporte marítimo	USD		1	33.000	0	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500	5.500
Inspección en fábrica	USD	3.000	1	3.000										
Instalaciones y suministros														
Suministro de sistema de guiado	USD		1	35.000										
Instalación de sistema de guiado	USD		1	15.000										
Puesta en marcha del sistema	USD		1	5.000										
Elementos de seguridad	USD		1	3.000										
Instalación eléctrica														
Adaptaciones Zona de carga	USD		1	120.000										
Software														
Sistema de control de guiado	USD		1	1.500										
Integración de software	USD													
Instalación	USD		1	45.000										
Capacitación														
Capacitación de software	USD		1	5.000										
Capacitación de manejo equipos	USD													
Capacitación de mantenimiento	USD		1	2.000										
Imprevistos % de total														
Imprevistos	%5		1	2.500										
Total						153.500	220.000	107.000	316.500	336.500	72.000	153.500	255.000	336.500

ANEXO XIII. COSTOS OPERATIVOS DEL SISTEMA CON RECAMBIO DE BATERÍAS

COSTO OPERATIVO Anual	Unidad de medida	Monto	Moneda	Monto USD	Cantidad	Precio total USD	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Mano de obra																
Sueldo Operario depósito	Sueldo	40.000	\$	10.909	52	567.273										
Sueldo Supervisor de sistema	Sueldo	120.000	\$	32.727	4	130.909										
Sueldo Mecánico especializado	Sueldo	90.000	\$	24.545	4	98.182										
Total sueldos		250.000		68.182		796.364	796.364	835.022	875.557	918.060	962.626	1.009.355	1.058.353	1.109.730	1.163.600	1.220.085
Costo empresa						238.024	249.579	261.694	274.398	287.718	301.685	316.330	331.686	347.787	364.670	238.024
Software informático																
Mantenimiento mensual	Mensual	300	USD	300	12	3.600	3.780	3.969	4.167	4.376	4.595	4.824	5.066	5.319	5.585	5.864
Electricidad																
Cargo variable UTE	KWh		\$	-		199.760	54.480	56.114	57.798	59.532	61.318	63.157	65.052	67.004	69.014	71.084
Mantenimiento																
Mtto Preventivo	Anual	3000	USD	3.000	1	3.000	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00
Mtto Programado	Anual	4500	USD	4.500	0,5	2.250	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00	2250,00
Mtto Correctivo	Unitario	8000	USD	8.000	0,25	2.000	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
LTSA	Anual	4000	USD	4.000	1	4.000	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
Kit de repuestos anuales	Unitario	3000	USD	3.000	1	3.000	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00
Total							1.103.245	1.155.171	1.209.591	1.266.623	1.326.395	1.389.037	1.454.688	1.523.495	1.595.607	1.671.186

ANEXO XIV. CÁLCULO DE CONSUMO ELÉCTRICO AGV

Concepto	Franja	Horario	\$/KWh
Energía	Punta	18:00-22:00	8,122
Energía	Valle	00:00-07:00	2,048
Energía	Llano	07:00-18:00; 22:00-24:00	3,537

Potencia		
Carretilla (KW)	Transpaleta (KW)	Order Picker (KW)
16	5,76	5,76

Día	Turno	Carretilla (Hrs)	Transpaleta (Hrs)	Order Picker (Hrs)	Total (Hrs)	Carretilla (KWh)	Transpaleta (KWh)	Order Picker (KWh)	Carretilla (\$)	Transpaleta (\$)	Order Picker (\$)	Total (\$)
Lunes	N	18,36	14,20	25,60	58,15	293,72	81,78	147,44	\$ 711	\$ 198	\$ 357	\$ 1.266
	M	16,30	9,53	24,72	50,55	260,74	54,90	142,40	\$ 1.920	\$ 133	\$ 1.048	\$ 3.101
	T	16,30	14,18	24,72	55,20	260,74	81,66	142,40	\$ 1.520	\$ 198	\$ 830	\$ 2.548
Martes	N	16,30	9,23	23,98	49,51	260,74	53,15	138,13	\$ 631	\$ 129	\$ 334	\$ 1.094
	M	16,30	9,25	24,72	50,27	260,74	53,28	142,40	\$ 1.920	\$ 129	\$ 1.048	\$ 3.097
	T	16,30	14,22	22,25	52,77	260,74	81,92	128,16	\$ 1.520	\$ 198	\$ 747	\$ 2.465
Miércoles	N	16,30	13,38	22,95	52,62	260,74	77,05	132,17	\$ 631	\$ 186	\$ 320	\$ 1.137
	M	16,30	10,64	22,25	49,18	260,74	61,27	128,16	\$ 1.920	\$ 148	\$ 944	\$ 3.012
	T	16,30	12,71	24,72	53,73	260,74	73,20	142,40	\$ 1.520	\$ 177	\$ 830	\$ 2.527
Jueves	N	16,30	13,12	24,16	53,57	260,74	75,55	139,17	\$ 631	\$ 183	\$ 337	\$ 1.151
	M	16,30	7,97	24,72	48,99	260,74	45,89	142,40	\$ 1.920	\$ 111	\$ 1.048	\$ 3.079
	T	16,30	12,71	24,72	53,73	260,74	73,20	142,40	\$ 1.520	\$ 177	\$ 830	\$ 2.527
Viernes	N	0,66	17,23	23,68	41,57	10,50	99,27	136,38	\$ 25	\$ 240	\$ 330	\$ 596
	M	16,30	14,17	24,72	55,18	260,74	81,59	142,40	\$ 1.920	\$ 197	\$ 1.048	\$ 3.166
	T	16,30	14,30	22,25	52,84	260,74	82,36	128,16	\$ 1.520	\$ 199	\$ 747	\$ 2.466
Sábado	N	16,30	7,61	24,72	48,63	260,74	43,86	142,40	\$ 631	\$ 106	\$ 345	\$ 1.082
	M	16,30	5,54	16,69	38,53	260,74	31,94	96,12	\$ 1.920	\$ 77	\$ 708	\$ 2.705
	T	16,30	5,64	2,47	24,41	260,74	32,48	14,24	\$ 1.520	\$ 79	\$ 83	\$ 1.682
Domingo	N	6,47	3,58	4,94	14,99	103,45	20,62	28,48	\$ 250	\$ 50	\$ 69	\$ 369
	M	15,47	0,00	24,72	40,19	247,46	0,00	142,40	\$ 1.822	\$ -	\$ 1.048	\$ 2.870
	T	16,30	5,89	24,72	46,91	260,74	33,91	142,40	\$ 1.520	\$ 82	\$ 830	\$ 2.432
										Total de la semana		\$ 44.372
										Total mensual		\$ 186.364

ANEXO XV. CÁLCULO DE CONSUMO ELÉCTRICO DE LOS EQUIPOS MANUALES

Concepto	Franja	Horario	\$/KWh
Energía	Punta	18:00-22:00	8,122
Energía	Valle	00:00-07:00	2,048
Energía	Llano	07:00-18:00; 22:00-24:00	3,537

Potencia		
Autoelevador (KW)	Picker (KW)	Carretilla (KW)
7,68	2,16	1,68

Día	Turno	Autoelevador (Hrs)	Picker (Hrs)	Carretilla (Hrs)	Total (Hrs)	Autoelevador (KWh)	Picker (KWh)	Carretilla (KWh)	Autoelevador (\$)	Picker (\$)	Carretilla (\$)	Total (\$)		
Lunes	N	37,33	36,00	25,33	58,15	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	50,55	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	55,20	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Martes	N	37,33	36,00	25,33	49,51	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	50,27	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	52,77	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Miércoles	N	37,33	36,00	25,33	52,62	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	49,18	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	53,73	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Jueves	N	37,33	36,00	25,33	53,57	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	48,99	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	53,73	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Viernes	N	37,33	36,00	25,33	41,57	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	55,18	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	52,84	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Sábado	N	37,33	36,00	25,33	48,63	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	37,33	36,00	25,33	38,53	286,72	77,76	42,56	\$ 2.111	\$ 573	\$ 313	\$ 2.997		
	T	37,33	36,00	25,33	24,41	286,72	77,76	42,56	\$ 1.671	\$ 453	\$ 248	\$ 2.373		
Domingo	N	37,33	36,00	25,33	14,99	286,72	77,76	42,56	\$ 694	\$ 188	\$ 103	\$ 985		
	M	0,00	0,00	0,00	40,19	0,00	0,00	0,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -		
	T	0,00	0,00	0,00	46,91	0,00	0,00	0,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -		
												Total de la semana	\$ 39.115	
													Total mensual	\$ 164.281