



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE FLEXIBILIDAD EN EL ENRUTAMIENTO PARA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE VEHÍCULOS DE GUIADO AUTÓNOMO
EN UN PROCESO DE ALMACENAMIENTO INDUSTRIAL SIMULADO POR
COMPUTADOR**

**MAESTRÍA EN INGENIERIA INDUSTRIAL
PROFUNDIZACIÓN**

WILDAR BONILLA PARRA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ COLOMBIA**

2017

Análisis Y Valoración De Flexibilidad En El Enrutamiento Para Implementación De Un Sistema De Vehículos De Guiado Autónomo En Un Proceso De Almacenamiento Industrial Simulado Por Computador

Wildar Bonilla Parra

Trabajo de Grado de Maestría presentado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial.

Director:

Ph. D Wilson Adarmes Jaimes

Codirector:

Ing. Frank Ballesteros.

Área:

Logística.

Línea de investigación:

Sistemas de vehículos de guiado automático.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

BOGOTÁ COLOMBIA

2017

Agradecimientos

Agradezco el apoyo que me ofrecieron para llegar a culminar este trabajo de grado, en primer medida a Dios, a mis padres y a mi esposa por la paciencia y el ánimo con el que me acompañaron en estos años de estudio, al grupo de investigación SEPRO y su director el Ingeniero y Ph.D Wilson Adarmes por todos sus valiosos aportes y orientación para la elaboración de este documento. A todos ellos mil gracias.

RESUMEN

Se estudia el diseño y puesta en marcha mediante la simulación de un sistema AGV (vehículos de guiado automatizado por sus siglas en inglés), en un proceso de cargue para despachos en un almacén de mercancías, donde se evaluarán las principales variables a tener en cuenta de acuerdo con los parámetros y requerimientos de funcionamiento de la operación logística, revisando la literatura y metodologías recomendadas para la implementación de un sistema de AGV, se evaluó: el tipo de vehículo, espacio de almacenamiento, ruteo de vehículos, número de vehículos, posicionamiento del vehículo, programación de vehículos, administración de la batería y la demanda de cada producto en los despachos. Finalizado el diseño del sistema AGV se procedió a la recreación de las condiciones del almacén, carga para despacho y ruteo en un software de simulación para evaluar el desempeño y las dificultades de reorganizar el despacho de pedidos dentro del sistema, al comparar AGV con montacargas tradicionales, viendo una mayor eficiencia de operación para el primer caso.

Palabras Clave: AGV, Ruteo, VRPTW (problema de ruteo de vehículos con ventana de tiempo), simulación, eficiencia, flexibilidad, programación, pallet, recurso, entidad, proceso, arribos, punto de reordenar.

ABSTRACT

The design and start-up is studied mean of simulation of an AGV system (automated guided vehicles), in a pickup process for shipments in a freight warehouse, where the main variables are taken into account will be evaluated according to the parameters and operating requirements of the logistics operation, reviewing the literature and recommended methodologies for the implementation of an AGV system, the following was studied: the type of vehicle, storage space, vehicle routing, number of vehicles, positioning of the vehicle, vehicle programming, battery management and the demand of each product in the offices. Once the design of the AGV system was completed the conditions of the warehouse, pickup for dispatch and routing in a simulation software were analyzed to evaluate the performance and the difficulties of reorganizing the order fulfillment within the system, when comparing AGV with traditional forklifts, checking a greater efficiency of operation for the first case.

Keywords: AGV, Routing, VRPTW (vehicle routing problem with time window), simulation, efficiency, flexibility, programming, pallet, resource, entity, process, arrivals, reorder point.

Contenido

1	PRESENTACIÓN	3
1.1	INTRODUCCIÓN	3
1.2	OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	5
1.2.1	Objetivo general	5
1.2.2	Objetivos Específicos.	5
2	ANTECEDENTES	6
2.1	Generalidades.....	6
2.2	Trayectoria.	7
2.3	Gerencia de Sistemas de Automated guided vehicles.	8
2.4	Tipos de AGV.	9
2.5	Enrutamiento Del Vehículo.	10
2.6	Simulación.	11
2.7	Identificación del problema.	12
3	PARAMETROS PROCESO DE ALMACENAMIENTO.	14
3.1	Dimensiones productos almacenados.	14
3.2	Unitarización de las cargas	20
3.3	Unitarización con doble embalaje referencia H	23
3.4	Inmueble de almacenamiento.....	26
4	DISEÑO DEL SISTEMA DE AGV.....	28
4.1	Cantidades para almacenar.....	29
4.1.1	Formulación Modelo Cantidad de pedido económico con limitaciones de almacenamiento.	29
4.1.2	Aplicación del modelo.....	30
4.1.3	Programación en GAMS	33
4.1.4	Análisis de las variables	34
4.2	Ruteo de Vehículos.	36
4.2.1	Modelo Matemático VRPTW.....	36
4.2.2	Desarrollo del planteamiento de VRPTW	38
4.2.3	Programación en GAMS del VRPTW.....	41
4.2.4	Solución de la programación en GAMS para VRPTW.	44
4.3	Selección De AGV	45
5	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS	47
5.1	Construcción de la simulación.	47
5.2	Locaciones	49
5.3	Entidades.....	51
5.4	Redes.....	52
5.5	Recursos.....	56
5.6	Arribos	57
5.7	Procesos	58

5.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
6	CONCLUSIONES.....	72
7	Bibliografía.....	74
8	ANEXO 1	79
9	ANEXO 2.....	84
10	ANEXO 3.....	90

Lista de Figuras.

Figura 3.1. Área y Volumen Embalajes.	14
Figura 3.1.1 Diagrama Referencia A.....	15
Figura 3.1.2 Diagrama Referencia B.....	15
Figura 3.1.3 Diagrama Referencia C.....	16
Figura 3.1.4 Diagrama Referencia D.....	16
Figura 3.1.5 Diagrama Referencia E.....	17
Figura 3.1.6 Diagrama Referencia F.....	17
Figura 3.1.7 Diagrama Referencia G.....	18
Figura 3.1.8 Diagrama Referencia H.....	18
Figura 3.1.9 Diagrama Referencia I.....	19
Figura 3.1.10 Diagrama Referencia J.....	19
Figura 3.2.1 Pallet CHP 1200x1000. (Unidades en milímetros).....	20
Figura 3.2.3 Ventana de introducción de datos Caja a Paleta Software Quick Pallet Maker®	21
Figura 3.2.4 Solución estibación Quick Pallet Maker®.....	22
Figura 3.2.5 Soluciones posibles de estibación Quick Pallet Maker®.....	23
Figura 3.3.1 Embalaje secundario Quick Pallet Maker®.....	24
Figura 3.3.2 Holgura interna Quick Pallet Maker®.....	24
Figura 3.3.3 Cantidad de cajas por embalaje secundario.....	25
Figura 3.3.4 Doble embalaje referencia H.....	25
Figura 3.4.1 Estanterías.	26
Figura 3.4.2 Espacio de la bodega de almacenamiento.	27
Figura 4.1 Requisitos del ruteo. [1]	28
Figura 4.1.2. Embalajes sobre el pallete.....	30
Figura 4.1.4.1 Disponibilidad de almacenamiento.	34
Figura 4.1.4.2 Distribución de la referencias en el almacén.....	35
Figura 4.1.4.3 Representación Arco y nodo.....	36
Tabla 4.3 Características del GP8 Pallet Truck de la empresa KMH.....	45
Figura 4.3 GP8 Pallet Truck de la empresa KMH en operación.....	46
Figura 5.1.1 Interface Promodel®.....	47
Figura 5.1.2 Información general simulación en Promodel®.....	48
Figura 5.1.3 Menú construcción Promodel®.....	49
Figura 5.2.1 Iconografía de las pallets en Promodel®.....	49
Figura 5.2.2 Iconografía camión de carga en Promodel®.....	50
Figura 5.2.3 Ventana de locaciones en Promodel®.....	50
Figura 5.2.4 Lista de las locaciones en Promodel®.....	51
Figura 5.3.1 Ventana de entidades en Promodel®.....	51
Figura 5.3.2 Iconografía de la referencia Promodel®.....	52
Figura 5.4.1 Ventana principal de asignación de redes en Promodel®.....	52
Figura 5.4.2 Colores de red Promodel®	53

Figura 5.4.3 Ventana de asignación de tiempos a los arcos.....	54
Figura 5.4.4 Asignación de locaciones a cada nodo.....	54
Figura 5.4.5 ventana de mapeo.....	54
Figura 5.4.6 Descripción de las rutas calculadas por VRPTW en Promodel®.....	55
Figura 5.5.1 Ventana de asignación de recursos.....	56
Figura 5.5.2 Iconos para montacargas y AVG en la simulación.....	56
Figura 5.5.3 Ventana para asignar nodo de regreso.....	57
Figura 5.6.1 Ventana de arribos de entidades.....	57
Figura 5.7.0 Herramientas de ayuda para asignar nuevos procesos.....	58
Figura 5.7.1 Ventana de entrada de entidad y locación.....	59
Figura 5.7.2 Ventana de salida de entidad y recurso que lo transporta.....	59
Figura 5.7.3 Regla de ruta.....	60
Figura 5.7.4 Estructura de programación en Promodel®.....	61
Figura 5.7.5 asistente para comandos lógicos.....	61
Figura 5.7.6 Simulación con montacargas.....	62
Figura 5.7.7 Simulación con AGV.....	63
Figura 5.8.1 Estado de ocupación de las locaciones montacargas.....	64
Figura 5.8.2 Estado de ocupación de las locaciones AGV.....	64
Figura 5.8.3 Porcentaje de Ocupación AGV.....	66
Figura 5.8.4 Porcentaje de Ocupación Montacargas.....	66
Figura 5.8.5 Porcentaje de Ocupación montacargas.....	67
Figura 5.8.6 Porcentaje de utilización AGV.....	68
Figura 5.8.7 Porcentaje de utilización AGV.....	69
Figura 5.8.8 Porcentaje de Ocupación AGV.....	69
Figura 5.8.9 Histograma de generación de valores de Carga para AGV.....	70
Figura 5.8.10 Histograma de generación de valores de Carga para montacargas.....	71
Figura Anexo 1 Solución estibación B Quick Pallet Maker®.....	79
Figura Anexo 1 Solución estibación C Quick Pallet Maker®.....	80
Figura Anexo 1 Solución estibación D Quick Pallet Maker®.....	80
Figura Anexo 1 Solución estibación E Quick Pallet Maker®.....	81
Figura Anexo 1 Solución estibación F Quick Pallet Maker®.....	81
Figura Anexo 1 Solución estibación G Quick Pallet Maker®.....	82
Figura Anexo 1 Solución estibación I Quick Pallet Maker®.....	82
Figura Anexo 1 Solución estibación J Quick Pallet Maker®.....	83

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Resumen dimensiones Físicas.....	20
Tabla 3.3 Resumen del embalaje.	26
Tabla 4.1.1 Espacio ocupado por las referencias unitarizadas.	31
Tabla 4.1.2 Costos de ordenar.	31
Tabla 4.1.3 Costo de mantener en inventario por pallet.	32
Tabla 4.2.2 Coordenadas de los nodos y demandas.	39
Tabla 4.2.3 Tiempo inicial de servicio y final de cada uno de los nodos.	40
Tabla 4.2.4.1 Rutas para AGV.	45
Tabla anexo 3. Resumen de localización sistema Montacargas.	90
Tabla anexo 3. Localización estados multicapacidad Montacargas.	91
Tabla anexo 3. Estado de los Montacargas.	91
Tabla anexo 3. Resumen de localización sistema AGV.	92
Tabla anexo 3. Localización estados multicapacidad AGV.....	93
Tabla anexo 3. Estado de AGV.....	93

1 PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente el desarrollo de las organizaciones es mucho más acelerado que en épocas pasadas debido a la implementación de nuevas tecnologías en procesos que realizan las mismas, es un tópica de mucha importancia mejorar la productividad de las organizaciones ya que esto con lleva a mejorar la eficiencia del proceso productivo siendo más eficiente en la organización, factor que se percibe económicamente en la reducción de costos operativos o administrativos, mejorar los ingresos y así obtener una mayor rentabilidad, además de suponer para la empresa la capacidad de mantenerse en competencia en un mercado globalizado cada vez más competitivo. Presen

El presente trabajo de grado tiene como fin evaluar la viabilidad de la implementación de AGVS (Automated Guided Vehicle System), para almacenamiento y flujo de inventarios desde la flexibilidad que es requerida por el proceso productivo y evaluando su eficiencia, de tal manera que el lector pueda evaluar la viabilidad y problemas de implementar un sistema AGV en contra posición de las ventajas competitivas para su organización al decidir implementar tecnologías de punta, que con llevan una gran inversión en capital y talento humano.

Debido a que la implementación de AGVS tiene sus propias variables y restricciones para cada organización en específico, se pretende abarcar aspectos generales resueltos por metodologías matemáticas generalizadas para la implementación, evitando el uso de heurísticas y meta heurísticas para la planeación de aspectos técnicos como: Elección del modelo AGV, estimación del número de AGV requeridos, diseño de rutas, programación de las rutas, determinación de vehículos ociosos, determinación de punto muerto solo hablando de aspectos técnicos operativos.

También se observará como decisiones de tipo administrativo influyen en el desarrollo del AGVS enfatizando en su parte de flexibilidad y adaptación al entorno principalmente, este tipo de decisiones pueden ser : determinar el número de órdenes y reordenes para el almacén, políticas de operación SDS (smallest distance), LDL (longest distance), POR (preferred orden) o incluso RAND selección aleatoria][2], variando de uno a otro; evaluar la sensibilidad variando el número de vehículos en un determinado instante mediante simulación, también determinar cómo afecta algunas interacciones entre las citadas posteriormente.

Por consiguiente se evaluará la literatura relevante a metodologías de implementación de AGV que han sido teorizadas para generalizar la implementación pero esto no excluye el aporte de alguno que

otro caso de estudio que se considere relevante; para lograr un análisis desde el punto de vista de la flexibilidad del sistema, se presenta una secuencialidad de pasos que se desarrollarán apoyados en modelos matemáticos y simulación de computadora que serán evaluados estadísticamente y por métodos numéricos de medición de eficiencia dando un enfoque para ingeniería industrial.

Para desarrollar el modelo de implementación de un AGVS se realizará teóricamente la planeación de una bodega de almacenamiento que permita la aplicación de conceptos teóricos revisados luego realizar cambios en el proceso para implementar cambios o situaciones para evaluar la flexibilidad del proceso.

1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1.2.1 Objetivo general

Comparar la eficiencia entre un sistema de producción de flujo continuo antes y después de implementar un sistema de AGV modelado y simulado por software mediante la aplicación de técnicas modernas de ruteo para evaluar el grado de flexibilidad que permite.

1.2.2 Objetivos Específicos.

I. Definir y describir los diferentes tipos de sistemas de AGV que se pueden implementar en una empresa refiriendo sus elementos y principales características para conocer las tecnologías disponibles en este campo.

II. Plantear un proceso industrial para simular las tareas que pueden ser automatizadas y aplicar la implementación de un sistemas AGV y modelarlo mediante Promodel® para determinar las posibles variables y escalares a tener en cuenta para la ejecución de un sistema AGV.

III. Discriminar los pasos y decisiones que se deben suplir respecto a: diseño de trayectoria, gestión del sistema AGV, número de vehículos, introducir aspectos de programación, despachos, posicionamiento de vehículos y gestión de energía.

IV. Calcular mediante técnicas y procesos recientes el enrutamiento que maximice la eficiencia del sistema y minimice los recorridos para medir y concluir sobre la implementación del sistema AGV propuesto frente al modelo inicial de producción.

2 ANTECEDENTES

2.1 Generalidades.

Las empresas tienden a una evolución constante en sus procesos de producción para obtener mejores beneficios económicos en el desarrollo de su misión corporativa, el grado en que los procesos de la misma sean eficientes genera mayor beneficio, es por esta razón que desde el siglo XX la robotización de diferentes actividades productivas ha permitido a las empresas alcanzar mayores niveles de producción, eficiencia y calidad para competir en un mercado globalizado. [3][4][5]

Las según el Conpes 3866 el crecimiento económico de Colombia es uno de los mejores de latino américa con un 4,2% en el periodo de los últimos 15 años [6], pero del mismo documento se analiza que este crecimiento económico se debe a factores como la inversión extranjera, el aumento de la fuerza laboral y varios tratados de libre comercio, pero aún hay una gran brecha con la mejora de la productividad del país.

Los análisis más completos sobre el crecimiento de la economía también muestra que el consumo del mercado nacional aumento un 6.2% mientras que las exportaciones disminuyeron en un 1.4% [4], por lo tanto las políticas planteadas por el gobierno dirigidas a la mejora de la competitividad de la industria colombiana están dirigidas a la productividad y la competitividad en mercados internacionales.

El Conpes en su definición de la política económica en el numeral 5.3.2 propone la transformación y diversificación del sistema productivo colombiano hacia un sistema más sofisticado de producción aplicando ciencia, tecnología e innovación para desarrollar productos competitivos y mejorar la productividad.

En la actualidad los departamentos de investigación y desarrollo en conjunto con centros de investigación buscan formas de optimizar sus proceso productivos y es en este campo de la investigación de operaciones y las ciencias computacionales trabajan de la mano para implementar nuevas tecnologías [7], una de las nuevas tendencias en los procesos de producción industrial es el uso de AGV (Automated guided vehicles) que son vehículos programados mediante software para realizar una serie de tareas determinadas; a pesar del avance en el desarrollo de dispositivos electrónicos y macatrónicos aún hace falta un largo camino para la implementación de sistemas AGV debido a que requieren personal altamente calificado para su operación y los costos de instalación [8]. Aunque existen varios sistemas de AGV en el mercado, la mayor complejidad reitera en la logística

interna debido a que por el ruteo de estos vehículos en un almacén puede llegar a ser un problema de tipo NP-Hard [9] y requerir algoritmos complejos para su funcionamiento.

La tendencia actual de las organizaciones plantea la implementación de sistemas robóticos en la automatización industrial; según el instituto europeo research and markets en su publicación “Global Automated Guided Vehicle (AGV) Market 2017-2021: Increased R&D Spending and Miniaturization of AGV” el mercado para los AGV tendrá un crecimiento superior al 8% CAGR (Compound annual growth rate) en el lapso de 2017 a 2021, lo que es un corto plazo.

El presente trabajo pretende usar métodos computacionales que permitan simular la implementación de un sistema AGV en un proceso de producción mediante PROMODEL para evaluar la eficiencia del sistema AGV, debido al costo que implica un sistema AGV la mejor forma de evaluar la viabilidad para una empresa es la simulación y el análisis de sensibilidad mediante técnicas de simulación por computador antes de entrar en gastos y evaluar diferentes alternativas[9][10][11].

Las investigaciones realizadas en este campo [12] tienen una gran disciplina matemática y responden a las variables de problemas puntuales lo que deja el campo abierto para continuar el estudio en relación a la flexibilidad del sistema; la teoría y la simulación son formuladas de forma compleja lo que genera una apertura para la flexibilidad mínima.

Según varios estudios sobre AGV se puede decir que estarán presentes en la mayoría de los procesos productivos futuros, por consiguiente se pretende dar un análisis desde el punto de vista de empresas colombianas sobre la complejidad de programación y enrutamiento para que un sistema AGV sea pensado con un determinado grado de flexibilidad antes de pasar a su implementación y puesta en marcha; además de comparar diferentes alternativas ofrecidas por los AGV [11].

2.2 Trayectoria.

Uno de los aspectos técnicos más importantes es el diseño de la trayectoria de los AGV, este factor requiere de estudios avanzados en investigación de operaciones y logística para solucionar el problema del agente viajero dentro del sistema de producción, por lo tanto el algoritmo de ruta y su optimización debe ser realizado por personal altamente calificado ya que el ruteo puede convertirse fácilmente en un problema de NP-hard y su solución requerirá algoritmos complejos.[13]

Para el debido desarrollo e implementación del sistema AGV se debe considerar el tipo de proceso industrial o de almacenaje que se quiere automatizar, por tal motivo hay varias tipologías de sistemas AGV que pueden implementarse según las necesidades de la empresa y de los procesos industriales

dependiendo del costo, el tiempo e incluso el número de viajes[14], dentro de estos se encuentran trayectorias de guía convencional que pueden ser unidireccionales, bidireccionales o de bucle, tándem o de flujo segmentado, cada uno de estos sistemas posee sus ventajas y también sus debilidades, pero estas se acentúan en mayor o en menor medida dependiendo de la organización y los objetivos planteados por la dirección de la empresa.

Estos son algunos de los sistemas de AGV que pueden implementarse y la decisión de cuál es vital para el proceso evolutivo de la organización y debe ser bien pensado para que sea una solución óptima. [3][15] [16] [17] [18]

2.3 Gerencia de Sistemas de Automated guided vehicles.

En varias organizaciones se ha visto la mejora en su proceso productivo como es el caso de Amazon, empresa dedicada al e-commerce que afirma haber reducido sus costes en 20% después de implementar AGV en su proceso operativo. [19] Otra empresa de talla mundial como lo es Toyota ha invertido 50 millones de dólares en el desarrollo de nuevos sistemas robóticos de vehículos autónomos con el fin de mantenerse a la vanguardia en el sector automotriz.

El informe revela también que un incremento del 38.8% de las ventas en todo el mundo de AGV para diferentes industrias gracias a la aplicación de inteligencia artificial (IA), industria 4.0 y técnicas de producción altamente automatizadas. Dentro del incremento del uso de AGV, China se perfila como el país donde la tasa de crecimiento de estos sistemas tendrá un promedio anual cercano 43% durante los próximos 5 años debido a trabajar con procesos de producción orientados hacia las grandes cantidades de volúmenes de mercancía que ofrecen a nivel mundial. [20]

Los sistemas de producción modernos tienden a un mayor grado de automatización y la diferencia entre la teoría de sistemas AGV y la puesta en práctica cada vez es menor pero se requiere de estudios que permitan flexibilidad y agilidad para este tipo de sistemas.

Con el avance en aplicativos, desarrollo de software y sistemas expertos la administración del sistema de AGV tiene también varias opciones para esta actividad como lo son la programación de vehículos que puede ser en línea, a través de internet, programación sin conexión y cualquiera que sea la opción a ejecutar se debe modelar un algoritmo matemático para la administración del sistema, el cual puede llegar a ser tan complejo como el hardware utilizado en los vehículos AGV. [2][3][10][4]

Dentro de las decisiones referentes a la gerencia existen procesos que pueden ser descentralizados o lo opuesto, totalmente centralizados para la administración efectiva de los sistemas de AVG, por tal motivo el control se vuelve otra variable en el problema de la implementación permitiendo que el sistema opere de una forma más eficiente y totalmente ajustado a las necesidades para las que se estableció y se diseñó en un principio. [21] [10]

Dentro de este factor es muy importante determinar y ponderar el peso de cada variable para la toma de la decisión de que sistema de AGV utilizar, estas variables son factores como: el número de viajes, la distancia, ventanas de tiempo, número de servicios, combustible y cantidad de carga de las baterías de los AGV, colas y cuellos de botella, todas estas variables deben tener en cuenta y modelarlas matemáticamente para lograr optimizar el sistema AGV. [13]

En la literatura se pueden encontrar algoritmos y procedimientos heurísticos para controlar las variables antes mencionadas y más; pueden orientar estos métodos de forma multi-criterio, por atributos, por orden jerárquico o periodos de despacho, esto depende de cómo se implementa el sistema y de la importancia para cada uno de los procesos, por lo tanto con este gran número de decisiones que se deben tomar solo en cuanto a la administración del sistema a esto se debe sumar las decisiones de tipo técnico y operativo para lograr un sistema AGV óptimo en el desarrollo del proceso para el que se diseñó; se pretende establecer un abanico de AGV que pueden aplicarse a un determinado procedimiento para automatizar. [22][8].

2.4 Tipos de AGV.

Los AGV son vehículos de guiado automático o automatizado que se emplean en la industria para la automatización de operaciones, en la actualidad son muy pocas las empresas que usan sistemas de AGV debido al elevado costo de implementación y el grado tan elevado de capacitación de personal de que se requiere; pero con la investigación que se realiza sobre estos sistemas hoy en día y la demanda creciente de estos AGV son causas de una masificación de este tipo de sistemas en largo plazo, y no solo por los avances del hardware sino también en el desarrollo de modelos matemáticos complejos que permitan su eficiente operación. [23][24][21]

Los AGV pueden dividirse en muchas categorías debido a la gran variedad de funciones que se pueden automatizar, dentro de estos se pueden encontrar: AGV de carga (puede ser carga única o múltiple), los más usados son para pallets (montacargas); pero se pueden encontrar AGV para

operaciones como complejas SGV (Self-Guided Vehicles) que son los más avanzados y costosos de los sistemas AGV, debido a la gran variedad de operaciones que pueden realizar los tipos de AGV son muy variados por eso se pueden clasificar en tres categorías: Trenes sin conductor, traspalés de guiado automatizado y los portadores de unidad de carga. [24][25]

Estos AGV también pueden ser SGV, los cuales requieren una algoritmia avanzada por su integración y sinergia en el sistema de producción de la planta, por tal motivo uno de los desafíos que presentan es la programación para dar solución a problemas de flexibilidad en el proceso productivo. [18]

Así mismo como varía la complejidad del AGV también varía el control, que puede ser por guiados por cables enterrados en suelo, líneas pintadas en el suelo, o señales digitales para los SGV, por tal motivo los costos y la eficiencia deben ser funciones objetivos en el desarrollo del sistema AGV. [2][26]

2.5 Enrutamiento Del Vehículo.

Los cálculos y algoritmos para enrutar los vehículos requieren de un significativo grado de complejidad, la eficiencia del sistema de AGV depende en mayor medida de la correcta modelación del enrutamiento que de la capacidad de hardware adquirido, muchas de las dificultades presentadas en la puesta en marcha de un sistema de AGV son con respecto a la programación de las rutas que a la parte técnica o de funcionamiento del sistema, por eso es que el modelado matemático requiere un especial tratamiento y para esto se requiere de ingenieros especializados en investigación de operaciones. [26][27][28][29]

Dentro de la modelación se debe tener en cuenta que no es viable en el momento de enrutar los AGV mantenerlos trabajando en todo momento, dentro del posicionamiento que los AGV tienen es imperativo saber cómo manejar los tiempos ociosos que se presentarán, por tal motivo se debe prever zonas de parqueo y contemplar la recarga de las baterías que usan los AGV [7], ya que no tener este tiempo en cuenta significará cuellos de botella en el correcto funcionamiento del sistema de AGV y generara ineficiencias del sistema.[30][19]

Dentro de la planeación del sistema adicional a lo que se ha tratado sobre el posicionamiento y ruteo de los vehículos también se presenta el desafío de la flexibilidad para que trabaje cada vehículo conforme a nuevos requerimientos de servicio de cada uno de los AGV, por eso antes de una implementación es importante una simulación en la que se pueda hacer análisis de sensibilidad de las

operaciones planeadas y si es el caso replantear el algoritmo utilizado para el enrutamiento de servicios. [5] [16]

Dentro del sistema se debe postular las situaciones de punto muerto que se presente en la zona, es decir esos puntos críticos que generen demoras o incluso atascamiento del flujo que puedan llegar incluso a la detención total del sistema que se ha visto en la práctica.[15]

Varios autores contemplan empíricamente algunas recomendaciones para el enrutamiento de varios AGV, como lo es que permanezca el vehículo ubicado en el último punto de servicio que atendió hasta que pueda ser reasignado de nuevo; otra alternativa a tener en cuenta es la creación de circuitos para grupos de AGV, similar a la heurística utilizada para el problema de agente viajero, esto permite que el sistema use en forma separada los AGV, por tal razón el problema de punto muerto solo afectaría a una parte del sistema en lugar de todo. [25][24][2]

Por esto es altamente recomendable ver modelos que eviten que los AGV se bloqueen unos con otros y por tal motivo es fundamental programar las intersecciones de los espacios utilizados en las rutas por los vehículos, esto no requiere inversiones gigantescas, sino la planificación matemática correcta para que el sistema funcione correctamente. Determinar la ponderación de cada variable y jerarquizar el procedimiento para tomar decisiones sobre la implementación de un sistema AGV, aunque hay investigadores trabajando en el tema es importante que cada empresa pueda discernir que variables son las de vital importancia para su funcionamiento y así lograr que los AGV utilizados optimicen sus procesos en vez de ser solo una costosa inversión que no generó el beneficio que se esperaba. [11]

2.6 Simulación.

Los procesos de implementación de AGV son costosos y por lo tanto para una empresa son una inversión considerablemente importante donde no se pueden dejar problemas sin observar y por esta razón se puede hacer una simulación para visualizar el comportamiento de los AGV una vez estén instalados y funcionando sin incurrir en costos y gastos que pueden percibirse haciendo una simulación. En la actualidad la técnica de simulación ha cobrado mucha fuerza dentro de proyectos de ingeniería y de otras áreas, debido a las múltiples ventajas que ofrece. Para simular lo que puede desarrollarse dentro de la empresa existen software como Promodel® y ARENA® que son muy usados en procesos de simulación. [31][3][4]

Debido al componente teórico del presente trabajo la simulación de un proceso productivo a través de Promodel® facilitaría el análisis de la puesta en marcha de un sistema AGV sin tener que incurrir en los costos de una implementación real permitiendo la obtención de los datos necesarios y realizando el análisis de sensibilidad al mismo sistema con ventajas de control de las variables vida del computador. [31]

El uso de Promodel® constituye una herramienta que está totalmente integrada mediante un entorno que permite la creación de modelos de forma rápida y sencilla, permite ver el grado en que se optimiza una operación o conjunto de estas mismas, es una herramienta de gran utilidad que permite ver el desarrollo del sistema AGV planteado incluso en tres dimensiones lo que da versatilidad. [31]

2.7 Identificación del problema.

Las empresas en pleno siglo XXI continúan con la automatización de los procesos industriales que realizan dentro de su producción y una nueva tecnología que ha empezado a tomar fuerza es el uso de AGV, a pesar que desde mediados del siglo pasado se ha introducido el concepto de Automated guided vehicles, no se ha masificado su uso práctico y flexible hasta el día de hoy. [21]

En la actualidad muchas industrias y estudiosos del tema consideran que no se masificara el uso de sistemas AGV en el corto y mediano plazo debido a la poca flexibilidad que tienen estos sistemas para adaptarse a cambios que ocurren en un instante de tiempo, por tal motivo las investigaciones actuales sobre AGV involucran Machine-Learning, además la dificultad de implementar este tipo de sistemas AGV no radica sobre limitaciones de hardware o de software sino sobre el algoritmo logístico para que operen eficientemente y la flexibilidad para ajustarse a cambios en sus itinerarios y actividades. [10]

El uso de sistemas AGV es un campo con muchos tópicos por investigar debido a que la investigación de operaciones para cada sistema de AGV se puede decir que es única y tiene una complejidad elevada, que requiere personal altamente calificado para plantearla y que cumpla con lo requerido por la empresa y su proceso productivo. Una limitante puede considerarse para los sistemas AGV es el ritmo al que trabaja el ser humano y por consiguiente el modelo de producción con AGV debe establecerse para integrar los procesos hechos por seres humanos. [5]

El uso de AGV por parte de las diferentes compañías radica en la capacidad para programarse tareas atípicas como devolver una carga o la urgencia con la que se necesita una de estas, son requerimientos que deben introducirse en la programación y que en la actualidad son sencillas de dar

a un operario humano, puede decirse que falta muchos avances en el campo de tal manera que la implementación de sistemas AGV pueda ser eficiente y más económica. [23][17]

También cabe mencionar que uno de los principales problemas para implementar un sistema AGV en una planta industrial actual radica en que el diseño de planta no fue desarrollado con fines bien establecidos de logística interna y por consiguiente este es un reto ya que las plantas más modernas han sido diseñadas para optimizar recursos y ser más eficientes permitiendo en el futuro el uso de AGV, por consiguiente la gran mayoría de plantas en Colombia no son las apropiadas para los AGV y puede decirse que falta mucho tiempo para la masificación de sistemas AGV lo que deja muchos temas de investigación para la logística interna y la ingeniería industrial, la mayor parte de la literatura concerniente a la implementación de AGV se basa en un problema puntual para un proceso industrial o para una planta en específico, lo cual no permite generalizar un algoritmo o una teoría. Por consiguiente la implementación de un sistema AGV puede llegar a convertirse en un problema de NP-Hard. [16][17]

Basados en los estudios recientes sobre sistemas AVG, se indaga sobre ¿cómo determinar el grado en que un sistema para AGV permiten flexibilidad y solución de demoras o adelantos de los vehículos dentro del proceso de almacenamiento debido a la aleatoriedad de los parámetros y de las posibles interrupciones en la operación?

3 PARAMÉTROS PROCESO DE ALMACENAMIENTO.

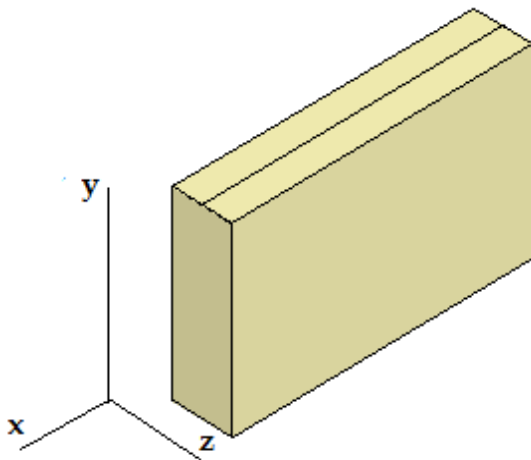
Para el desarrollo del presente trabajo se planteará un proceso de almacenamiento basado en información teórica respecto a literatura sobre almacenes e inventarios. Para este fin se especificarán características necesarias en el proceso de almacenamiento y sus medidas serán supuestas con base en la literatura previamente consultada y estudiada. [32][33]

- Se describirá un número de productos que se recibirán, se almacenarán y posteriormente se despacharán.
- Se establecerá el espacio de almacenamiento. (Bodega).
- Se calcularán las cantidades a almacenar y la forma de almacenar.
- Se cuantificará la superficie y el volumen utilizados para el almacenamiento.
- Se determinará la política de inventario de cada producto.

Con el fin de evaluar los métodos propuestos para asignar AGV en los procesos de almacenamiento manejo de inventarios se supondrán de forma teórica las variables más relevantes para la puesta en marcha de un sistema de AGV.

3.1 Dimensiones productos almacenados.

Inicialmente se describirán las características de 10 referencias de productos (se eligió esta cifra para facilitar cálculos) que serán embalados en cajas de cartón en forma de prisma rectangular permitiendo generalizar el cálculo del área y el volumen para las referencias de producto y permitiendo la unitarización mediante el uso de estibas.



x: largo

y: alto

z: ancho

$$\text{Area} = \text{largo} \times \text{ancho}$$

$$\text{Area} = x \times z$$

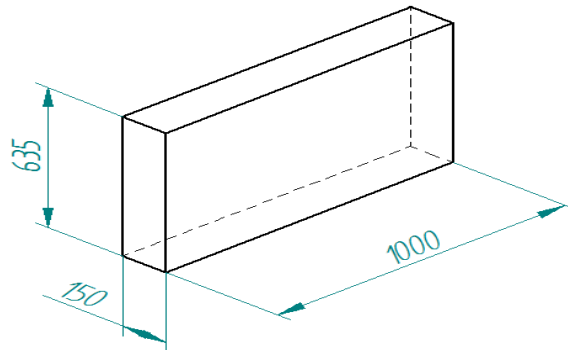
$$\text{Volumen} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{altura}$$

$$\text{Volumen} = x \times z \times y$$

Figura 3.1. Área y Volumen Embalajes.

Con el fin de planificar los requerimientos de almacenamiento a continuación se presentan las dimensiones y el peso de las 10 referencias de producto con las que se trabajará, las medidas de las acotaciones en los gráficos se encuentran en milímetros:

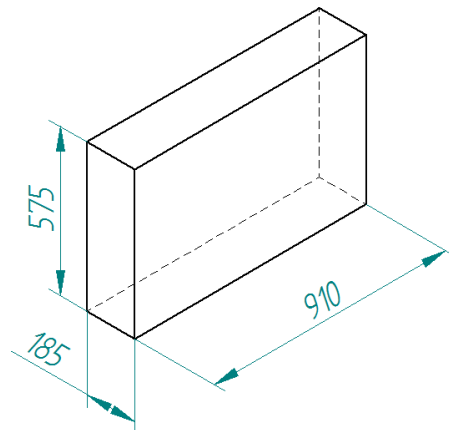
REFERENCIA A.



Área: $0.15m^2$ Volumen: $0.095250m^3$ Peso: 4.57Kg

Figura 3.1.1 Diagrama Referencia A

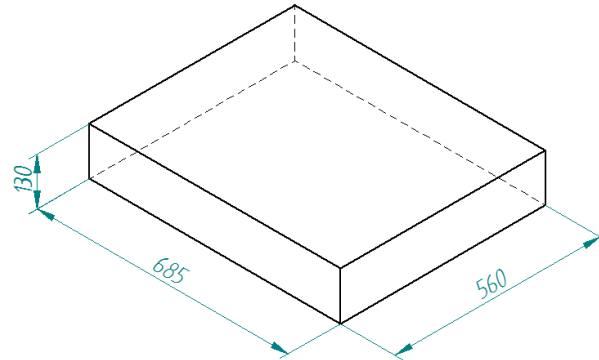
REFERENCIA B.



Área: $0.16835m^2$ Volumen: $0.096801m^3$ Peso: 4.65Kg.

Figura 3.1.2 Diagrama Referencia B

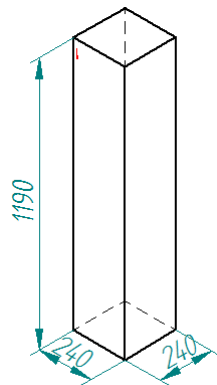
REFERENCIA C.



Área: $0.38360m^2$ Volumen: $0.049868m^3$ Peso: 2.39 Kg

Figura 3.1.3 Diagrama Referencia C

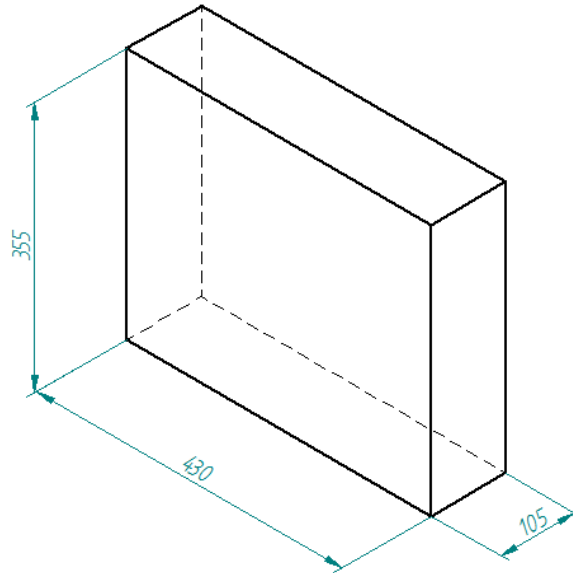
REFERENCIA D.



Área: $0.0576m^2$ Volumen: $0.06854m^3$ Peso: 11.92 Kg.

Figura 3.1.4 Diagrama Referencia D

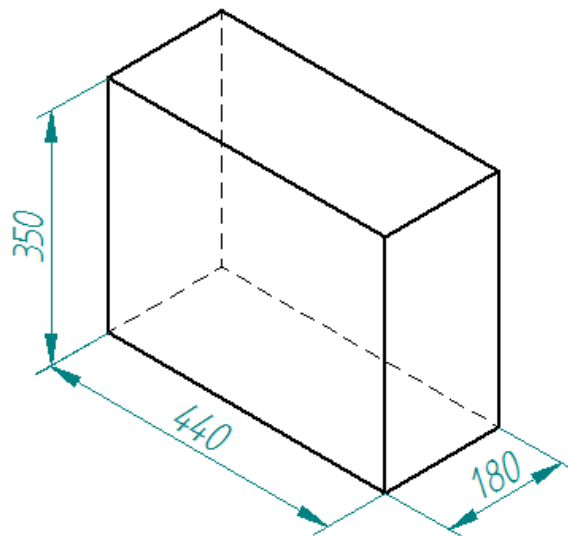
REFERENCIA E.



Área: $0.04515m^2$ Volumen: $0.016028m^3$ Peso: 0.77 Kg.

Figura 3.1.5 Diagrama Referencia E

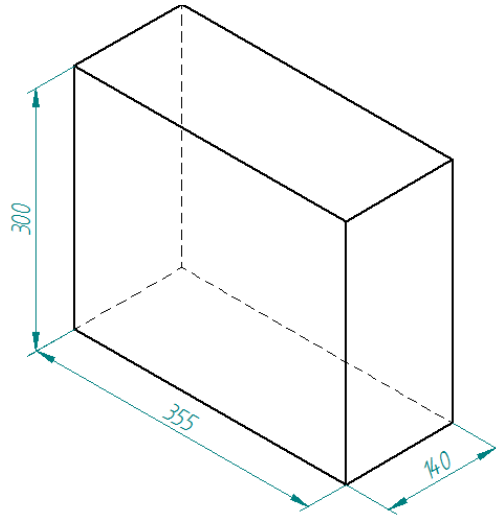
REFERENCIA F.



Área: $0.07920m^2$ Volumen: $0.027720m^3$ Peso: 1.33 Kg.

Figura 3.1.6 Diagrama Referencia F

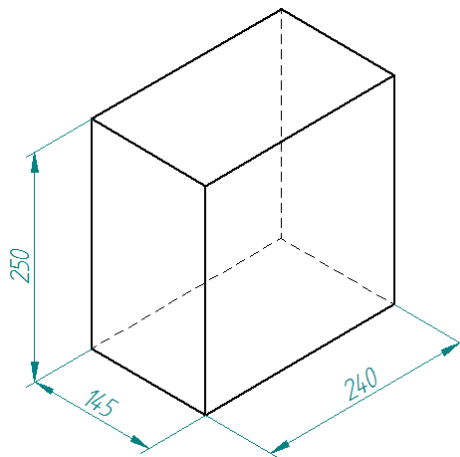
REFERENCIA G.



Área: $0.04970m^2$ Volumen: $0.014910m^3$ Peso: 0.72 Kg.

Figura 3.1.7 Diagrama Referencia G

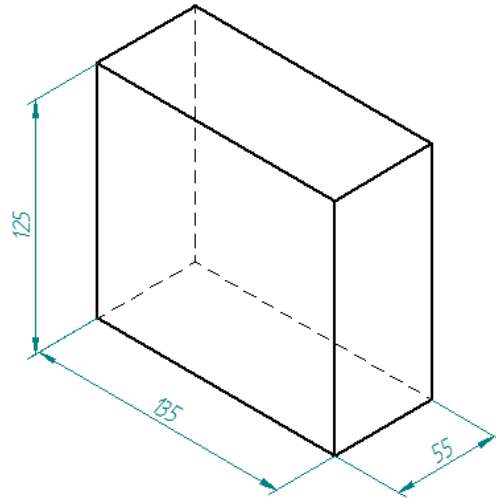
REFERENCIA H.



Área: $0.03480m^2$ Volumen: $0.008700m^3$ Peso: 0.42 Kg.

Figura 3.1.8 Diagrama Referencia H

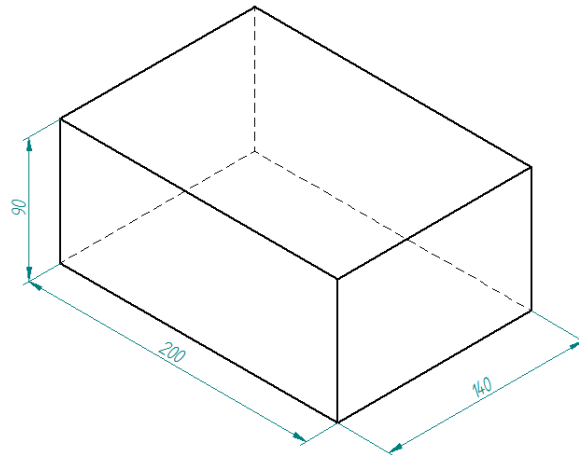
REFERENCIA I.



Área: $0.00743m^2$ Volumen: $0.000928m^3$ Peso: 0.29 Kg.

Figura 3.1.9 Diagrama Referencia I

REFERENCIA J.



Área: $0.02800m^2$ Volumen: $0.002520m^3$ Peso: 0.12 Kg.

Figura 3.1.10 Diagrama Referencia J

La siguiente tabla resume las dimensiones y el peso de cada una de las referencias de producto por unidad.

PRODUCTO	Dimensiones en mm			Área Cara inferior m^2	Volumen m^3	Peso Kg
	X	Y	Z			
A	1000	635	150	0.15	0.09525	4.572
B	910	575	185	0.16835	0.09680125	4.64646
C	685	130	560	0.3836	0.049868	2.393664
D	240	1190	240	0.0576	0.068544	11.9232
E	430	355	105	0.04515	0.01602825	0.769356
F	440	350	180	0.0792	0.02772	1.33056
G	355	300	140	0.0497	0.01491	0.71568
H	240	250	145	0.0348	0.0087	0.4176
I	135	125	55	0.007425	0.00092813	0.04455
J	200	90	140	0.028	0.00252	0.12096

Tabla 3.1 Resumen dimensiones Físicas

3.2 Unitarización de las cargas

Para facilitar la manipulación de volúmenes considerables de los productos, su manejo en almacén será mediante la unitarización de la carga mediante estibación usando estibas CHEP 1200x1000.

Vistas principales pallet CHEP 1200x1000.

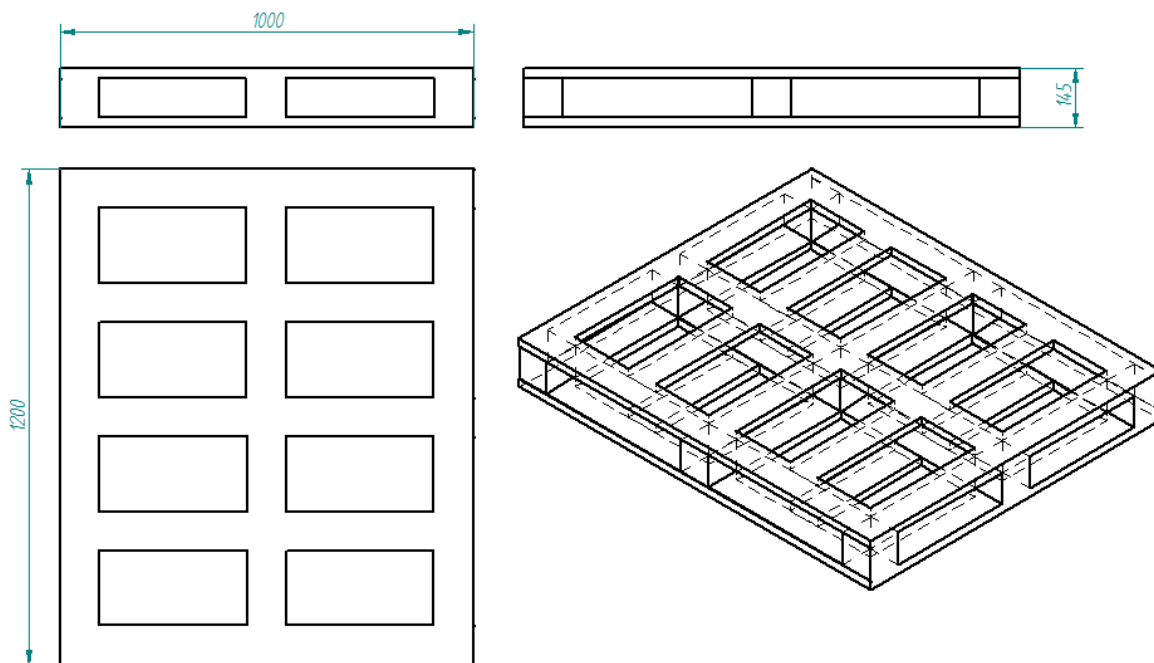
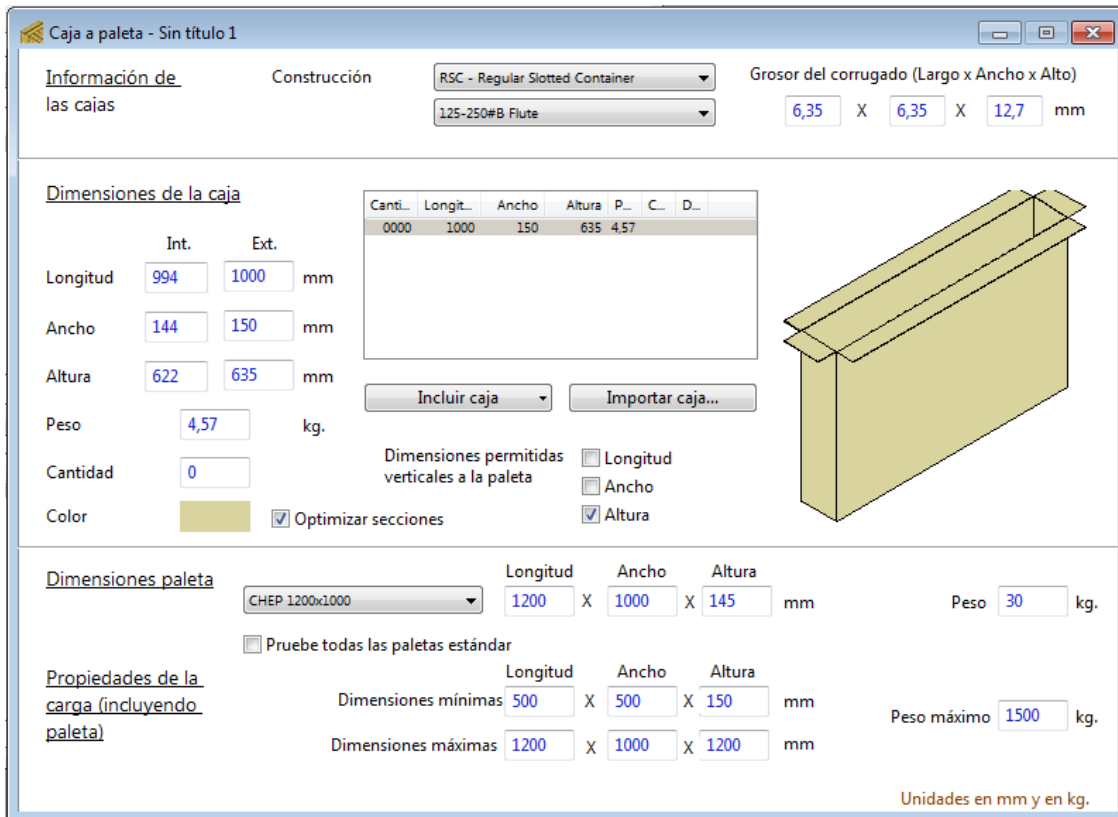


Figura 3.2.1 Pallet CHP 1200x1000. (Unidades en milímetros)

Para optimizar el factor de estiba de las cargas unitarizadas de las 10 referencias de productos en las estibas CHEP 1200x1000 se utilizó el Software Quick Pallet Maker® versión 4.8.4. en la función “empaques primario a paleta” se especificaron las dimensiones de los productos y su peso para el palletizado. La siguiente ilustración presenta la introducción de los datos anteriormente citados al software para el producto de referencia A:



Caja a paleta - Sin título 1

Información de las cajas Construcción: RSC - Regular Slotted Container
 Grosor del corrugado (Largo x Ancho x Alto): 6,35 X 6,35 X 12,7 mm

Dimensiones de la caja

	Int.	Ext.	
Longitud	994	1000	mm
Ancho	144	150	mm
Altura	622	635	mm
Peso	4,57		kg.
Cantidad	0		
Color			

Tabla de datos de la caja:

Canti.	Longit.	Ancho	Altura	P.	C.	D.
0000	1000	150	635	4	5	7

Dimensiones permitidas verticales a la paleta: Longitud, Ancho, Altura

Dimensiones paleta: CHEP 1200x1000 Longitud: 1200 X Ancho: 1000 X Altura: 145 mm Peso: 30 kg.

Pruebe todas las paletas estándar

Propiedades de la carga (incluyendo paleta)

	Longitud	Ancho	Altura	
Dimensiones mínimas	500	500	150	mm
Dimensiones máximas	1200	1000	1200	mm

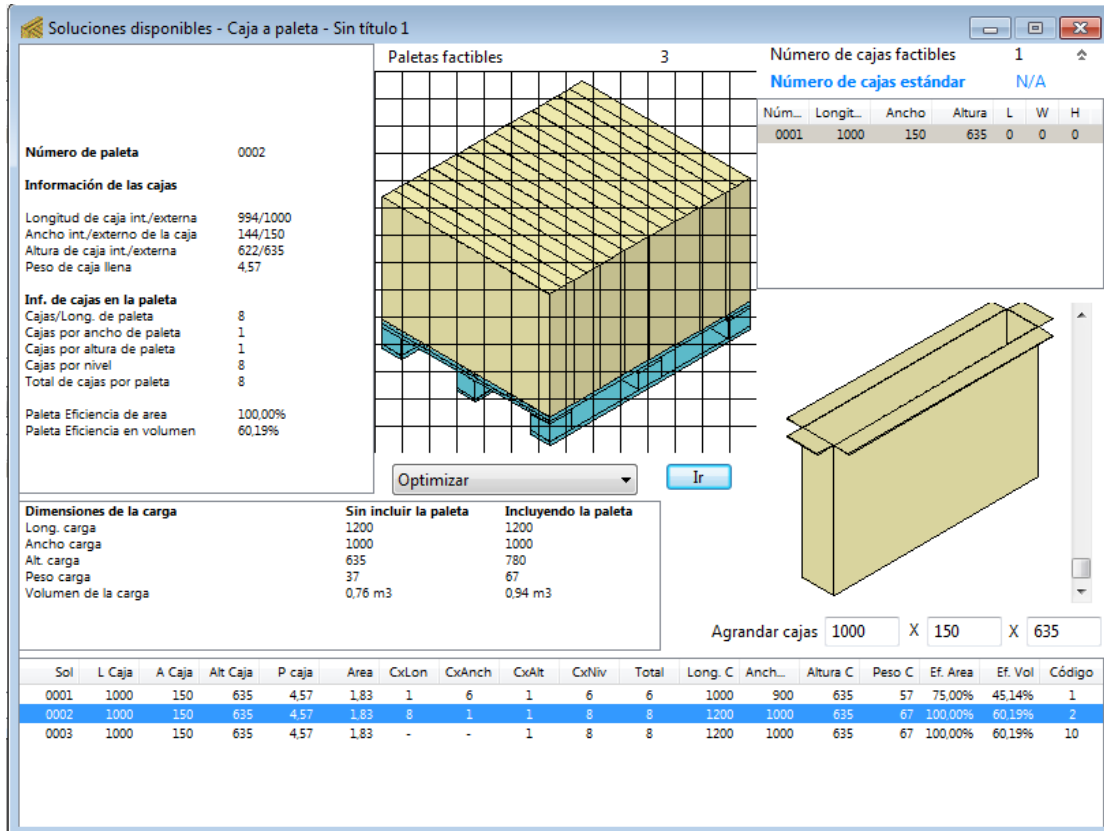
Peso máximo: 1500 kg.

Unidades en mm y en kg.

Figura 3.2.3 Ventana de introducción de datos Caja a Paleta Software Quick Pallet Maker®

Después de editar los datos se procede a optimizar el espacio para almacenamiento en la pallet CHEP 1200x1000.

Solución Caja a Paleta Software Quick Pallet Maker®



Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 1

Paletas factibles: 3

Número de cajas factibles: 1

Número de cajas estándar: N/A

Núm...	Longit...	Ancho	Altura	L	W	H
0001	1000	150	635	0	0	0

Número de paleta: 0002

Información de las cajas:

Longitud de caja int./externa: 994/1000
 Ancho int./externo de la caja: 144/150
 Altura de caja int./externa: 622/635
 Peso de caja llena: 4.57

Inf. de cajas en la paleta:

Cajas/Long. de paleta: 8
 Cajas por ancho de paleta: 1
 Cajas por altura de paleta: 1
 Cajas por nivel: 8
 Total de cajas por paleta: 8

Paleta Eficiencia de área: 100.00%
 Paleta Eficiencia en volumen: 60.19%

Optimizar [v] Ir [v]

Dimensiones de la carga:

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1200	1200
Ancho carga	1000	1000
Alt. carga	635	780
Peso carga	37	67
Volumen de la carga	0,76 m3	0,94 m3

Agrandar cajas: 1000 X 150 X 635

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Anch...	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	1000	150	635	4.57	1.83	1	6	1	6	6	1000	900	635	57	75.00%	45.14%	1
0002	1000	150	635	4.57	1.83	8	1	1	8	8	1200	1000	635	67	100.00%	60.19%	2
0003	1000	150	635	4.57	1.83	-	-	1	8	8	1200	1000	635	67	100.00%	60.19%	10

Figura 3.2.4 Solución estibación Quick Pallet Maker®

El programa genera varias opciones factibles y por consiguiente se selecciona la que permita el mayor número de cajas por estiba, generando la mayor eficiencia en el uso de área y de volumen.

Posibles acomodaciones por estiba del producto de referencia A.

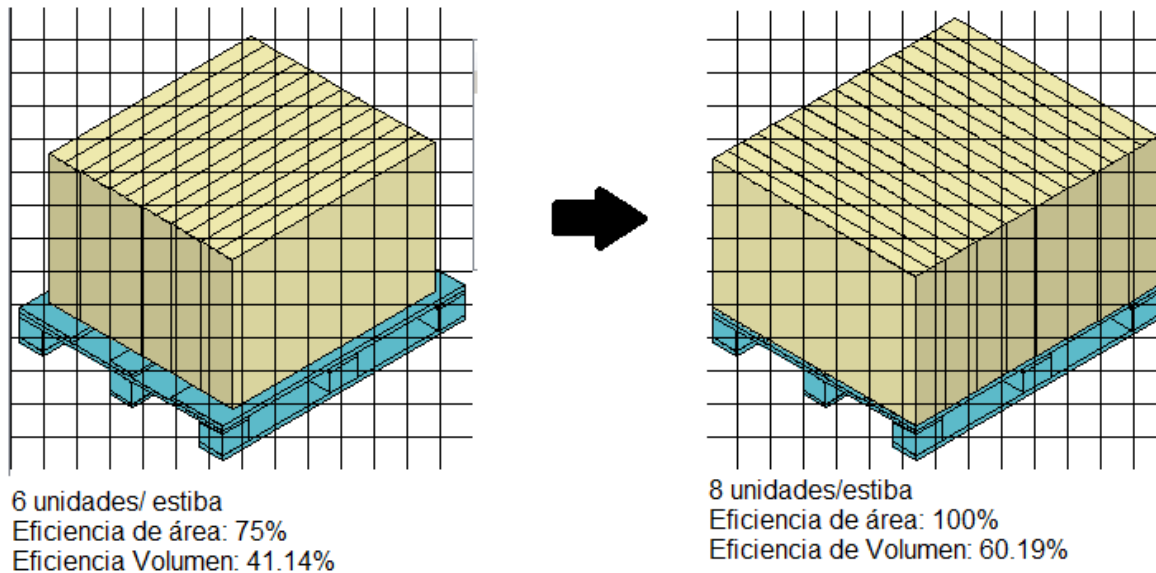


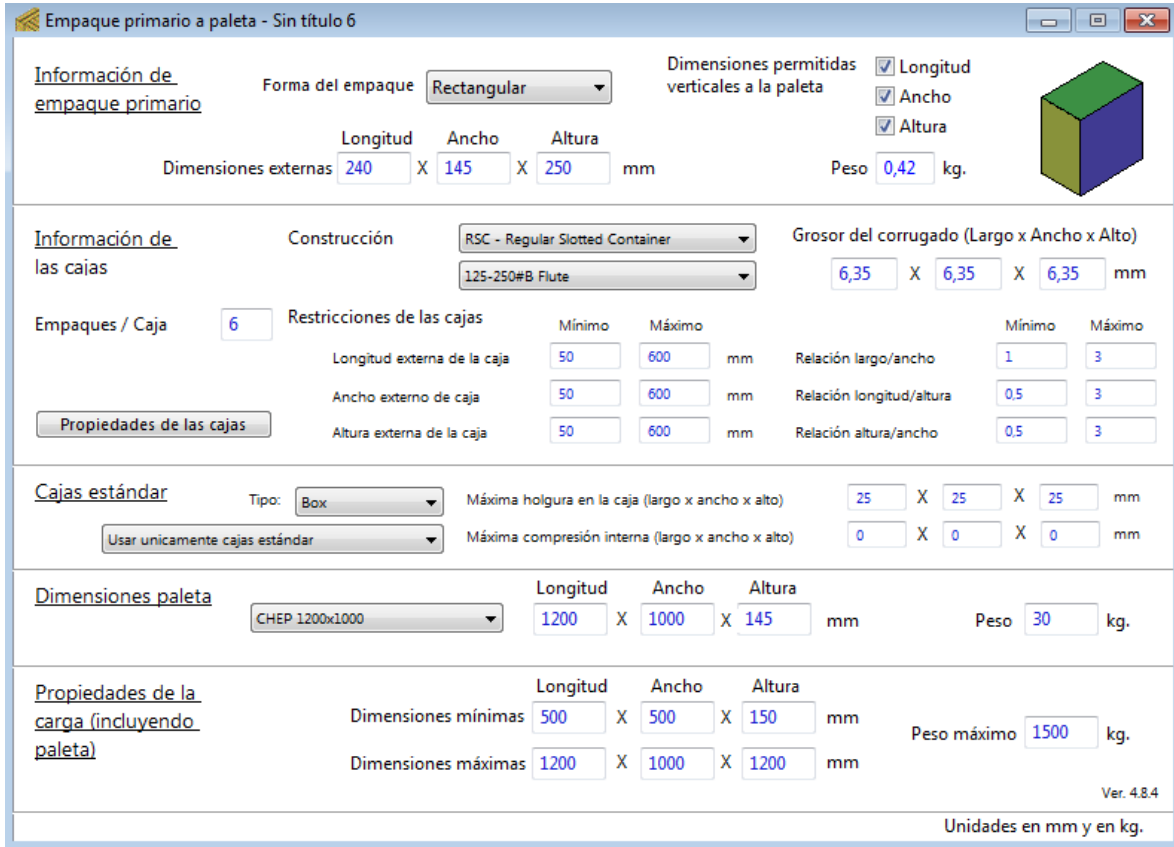
Figura 3.2.5 Soluciones posibles de estibación Quick Pallet Maker®

Como resultado se obtiene que en una pallet CHEP 1200x1000 se pueden almacenar 8 unidades de referencia A, con una eficiencia de área de 100% y una eficiencia de 60,19% calculado mediante el software, toda la información necesaria es presentada en la ilustración anterior. Para el cálculo de unitarización por estiba se usa de la misma forma para los productos B,C,D,E,F,G (ver anexo 1), para los productos de referencia H, I, J por sus dimensiones se debe utilizar un embalaje secundario para su estibación; por ese motivo se utilizará un proceso adicional en el software Quick Pallet Maker® para diseñar el embalaje secundario y posterior unitarización en estiba.[34]

3.3 Unitarización con doble embalaje referencia H

Para esta referencia por sus dimensiones se utilizará un empaque de embalaje secundario que contendrá una determinada cantidad de producto.

Para esto se utilizará en Software Quick Pallet Maker® versión 4.8.4. la opción para cálculo de cajas como embalaje secundario.



Empaque primario a paleta - Sin título 6

Información de empaque primario Forma del empaque: Rectangular

Dimensiones permitidas verticales a la paleta: Longitud, Ancho, Altura

Dimensiones externas: Longitud 240 X Ancho 145 X Altura 250 mm. Peso: 0,42 kg.

Información de las cajas Construcción: RSC - Regular Slotted Container, 125-250#B Flute. Grosor del corrugado (Largo x Ancho x Alto): 6,35 X 6,35 X 6,35 mm.

Empaques / Caja: 6. Restricciones de las cajas:

	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Longitud externa de la caja	50	600	mm	Relación largo/ancho	1 / 3
Ancho externo de la caja	50	600	mm	Relación longitud/altura	0.5 / 3
Altura externa de la caja	50	600	mm	Relación altura/ancho	0.5 / 3

Cajas estándar Tipo: Box. Máxima holgura en la caja (largo x ancho x alto): 25 X 25 X 25 mm. Usar únicamente cajas estándar. Máxima compresión interna (largo x ancho x alto): 0 X 0 X 0 mm.

Dimensiones paleta CHEP 1200x1000. Longitud 1200 X Ancho 1000 X Altura 145 mm. Peso: 30 kg.

Propiedades de la carga (incluyendo paleta)

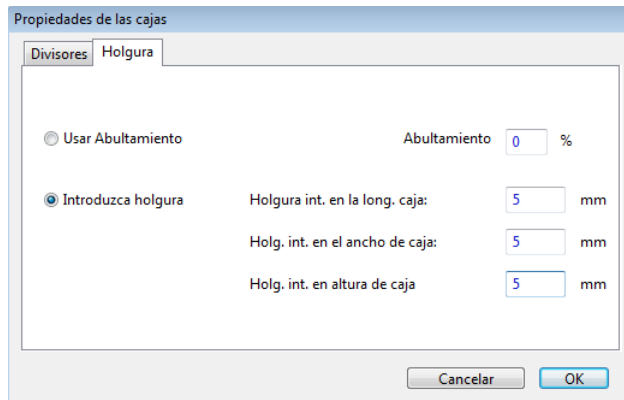
	Longitud	Ancho	Altura	
Dimensiones mínimas	500	500	150	mm
Dimensiones máximas	1200	1000	1200	mm

Peso máximo: 1500 kg.

Ver. 4.8.4
Unidades en mm y en kg.

Figura 3.3.1 Embalaje secundario Quick Pallet Maker®

Antes de realizar el cálculo se determina una holgura de 5mm para cada una de las tres dimensiones dentro de la caja que servirá como embalaje secundario.



Propiedades de las cajas

Divisores | **Holgura**

Usar Abultamiento Abultamiento: 0 %

Introduzca holgura

Holgura int. en la long. caja: 5 mm

Holg. int. en el ancho de cajas: 5 mm

Holg. int. en altura de caja: 5 mm

Cancelar OK

Figura 3.3.2 Holgura interna Quick Pallet Maker®

Una vez ejecutado el comando se obtiene que se tendrán 6 unidades por caja.
Llenado de una caja. 6 unidades de la referencia H por caja.

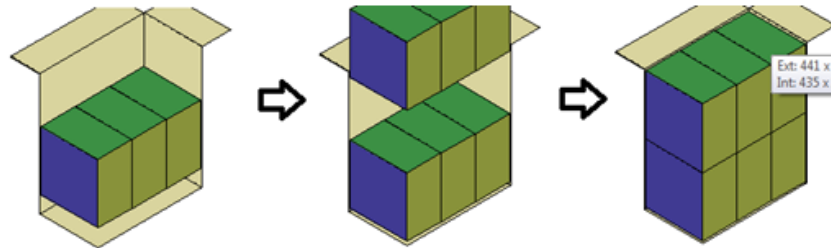


Figura 3.3.3 Cantidad de cajas por embalaje secundario.

La estibación de esta referencia se muestra en la siguiente ventana.

Soluciones disponibles - Empaque primario a paleta - Sin título 11

Información de empaque primario
 Empaque Primario Longitud 240
 Empaque Primario Ancho 145
 Empaque Primario Altura 250
 Empaque Primario Peso 0.42

Número de paleta
0012

Información de las cajas
 Empaques / Caja 6
 Longitud de caja int./externa 435/441
 Ancho int./externo de la caja 240/246
 Altura de caja int./externa 500/513
 Peso de caja llena 3.17

Inf. de cajas en la paleta
 Cajas/Long. de paleta
 Cajas por ancho de paleta 2
 Cajas por altura de paleta 10
 Cajas por nivel 20
 Total de cajas por paleta 20
 Paleta Eficiencia de area 92.71%
 Paleta Eficiencia en volumen 90.11%

Paletas factibles 18

Número de cajas factibles 6
Número de cajas estándar N/A

Núm...	Longit...	Ancho	Altura	L	W	H
0001	506	441	253	2	3	1
0002	486	441	263	2	3	1
0003	441	256	493	3	1	2
0004	441	246	513	3	1	2
0005	506	246	448	2	1	3
0006	486	256	448	2	1	3

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1129	1200
Ancho carga	985	1000
Alt. carga	1025	1170
Peso carga	63	93
Volumen de la carga	1.11 m3	1.40 m3

Total empaques primarios por paleta 120

Agrandar cajas 441 X 246 X 513

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0011	441	246	513	3.17	1.06	4	2	2	8	16	985	883	1025	81	72.48%	70.45%	2
0012	441	246	513	3.17	1.06	-	-	2	10	20	1129	985	1025	93	92.71%	90.11%	10
0013	506	246	448	3.17	1.06	2	4	2	8	16	1013	985	895	81	83.16%	70.58%	1
0014	506	246	448	3.17	1.06	4	1	2	4	8	985	506	895	55	41.58%	35.29%	2
0015	506	246	448	3.17	1.06	-	-	2	8	16	1013	985	895	81	83.16%	70.58%	10

Figura 3.3.4 Doble embalaje referencia H.

La referencia I y J se calcularon de la misma forma, para ver las ventanas con la respectiva solución consultar el anexo 1.

En la siguiente tabla se presenta la información referente a la optimización de la estibación, eficiencia de área y de volumen por carga.

Referencia	Embalaje secundario	Unidades/Caja	Empaques/Paleta	Unidades/Paleta	Altura Carga mm	Peso carga Kg	Volumen Carga m ³	Efic. Área %	Efic. Vol. %
A	No	N/A	8	8	635	37	0.76	100	60.19
B	No	N/A	6	6	575	28	0.58	84.41	46
C	No	N/A	16	16	1040	38	0.8	63.93	63.02
D	No	N/A	16	16	960	182	1.1	95.2	86.63
E	No	N/A	48	48	710	37	0.77	92.53	62.27
F	No	N/A	42	42	1050	56	1.16	94.73	94.28
G	No	N/A	69	69	900	50	1.03	98.59	84.1
H	Si	6	20	120	1025	63	1.11	92.71	90.11
I	Si	12	100	1200	1051	372	1.24	99.99	99.6
J	Si	12	30	360	865	57	0.98	98.69	80.95

Tabla 3.3 Resumen del embalaje.

3.4 Inmueble de almacenamiento.

Estanterías.

Para el almacenamiento se utilizarán estanterías en las que se almacenará una estiba por piso en vertical, por 10 estibas en horizontal. Las dimensiones de la estantería se presentan en el siguiente diagrama de estantería.

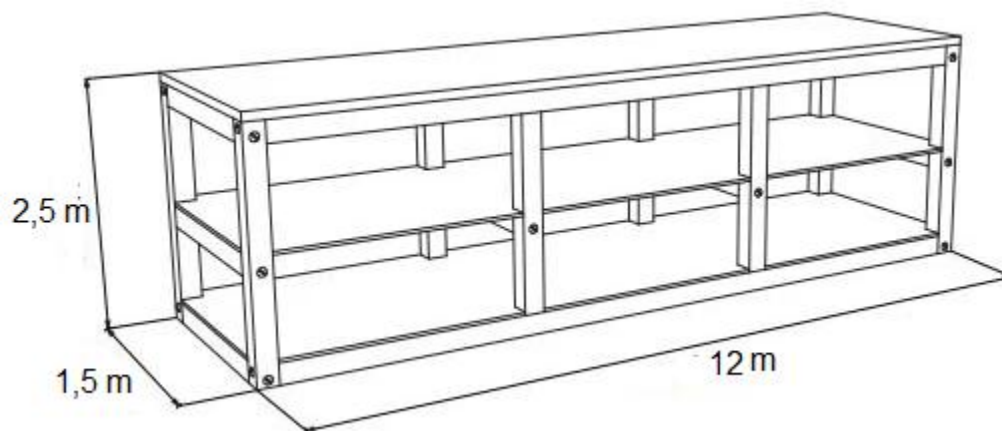


Figura 3.4.1 Estanterías.

Diseño de estantería para el almacén, con capacidad para almacenar dos estibas en vertical de máximo 1,2 m de altura con una holgura de 25 cm donde se tiene espacio en vertical suficiente para la altura máxima de la carga junto con la altura de la estiba; de profundidad tendrá una holgura de 15 cm adicional a los 1,2 m de profundidad de la estiba, de largo la estantería tiene 120 metros para almacenar 10 estibas a lo largo con una holgura de 2cm por estiba, la capacidad de almacenamiento de cada estantería es de 20 estibas.

Dimensiones del espacio de almacenamiento.

Para el presente proyecto el espacio del que se dispone es un almacén de 11,4 m de ancho y 30 m de largo, para un área de 3420 m^2 , y una superficie para almacenamiento de 2160 m^2 , 1080 m^2 en el primer nivel y 1080 m^2 en el segundo nivel, con un espacio de pasillos de 2,7 m para el tránsito de AGV, también se cuenta con una área de despacho y recibo de mercancías con dos entradas y dos salidas como se muestra en el siguiente diagrama.

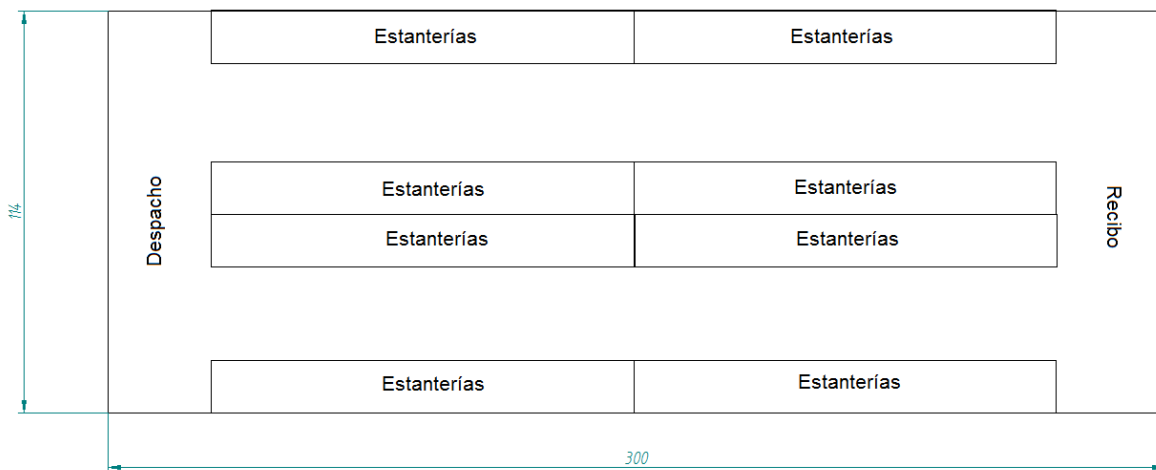


Figura 3.4.2 Espacio de la bodega de almacenamiento.

4 DISEÑO DEL SISTEMA DE AGV.

En el presente capítulo se calcularán y determinarán las características básicas para implementar el sistema de AGV's, de tal manera que garantice la operatividad del depósito y almacenamiento de las mercancías previamente descritas en el capítulo anterior. Para proceder en el diseño del sistema se estudió numerosa literatura con el fin de implementar modelación matemática, que permita la optimización del sistema, medir su rendimiento y su capacidad de responder a cambios operacionales durante su proceso de ejecución es decir su flexibilidad.[35]

Para el diseño del sistema de AGV en el proceso de almacenamiento de la situación propuesta, se evaluara inicialmente las políticas de orden de recibo y de cargue, ya que la demanda juega un papel fundamental en los modelos de inventario, además se debe tener en cuenta las limitaciones de espacio para el almacenamiento; una vez concluida la cantidad y tipos de producto para almacenar se estimará el número de vehículos (AGV) necesarios [36] y según el resultado se continuará con la selección de vehículos que se encuentren en el mercado. Lo siguiente es determinar la programación de trabajo de cada AGV (scheduling) para determinar el ruteo de cada uno mediante algoritmos matemáticos, adicionalmente se evaluarán aspectos como el mantenimiento de cada AGV, el posicionamiento de cada AGV y de ser necesario solucionar los puntos muertos dentro del almacenamiento y no permitir que existan AGV ociosos dentro del proceso.[37]

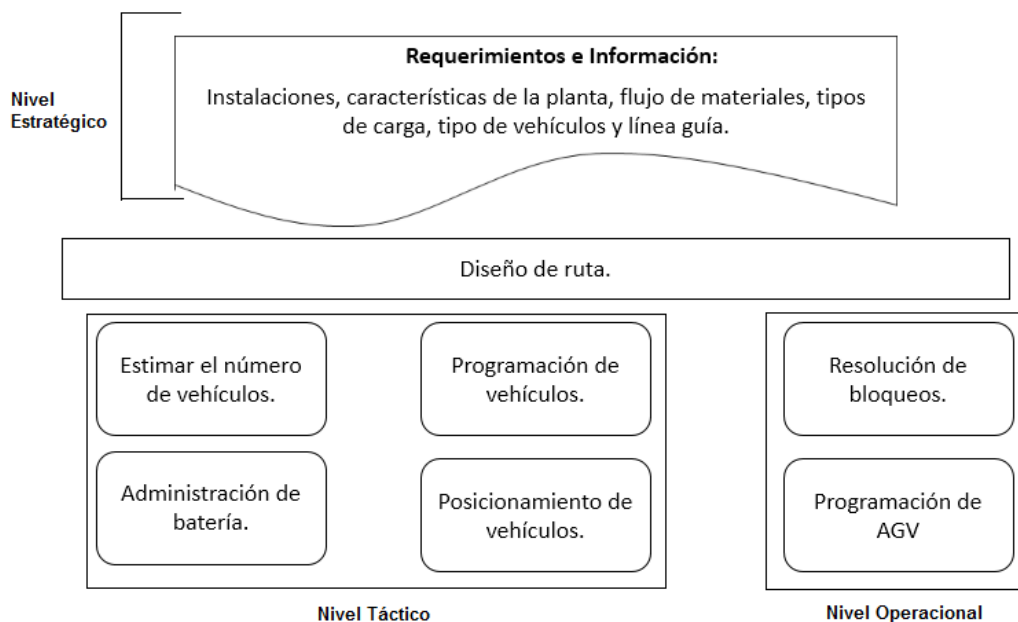


Figura 4.1 Requisitos del ruteo. [1]

4.1 Cantidades para almacenar.

Para elaborar las políticas de asignación de espacio a cada uno de las 10 referencias de productos se tendrá en cuenta principalmente la demanda de cada uno, la cual puede variar en el tiempo generando que en un determinado periodo de tiempo el mercado o los clientes exijan tener más existencias de una determinada referencia que de otra para cumplir con un pedido específico.[38]

Para implementar una política de almacenamiento óptima se utilizará el modelo matemático para cantidad de pedido económica (Economic order quantity) para varios artículos con limitación de espacio, mediante la formulación presentada en el libro de investigación de operaciones de Taha. [39]

4.1.1 Formulación Modelo Cantidad de pedido económico con limitaciones de almacenamiento.

Índices:

i : Conjunto referencias de productos.

Parámetros:

D_i : Tasa de demanda para el artículo i .

K_i : Costo de preparación (colocación de orden) para el artículo i .

h_i : Costo de retención por unidad de producto por unidad de tiempo para el artículo i .

a_i : Requerimiento de área de almacenamiento por unidad del artículo i .

A : Área total para almacenamiento disponible para los n artículos.

Variables:

y_i : Cantidad de pedido para el artículo i .

$TCU(y_1 \dots y_n)$: Costo total unitario para cada pedido.

Supuestos: No se permiten faltantes para ningún i .

Modelo Matemático para cantidad de pedido económico con limitación de espacio.

$$\text{Minimize } TCU(y_1, y_2 \dots y_n) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{K_i + D_i}{y_i} + \frac{h_i y_i}{2} \right) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n a_i y_i \leq A \quad (2)$$

$$y_i > 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

- La ecuación (1) es la función objetivo que debe minimizar el costo total de inventario agrupando el pedido de cada una de las referencias de producto. $n = 10$ referencias de producto para el ejercicio.
- La ecuación (2) es la restricción de espacio en la cual el área ocupada por cada pedido estará asignada del espacio total.
- La ecuación (3) corresponde a la no negatividad de la cantidad de pedido (y_i), garantizando que todas las soluciones sean de tipo positivo.[39]

4.1.2 Aplicación del modelo.

Para aplicar el modelo es necesario determinar los parámetros: demanda (D_i), costo de preparación (K_i), costo de retención (h_i), área requerida por cada referencia (a_i).

Debido a que el almacenamiento se encuentra unitarizado por estibas, el área requerida por cada referencia corresponderá a la cantidad de unidades por estiba dividido entre el área de la estiba, lo que permitirá calcular el área requerida por cada referencia de producto i .

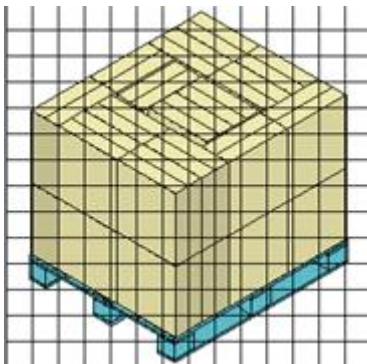


Figura 4.1.2. Embalajes sobre el pallette.

Por ejemplo el área requerida por la referencia de producto J, que se encuentran en un embalaje secundario de 12 unidades por caja:

$$Total\ de\ unidades\ /\ estiba = 12 \frac{unidades}{caja} \times 30\ cajas$$

$$Total\ de\ unidades\ /\ estiba = 360\ unidades$$

Entonces el área requerida (a_i) por unidad de referencia J es:

$$a_j = \frac{1.2m^2}{360\ Unidades}$$

$$a_j = 0.00333m^2 / unidad$$

La siguiente tabla resume los requerimientos de espacio por unidad de producto para cada referencia.

Referencia	Unidades/Paleta	a_i
A	8	$0.15 m^2$
B	6	$0.2 m^2$
C	16	$0.075 m^2$
D	16	$0.075 m^2$
E	48	$0.025 m^2$
F	42	$0.02857 m^2$
G	69	$0.01739 m^2$
H	120	$0.01 m^2$
I	1200	$0.001 m^2$
J	360	$0.0033 m^2$

Tabla 4.1.1 Espacio ocupado por las referencias unitarizadas.

Una vez obtenida el área por unidad de producto se analizan los costos de ordenar (K_i) y de almacenamiento (h_i) y la demanda (D_i).

Los costos de ordenar (K_i) se modelan asignando la constante K_i , en caso de que llegasen a variar por producto (i), para el ejercicio se tendrá que cada referencia de producto se solicitará a un proveedor diferente, lo que generará un K diferente para cada producto (i).

Referencia	k_i
A	\$14.600
B	\$12.200
C	\$9.200
D	\$9.050
E	\$7.100
F	\$10.300
G	\$6.800
H	\$7.900
I	\$8.000
J	\$6.350

Tabla 4.1.2 Costos de ordenar.

Los costos de almacenamiento (h_i), son constantes para cada paleta de almacenaje ya que estas ocupan la misma cantidad de almacenamiento en una pallet CHEP 1200x1000 al estar unitarizada la

carga por paleta, se estima el costo de almacenar una paleta por día e US\$9 con una tasa de cambio de 1 USD = 2.936,50 COP, lo que equivale a COP \$26.423, este valor no es el costo de almacenamiento por unidad de producto por unidad de tiempo h_i , para obtenerlo es necesario dividir el costo de almacenar una paleta entre el número de unidades que se almacenan en una paleta. A continuación se obtiene el costo de almacenamiento para la referencia A (h_A):

$$h_A = \frac{\text{Costo de almacenar una paleta/día}}{\text{unidades por paleta}}$$

$$h_A = \frac{26.423\$/\text{paleta/día}}{8 \text{ unidades/paleta}}$$

$$h_A = 3302,88\$/\text{unidad/día.}$$

La siguiente tabla resume h_i (costo de almacenar / unidad de producto / unidad de tiempo).

Referencia	Unidades/Paleta	Costo h_i (\$/Und.prod/tiempo)
A	8	3302.88
B	6	4403.83
C	16	1651.44
D	16	1651.44
E	48	550.48
F	42	629.12
G	69	382.94
H	120	220.19
I	1200	22.02
J	360	73.40

Tabla 4.1.3 Costo de mantener en inventario por pallet.

4.1.3 Programación en GAMS


Se programa el modelo en GAMS de la siguiente forma:

```
sets
i articulo / 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10/;
parameters
K(i) Costo pedido / 1 14600, 2 12200, 3 9200, 4 9050, 5 7100, 6 10300, 7 6800, 8
7900, 9 8000, 10 6350/
D(i) Demanda / 1 4, 2 4, 3 5, 4 5, 5 16, 6 14, 7 35, 8 100, 9 200, 10 300/
h(i) Costo almacenamiento / 1 3302.88, 2 4403.83, 3 1651.44, 4 1651.44, 5 550.48,
6 629.12, 7 382.94, 8 220.19, 9 22.02, 10 73.40/
a(i) Area requerida / 1 1, 2 1, 3 1, 4 1, 5 1, 6 1, 7 1, 8 1, 9 1, 10 1/;
scalar
E /192/;
variables
TCU;
positive variables
y(i);
equations
minTCU, espacio;
minTCU.. TCU=e=sum(i, (((K(i)*D(i))/(y(i)+0.1))+((h(i)*y(i))/2)));
espacio.. sum(i, a(i)*y(i))=l=E;
model EOQ /all/;
solve EOQ using nlp minimize TCU;
Display y.l;
```

Después de correr el programa se obtiene los siguientes resultados, para ver los resultados completos de GAMS consultar el anexo 2A

```
---- VAR TCU          -INF  2.1230E+5      +INF      .
---- VAR y
LOWER   LEVEL      UPPER   MARGINAL
1       .          4.924   +INF     EPS
2       .          4.028   +INF     EPS
3       .          5.460   +INF     EPS
4       .          5.414   +INF     EPS
5       .          10.907  +INF     EPS
6       .          12.049  +INF     -1.52E-10
7       .          16.595  +INF     .
8       .          31.879  +INF     EPS
9       .          48.644  +INF     EPS
10      .          52.101  +INF     EPS
```

4.1.4 Análisis de las variables

El siguiente diagrama representa la cantidad de espacio disponible en la bodega para almacenar las pallets con el producto.  cada cuadro verde con un rectángulo representa una pallet almacenada en la parte inferior de las estanterías y otra almacenada en la parte superior, es decir que en el lugar donde aparece la figura en cuestión es un lugar del almacén donde se encuentran almacenadas 2 pallets con producto.

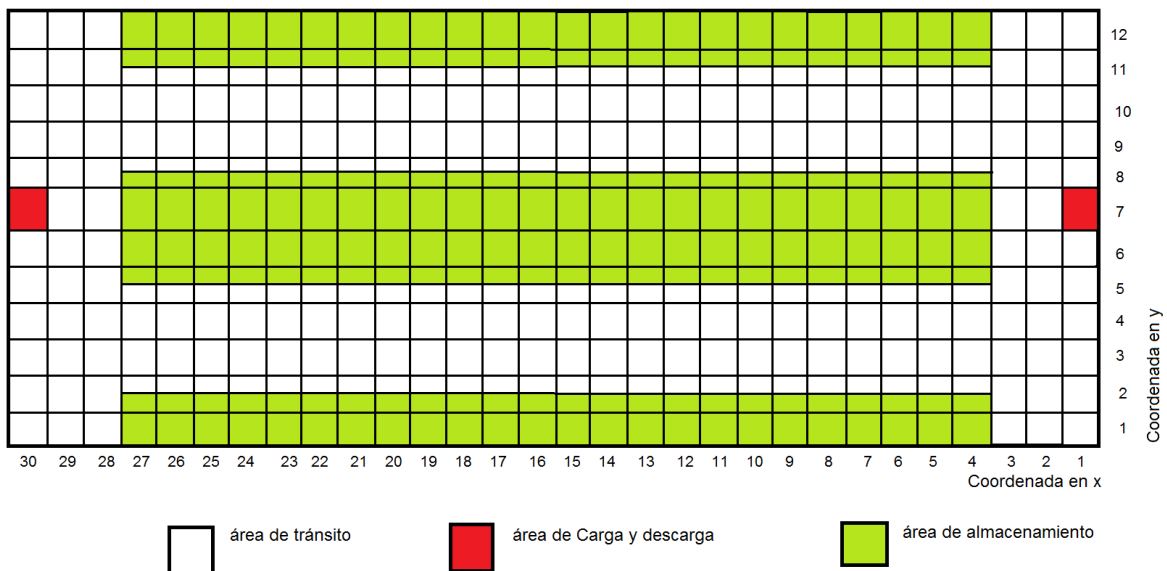


Figura 4.1.4.1 Disponibilidad de almacenamiento.

El diagrama anterior representa la cantidad de espacio disponible en la bodega, de acuerdo a las demandas planteadas previamente se ejecuta el modelo y la distribución dentro del almacén se asigna de forma que cada tipo de producto se ubique en un determinado bloque[10], lo que permite tener puntos de referencia y de carga para cada una de las referencias establecidas dentro del almacén permitiendo generar un sistema de coordenadas en metros.

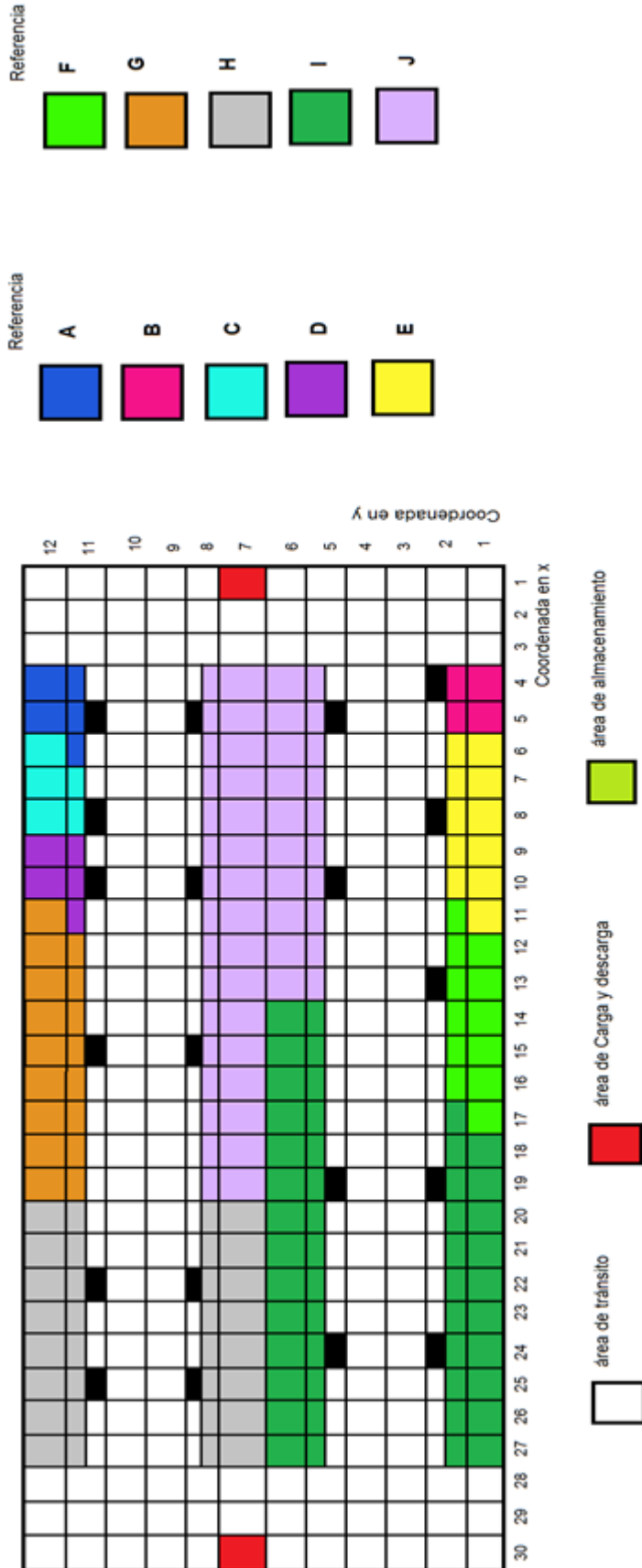


Figura 4.1.4.2 Distribución de las referencias en el almacén

4.2 Ruteo de Vehículos.

4.2.1 Modelo Matemático VRPTW.

Para determinar el ruteo de los AGV dentro del almacén los diferentes papers consultados, elaboran propias modelaciones matemáticas, que se ajustan específicamente a las necesidades de cada una de las operaciones, para generalizar, la literatura elabora sus respectivos modelos en Multicommodity Flow Formulation, que se ajusta a los modelos matemáticos de VRPTW (Vehicle routing problema with time window), este modelo tiene como objetivo minimizar el costo con respecto a los viajes hechos por los vehículos, para el presente ejercicio en la función objetivo se reemplazará el costo por la distancia recorrida por los vehículos. [40][41][42][43]

Los puntos donde se recogerá la carga son los nodos y la trayectoria entre los nodos son los arcos donde aplica el algoritmo. [39]

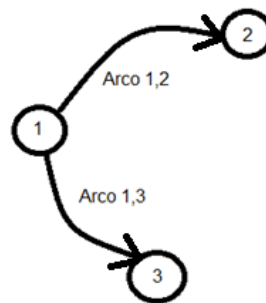


Figura 4.1.4.3 Representación Arco y nodo.

Formulación para VRPTW.

Índices.

V : Conjunto de nodos.

i : Nodos de origen $i \in V$.

j : Nodos de destino $j \in V$.

Parámetros

d_{ij} : Distancia entre el nodo de origen i y el nodo de destino j .

q_j : Demanda del nodo j .

Q : Capacidad de los AGV, para el ejercicio la flota es homogénea.

M : Es una constante lo suficientemente grande para garantizar que solo se iniciará el servicio una vez el anterior se haya terminado.

a_i : Tiempo inicial para el servicio.

b_j : Tiempo final para el servicio.

s_i : Ventana de tiempo.

Variables.

x_{ij} : Flujo de vehículo (binario) toma el valor de 1 si se realiza el viaje en el arco i a j y de 0 en caso de que no se realice.

y_{ij} : Cantidad de mercancía que transporta el vehículo entre el nodo i al nodo j .

w_i : Tiempo acumulado de viaje hasta el nodo i .

k : Cantidad de rutas para satisfacer la demanda total.

t_{ij} : Tiempo acumulado de todas las rutas para cumplir con el total de la demanda.

Modelación VRPTW. [39]

$$\text{Minimizar } \sum_{i,j \in V, i \neq j} x_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \quad j \in V \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ip} - \sum_{j \in V} x_{pj} = 0, \quad p \in V \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{0j} = K, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} y_{ij} - \sum_{i \in V, i \neq j} y_{ji} = q_j, \quad j \in V \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$q_j x_{ij} \leq y_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij}, \quad i, j \in V, i \neq j \quad (6)$$

$$a_i \leq w_i \leq b_i, \quad i \in V \quad (7)$$

$$w_i + s_i + t_{ij} - w_j \leq (1 - x_{ij})M, \quad i, j \in V, i, j \neq 0 \quad (8)$$

$$t_{0j} - w_j \leq (1 - x_{0j})M, \quad i, j \in V, j \neq 0 \quad (9)$$

$$y_{ij} \geq 0, \quad i, j \in V, i \neq j \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad i, j \in V, i \neq j \quad (11)$$

- La ecuación (1) es la función objetivo y tiene como finalidad minimizar la distancia total de transporte usando una variable binario (0,1), según se realice el viaje o no.

- La ecuación (2) obliga que cada uno de los nodos será visitado una sola vez a excepción de los puntos de carga o descarga.
- La ecuación (3) determina que cada nodo tendrá un solo arco que entra y sale según el viaje realizado por el AGV.
- La ecuación (4) establece que el total de arcos que salen del punto de cargue es igual al número de rutas realizadas por los AGV, eliminando sub rutas.
- La ecuación (5) produce un balance de flujo donde la cantidad de mercancía cargada es igual a la demandada en el nodo.
- La ecuación (6) determina que la capacidad del AGV no sea inferior a la demanda del nodo, ni supere la capacidad máxima del AGV.
- La ecuación (7) establece una restricción de ventana de tiempo que impone un tiempo inicial de servicio para alcanzar el nodo i , donde el límite inferior y el límite superior estén en la ventana de tiempo.
- La ecuación (8) garantiza que no se iniciará el servicio siguiente hasta que no se haya terminado el servicio inmediatamente anterior.
- La ecuación (9) establece que no se puede iniciar el servicio al nodo j hasta que no se termine el servicio al nodo i y no se haya viajado desde el nodo i hasta el nodo j .
- La ecuación (10) determina que a variable Y no puede ser negativa.
- La ecuación (11) especifica que la variable x es de tipo binario.

*adicionalmente para convertir las coordenadas en el depósito a distancias se utilizará la fórmula de $distancia = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ con x y y como coordenadas.

4.2.2 Desarrollo del planteamiento de VRPTW

Se parte de las coordenadas de cada nodo y su respectiva demanda para llenar el camión de despacho en la zona de carga, según lo calculado con la orden de pedido económico visto previamente para distribuir las referencias de productos en el almacén se obtienen las coordenadas de cada nodo, las referencias con mayor demanda tendrán más de un nodo, para proveer la cantidad de producto demandada.

Gracias a que las cargas se encuentran unitarizadas, se puede trabajar por pallets y la demanda de cada referencia de producto se presenta a continuación:

Nodo (i,j)	Coor. X	Coor. Y	Demanda (Q) (Cantidad en Pallets)
1	30	7	0
2	5	11	1
3	4	2	1
4	8	11	1
5	10	11	1
6	8	2	1
7	13	2	1
8	15	11	1
9	22	8	2
10	25	8	1
11	22	11	1
12	25	11	1
13	19	2	2
14	24	2	1
15	19	5	1
16	24	5	1
17	5	5	1
18	10	5	1
19	5	8	1
20	10	8	1
21	15	8	1

Tabla 4.2.2 Coordenadas de los nodos y demandas.

Delo anterior se deduce que hay 21 nodos (V).

El tiempo de servicio es 40 segundos, lo que es la ventana de tiempo s_i .

Tiempo de Inicio del servicio (a_i)

Para calcular el tiempo de inicio del servicio (a_i) se aplicará la fórmula:

$$Tiempo = \frac{distancia.}{velocidad}$$

Evaluando la velocidad media de trabajo dentro del almacén para una AGV es de: $1,4 \text{ m/s}$.

La distancia entre el descargue se calculará así de la siguiente manera:

$$distancia = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Donde x y y hacen referencia a las coordenadas de cada nodo.

Entonces:

$$a_i = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{1,4 \text{ m/s}}$$

Donde las coordenadas del nodo de carga son: (30,7).

Para el nodo 1 de la referencia A, las coordenadas son: (5,11).

Por lo tanto:

$$a_2 = \frac{\sqrt{(5-30)^2 + (11-7)^2}}{1,4 \text{ m/s}}$$

$$a_2 = 18.08 \text{ s}$$

Tiempo Final de servicio (b_i).

El tiempo final de servicio será el tiempo inicial de servicio (a_i) mas la ventana de tiempo (s_i), mas una holgura de 10s:

$$b_i = a_i + s_i + \text{holgura.}$$

Entonces para la referencia A en el nodo 2 se tiene:

$$b_i = 18.08s + 40s + 10s$$

$$b_i = 68.08s$$

Entonces los parámetros son:

Cliente	Tiempo Inicial (a_i)	Tiempo Final (b_j)
1	0	800
2	18.08	68.08
3	18.91	68.91
4	15.97	65.97
5	14.57	64.57
6	16.12	66.12
7	12.66	62.66
8	11.09	61.09
9	5.76	55.76
10	3.64	53.64
11	6.39	56.39
12	4.57	54.57
13	8.63	58.63
14	5.58	55.58
15	7.99	57.99
16	4.52	54.52
17	17.91	67.91
18	14.36	64.36
19	17.87	67.87
20	14.30	64.30
21	10.74	60.74

Tabla 4.2.3 Tiempo inicial de servicio y final de cada uno de los nodos.

4.2.3 Programación en GAMS del VRPTW

```
$Set nc 21  
Set producto /c1*c%nc%/;  
Set Destino(producto) /c2*c%nc%/ ;  
Alias (producto,productol);
```

```
parameter DEM[producto] demanda /
```

```
C1 0  
C2 1  
C3 1  
C4 1  
C5 2  
C6 1  
C7 1  
C8 1  
C9 1  
C10 1  
C11 1  
C12 1  
C13 2  
C14 1  
C15 1  
C16 1  
C17 1  
C18 1  
C19 1  
C20 1  
C21 1/;
```

```
parameter px[producto] coordx /
```

```
C1 30  
C2 5  
C3 4  
C4 8  
C5 10  
C6 8  
C7 13  
C8 15  
C9 22  
C10 25  
C11 22  
C12 25  
C13 19  
C14 24  
C15 19  
C16 24  
C17 5  
C18 10  
C19 5  
C20 10  
C21 15/;
```

```
parameter py[producto1] coordy /  
C1 7  
C2 11  
C3 2  
C4 11  
C5 11  
C6 2  
C7 2  
C8 11  
C9 8  
C10 8  
C11 11  
C12 2  
C13 2  
C14 5  
C15 5  
C16 5  
C17 5  
C18 5  
C19 8  
C20 8  
C21 8/;
```

```
parameter a[producto]/  
C1 0  
C2 18.08  
C3 18.91  
C4 15.97  
C5 14.57  
C6 16.12  
C7 12.66  
C8 11.09  
C9 5.76  
C10 3.64  
C11 6.39  
C12 4.57  
C13 8.63  
C14 5.58  
C15 7.99  
C16 4.57  
C17 17.91  
C18 14.36  
C19 17.87  
C20 14.30  
C21 10.74/;
```

```
parameter b[producto]/  
C1 800  
C2 68.08  
C3 68.91  
C4 65.97  
C5 64.57  
C6 66.12  
C7 62.66  
C8 61.09  
C9 55.76  
C10 53.64
```

C11 56.39
C12 54.57
C13 58.63
C14 55.58
C15 77.99
C16 54.57
C17 67.91
C18 64.36
C19 67.87
C20 64.30
C21 60.74/;

parameter s[producto]/

C1 40
C2 40
C3 40
C4 40
C5 40
C6 40
C7 40
C8 40
C9 40
C10 40
C11 40
C12 40
C13 40
C14 40
C15 40
C16 40
C17 40
C18 40
C19 40
C20 40
C21 40/;

parameters DIST[producto,productol];
DIST[producto,productol]= sqrt ((px (producto) -
px (productol)) * (px (producto) -px (productol)) + (py (producto) -
py (productol)) * (py (producto) -py (productol)));
Scalar M /1078/;
Scalar CAP /2/ ;
Binary Variable x[producto,productol];
Variable z,y[producto,productol],w[producto],k;

Equations
unaentrada (producto) ,
unarco (producto) ,
rutas,
cargademandada (producto) ,
capacidad (producto,productol) ,
capacidad2 (producto,productol) ,
ventanadetiempo1 (producto) ,
ventanadetiempo2 (producto) ,
tiempoinicial (producto,productol) ,
tiempofinal,
funcionObj ;

```

funcionObj.. z=e= Sum{(producto,productol)$ (ord(producto) ne
ord(productol)),DIST[producto,productol]*x[producto,productol]} ;
unaentrada(producto)$ (Destino(producto)).. Sum{productol$(ord(producto)
ne ord(productol)),x[productol,producto]} =e= 1;
unarco(producto)$ (Destino(producto)).. Sum{productol$(ord(producto) ne
ord(productol)), x[producto,productol]}-Sum{productol$(ord(producto) ne
ord(productol)), x[productol,producto]} =e= 0;
rutas.. Sum{productol$(ord(productol)>1), x['c1',productol]}=e= k;
cargademandada(producto)$ (Destino(producto))..Sum{productol$(ord(producto)
ne ord(productol)),y[producto,productol]}-Sum{productol$(ord(producto)
ne ord(productol)), y[productol,producto]} =e= DEM[producto];
capacidad(producto,productol) $(ord(producto) ne ord(productol))..
DEM[productol]*x[producto,productol]=l=y[producto,productol];
capacidad2(producto,productol)$ (ord(producto) ne ord(productol))..
y[producto,productol]=l=(CAP-DEM[producto])*x[producto,productol];
ventanadetiempo1(producto).. w[producto] =g= a[producto];
ventanadetiempo2(producto).. w[producto] =l= b[producto];
tiempoinicial(producto,productol)$ (Destino(producto))..
w[producto]+s[producto]+DIST[producto,productol]-w[productol] =l= (1-
x[producto,productol])*M;
tiempofinal(productol).. DIST['c1',productol] -
w[productol] =l= (1-x['c1',productol])*M;

Model vrp / all / ;
option x:0:0:1;
option y:0:0:1;
Option Optcr=0.000001;
Solve vrp using MIP minimazing z;
Display z.l;
Display x.l;
Display y.l;

```

4.2.4 Solución de la programación en GAMS para VRPTW.

Para solucionar el programa anterior se corre en la plataforma ofrecida por la universidad de Wisconsin

- 1) Se ingresa a la página web <https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>.
- 2) Se selecciona Mixed Integer Linear Programming.
- 3) Se usa el solver CPLEX.

Después de usar GAMS se obtienen los resultados, para ver las variables y la respuesta completa consultar el anexo 2B; a continuación se escribe el ruteo conforme se obtuvo en GAMS

Ruteo dentro del almacén de acuerdo a las respuestas obtenidas en GAMS.

Ruta	Rutas
1	c1.c5-c5.c1,
2	c1.c8-c8.c21-c21.c1,
3	c1.c10-c10.c12-c12.c1,
4	c1.c11-c11.c9-c9.c1,
5	c1.c13-c13.c1,
6	c1.c15-c15.c7-c7.c1,
7	c1.c16-c16.c14-c14.c1,
8	c1.c17-c17.c3-c3.c1,
9	c1.c18-c18.c6-c6.c1,
10	c1.c19-c19.c2-c2.c1,
11	c1.c20-c20.c4-c4.c1,

Tabla 4.2.4.1 Rutas para AGV.

4.3 Selección De AGV

Existen muchos tipos de AGV en el mercado e incluso las compañías productoras de estos se pueden construir AGV sobre medidas y especificaciones hechas por los clientes, debido a la naturaleza de cargue y descargue se seleccionara un AGV que pueda llevar 2 pallets una al lado de la otra sin la necesidad de cargar una sobre otra para proteger las referencias de producto que se van a transportar [44][45][46].

Para el caso se supondrá el uso de un modelo GP8 Pallet Truck de la empresa KMH systems con las siguientes características:

	<p>Capacidad máxima: 4.000 kg</p> <p>Velocidad Máxima Con carga completa: 1,072 m/s.</p> <p>Velocidad máxima sin carga: 1.76m/s.</p> <p>Ancho: 0.92 metros.</p> <p>Altura: 1.99 metros.</p> <p>Largo: 3.5 metros con cuchillas de doble longitud.</p> <p>Batería de 24 voltios.</p> <p>Capacidad de ruta: 24.13 km</p>
-------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 4.3 Características del GP8 Pallet Truck de la empresa KMH. *Imagen tomada de la página web del a empresa

<http://www.kmhsystems.com/>



Figura 4.3 GP8 Pallet Truck de la empresa KMH en operación. *Imagen tomada de la página web de la empresa <http://www.kmhsystems.com/>

El vehículo tendría una capacidad de carga de dos pallets que pueden ser transportadas sin colocar la una pallet sobre otra[47], con esto se termina el ruteo de vehículo y la incorporación del AGV, el paso siguiente es probar el diseño propuesto de ruteo. [48]

5 SIMULACIÓN Y ANÁLISIS

En el capítulo anterior se utilizó la modelación matemática para ruteo de vehículos con ventana de tiempo (VRPWT) por sus siglas en inglés adicionando características propias de operaciones de inventarios y flujo de material o mercancías en un almacén, de esto se establecieron las rutas óptimas para ser recorridas por los AGV en un proceso de cague, una vez obtenido este resultado se evaluará la eficiencia de la optimización mediante AGV frente a un cargue manual con montacargas convencionales operados por personas, usando el programa de simulación PROMODEL® en su versión de 2016, para los dos eventos y utilizando las estadísticas de las variables involucradas en el proceso.

5.1 Construcción de la simulación.

En esta sección se indicará como fue construida la simulación del ruteo de los AGV en el programa PROMODEL®, teniendo en cuenta las principales características e implementándolas en las diferentes utilidades de las que dispone el software. A continuación se describe el proceso de implementación en PROMODEL® del ruteo de AGV, el cargue por operarios seguirá los mismos pasos pero no se presentará su desarrollo sino su puesta en marcha y resultados obtenidos después de la simulación.

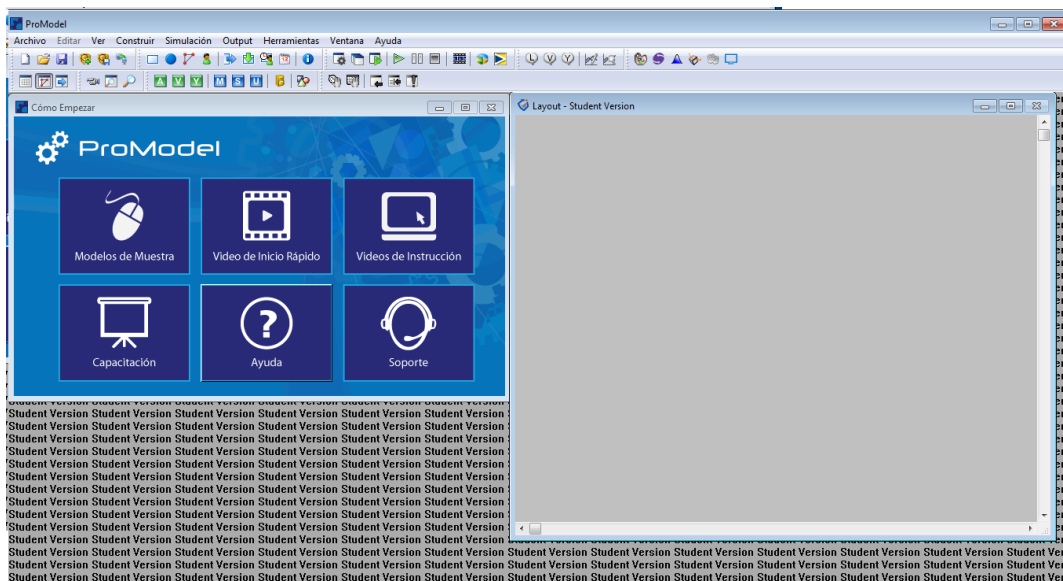


Figura 5.1.1 Interface Promodel®

El primer paso para el desarrollo de la simulación es indicar las unidades de tiempo y de distancias utilizada para la parametrización de todos los procesos ejecutados en PROMODEL ® desde el menú de opciones que presenta el programa, de no hacerse se presentarán incongruencias con los resultados obtenidos y los datos introducidos.

Otro aspecto que se debe asignar antes de iniciar la construcción de la simulación es título de la librería gráfica, se debe guardar para ser utilizado durante el proceso de construcción en Promodel ®; estas operaciones se pueden indicar al iniciar un nuevo proyecto en la ventana de información general:

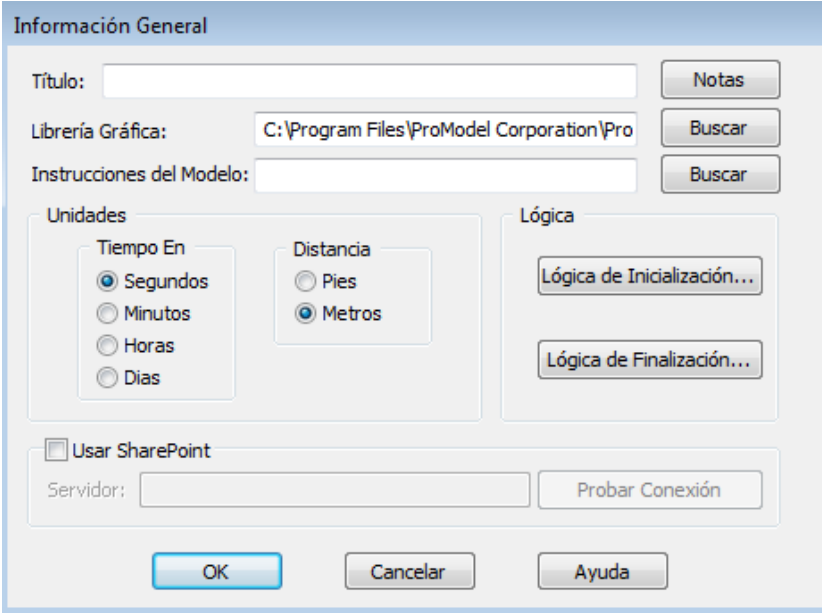


Figura 5.1.2 Información general simulación en Promodel®

PROMODEL ® es un software orientado a objetos que permite visualizar los movimientos de las entidades utilizadas.

Debido a que PROMODEL ® es un software de simulación los cálculos de los valores que serán introducidos en cada uno de los estamentos solicitados por el programa, estos por defecto tendrán las medidas de tiempo y distancias establecidas previamente, como se puede ver en la imagen anterior, se asignó para distancia metros y para tiempo segundos que son con las que se ha trabajado desde los cálculos matemáticos.

En la pantalla de inicio lo que resalta es el área de trabajo donde se generarán los procesos, esta es la ventana gris identificada con el nombre de Layout, en los menús, el que principalmente se utilizará es el de construir el cual contiene:



Figura 5.1.3 Menú construcción Promodel®

Para desarrollar la idea el PROMODEL ® necesita que se construyan los elementos de las locaciones, entidades, redes, recursos, procesos y arribos como mínimo para que la simulación sea lo más precisa posible, esto se puede desarrollar en el menú de construir (Build) que ofrece el software.

5.2 Locaciones

Las locaciones son los puntos en los que se desea realizar una determinada operación, como el modelo es el transporte de mercancías solo se tiene un almacenaje y un punto de cargue, cada almacenaje estará representado gráficamente por:



Figura 5.2.1 Iconografía de las pallets en Promodel®

Esta figura representara cada una de las locaciones donde se realizará el cargue, en el modelo matemático es la coordenada donde se tiene cada tipo de mercancía, en este caso son desde C2 hasta C22.

Adicionalmente se tendrá la locación de despacho, la cual se representará en el modelo con la siguiente figura:



Figura 5.2.2 Iconografía camión de carga en Promodel®

La interfaz de locaciones está compuesta por tres ventanas cada una con una función, gráficos permite al usuario utilizar gráficos para representar las locaciones, las que son seleccionadas aparecen en la ventana de layout y la tercer ventana es la de locaciones, donde se caracteriza cada locación de acuerdo con las necesidades de la simulación.

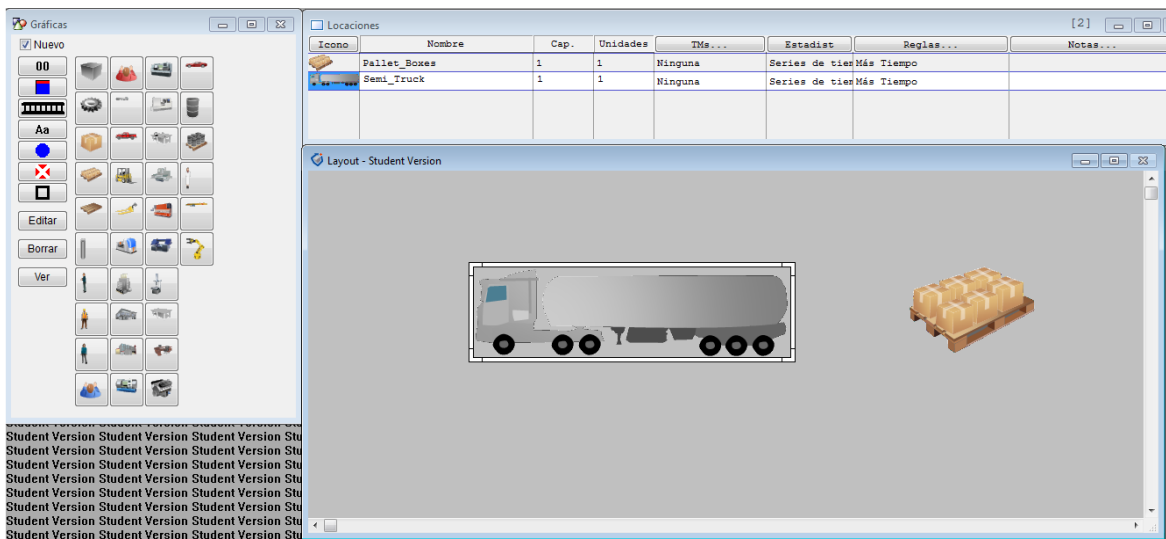
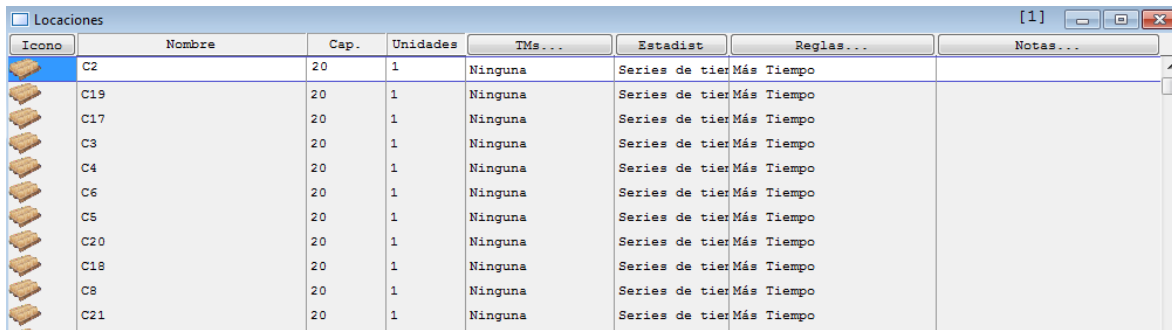


Figura 5.2.3 Ventana de locaciones en Promodel®

Para el ejemplo actual la ventana de locaciones se construyó de la siguiente manera:



Icono	Nombre	Cap.	Unidades	TMs...	Estadist	Reglas...	Notas...
	C2	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C19	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C17	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C3	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C4	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C6	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C5	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C20	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C18	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C8	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		
	C21	20	1	Ninguna	Serie de tier Más Tiempo		

Figura 5.2.4 Lista de las locaciones en Promodel®

Una vez indicados en el programa mediante la tabla anterior PROMODEL ® ya reconoce las locaciones que el modelo trabajará, en esta se pueden indicar otras características adicionales de ser requeridas, para la presente simulación no se profundizará sobre estas, ya que la prioridad son los puntos donde se cargarán las diferentes referencias de producto. Por limitaciones de licencia la simulación se realizará con 18 puntos de cargue en lugar de los 20 antes mencionados, esto no repercutirá en la simulación ya que ambos escenarios (operarios y AGV) tendrán la misma restricción.

5.3 Entidades

Las entidades son los diferentes elementos que pasan de un proceso a otro, estas pueden ser materias primas, insumos, productos en proceso o incluso productos terminados; para el caso de estudio son las diferentes referencias de los productos que se están utilizando en el almacén. Las entidades se agregan en una interfaz de usuario similar a la vista para las locaciones, la variación se encuentra en la ventana de entidades, en esta se asigna el nombre a cada una de las referencias que se utilizarán durante la simulación.



Icono	Nombre	Velocidad (Ppm)	Estadist	Notas...
	BoxA	1.4	Serie de tiempo	
	BoxB	1.5	Serie de tiempo	
	BoxC	1.5	Serie de tiempo	
	BoxD	1.5	Serie de tiempo	
	BoxE	1.5	Serie de tiempo	
	BoxF	1.5	Serie de tiempo	
	BoxG	1.5	Serie de tiempo	

Figura 5.3.1 Ventana de entidades en Promodel®

Al igual que con las locaciones la tabla de entrada de las entidades permite indicar más parámetros como velocidad estadística y notas los cuales no son necesarios para el ejercicio de simulación que se está realizando. Se utilizó una caja que representará a cada una de las referencias, PROMODEL® Internamente diferenciará cada una de las referencias mediante el nombre.

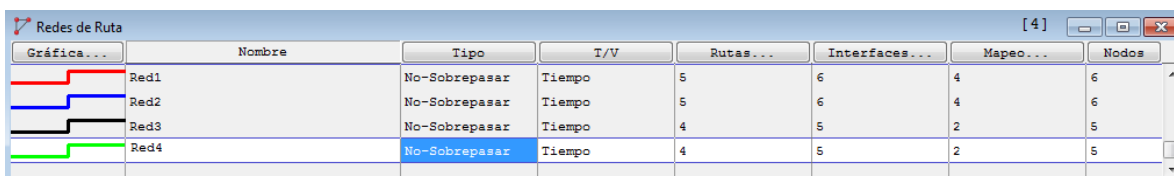


Figura 5.3.2 Iconografía de la referencia Promodel®

5.4 Redes

Un aspecto fundamental para la simulación que se tiene planeada son las redes de transporte, es decir las rutas que utilizaran los montacargas y los AGV para desplazarse y tomar las mercancías necesarias para la carga de los camiones de los cuales se está trabajando. La asignación de las rutas y nodos será lo más detallada posible para garantizar la comparación adecuada de los desplazamientos que se están estudiando.

Una vez se dé clic en redes aparecerán tres ventanas en el área de trabajo, la primera es el layout que en todo momento está visible y en ella se ve gráficamente los ajustes que se han construido para la simulación, además aparece la ventana redes de ruta en las cuales se asignará cada una de las rutas correspondientes a los cálculos previamente hechos para los diferentes puntos de almacenamiento:



Gráfica...	Nombre	Tipo	T/V	Rutas...	Interfaces...	Mapeo...	Nodos
	Red1	No-Sobrepasar	Tiempo	5	6	4	6
	Red2	No-Sobrepasar	Tiempo	5	6	4	6
	Red3	No-Sobrepasar	Tiempo	4	5	2	5
	Red4	No-Sobrepasar	Tiempo	4	5	2	5

Figura 5.4.1 Ventana principal de asignación de redes en Promodel®.

En la figura 5.4.2 se presenta la ventana de redes de ruta, la cual tiene los campos: Gráfica, Nombre, Tipo, T/V, Rutas, Interfaces, Mapeo y Nodos, cada uno de estos campos se detallan a continuación:

- Gráfica: en esta opción se cambia el color de cada una de las rutas, para el ejercicio es muy importante porque permite visualizar fácilmente los puntos de almacenamiento que presentará cada vehículo, la ventana que se puede ver dando clic en este campo se ve en la siguiente figura:

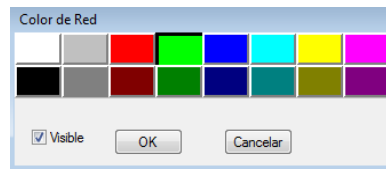
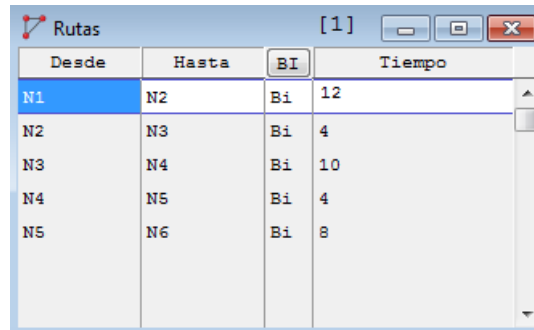


Figura 5.4.2 Colores de red Promodel®

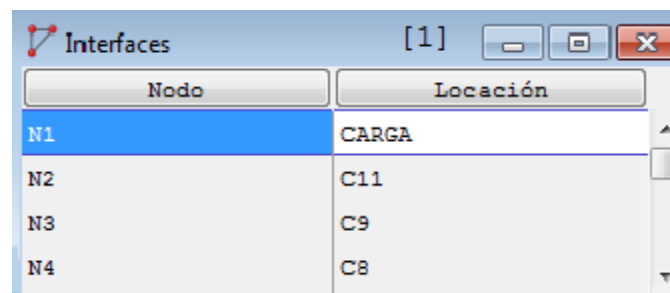
- Nombre: En este campo se asigna el nombre a cada una de las rutas, para el desarrollo que se está realizando se utilizó Red1, Red2 y así sucesivamente.
- Tipo: En tipo el software permite tres elecciones: sobrepasar, no sobrepasar y grúa, este no es un factor muy relevante pero se asigna no sobrepasar para cumplir con la capacidad de los vehículos.
- T/V (tiempo/ velocidad): Se determina la distancia entre cada nodo o el tiempo que transcurre en llegar desde cada nodo al otro, la selección de velocidad o de distancia depende de lo requerido por el usuario, debido a que no se está trabajando a escala exacta, se soluciona indicando el tiempo entre cada una de las rutas.
- Rutas: En esta campo se construye como tal la ruta que se seguirá entre cada uno de los nodos, esta va apareciendo en el layout y lleva el tiempo que se va asignando a medida que se dé el ruteo, el trayecto entre cada nodo aparece secuencialmente según se haya asignado, también establece si es bidireccional o no, para facilitar la entrada de estos datos una vez se edite esta entrada aparece una nueva ventana que permite cambiar los nodos o el tiempo.



Desde	Hasta	BI	Tiempo
N1	N2	Bi	12
N2	N3	Bi	4
N3	N4	Bi	10
N4	N5	Bi	4
N5	N6	Bi	8

Figura 5.4.3 Ventana de asignación de tiempos a los arcos.

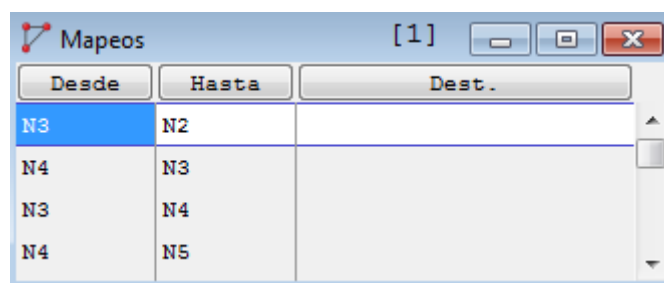
- Interfaces: En este ítem es muy importante determinar dentro del programa la locación que corresponde a cada uno de los nodos, para esto aparecerá una ventana llamada interface en la que se elige el nodo y luego se le asigna una determinada ubicación.



Nodo	Locación
N1	CARGA
N2	C11
N3	C9
N4	C8

Figura 5.4.4 Asignación de locaciones a cada nodo.

Mapeo: aquí se aprecia el número de arcos que tiene una determinada ruta, cada arco es único y esta información es generada automáticamente por el programa una vez se defina la interface y se agregue la ruta.



Desde	Hasta	Dest.
N3	N2	
N4	N3	
N3	N4	
N4	N5	

Figura 5.4.5 ventana de mapeo.

- **Nodos:** los nodos determinan los límites de la ruta, pero no es necesario asignarlos ya que la información suministrada en los puntos anteriores permite que estos se generen, en caso de hacer alguna salvedad de un límite de la ruta, puede hacerse en esta opción.

Una vez parametrizadas las rutas, se puede ver en la ventana de layout el diseño de los recorridos que se simularan en la trayectoria, debido a limitaciones de la versión utilizada de PROMODEL®, algunas de las rutas se unificaron en una, esto no afecta la medición de la eficiencia del sistema, pero se supondrá una mayor capacidad de carga del vehículo, dando como resultado la medición de los tiempos y el uso de los vehículos que es el objeto fundamental de estudio. Por consiguiente el ruteo dentro del almacén será el siguiente:

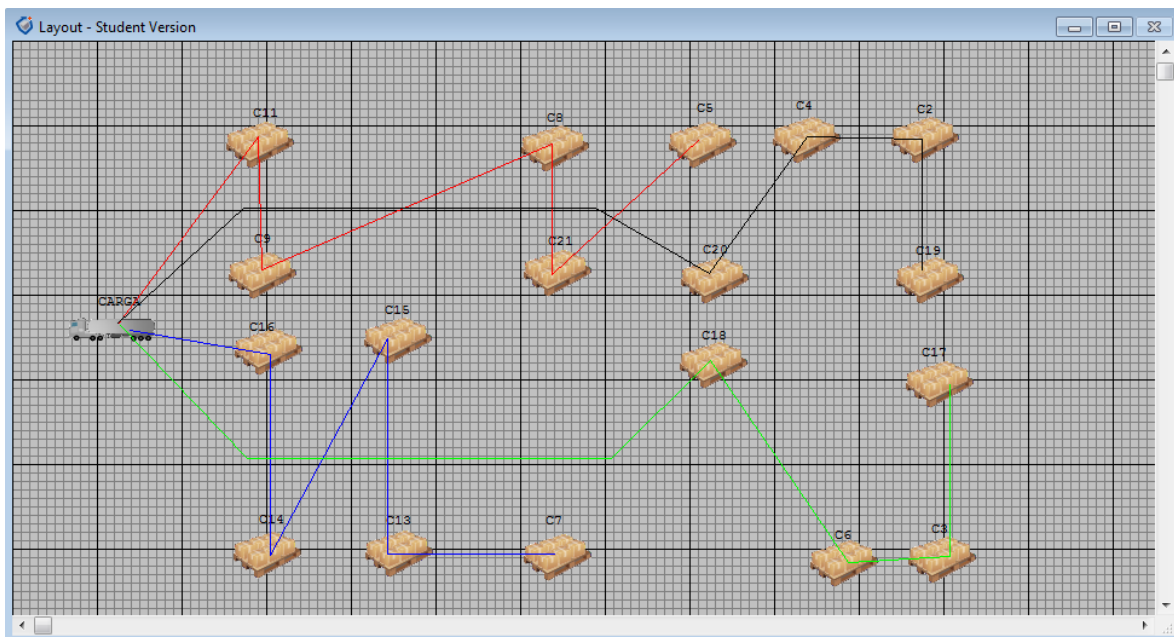


Figura 5.4.6 Descripción de las rutas calculadas por VRPTW en Promodel®.

5.5 Recursos

Los recursos son elementos utilizados dentro de los procesos, un recurso se diferencia de una entidad debido a que las entidades son elementos que pasa de una proceso a otro mientras que los recursos son herramientas o utensilios que se usan dentro del proceso, no se consumen pero si se ocupan.

Para el estudio se utilizarán los AGV y los montacargas que son los recursos para cada uno de los sistemas. Para establecer los recursos se utiliza la siguiente ventana:



Icono	Nombre	Unidades	TMs...	Estadist	Especific...	Buscar...	Lógica...	Pts...	Notas...
	AGV1	1	Ninguna	Por Unidad, Seri	Red1, N1, Rtn Hom	Ninguna	0	1	
	AGV2	1	Ninguna	Por Unidad, Seri	Red2, N1, Rtn Hom	Ninguna	0	1	
	AGV3	1	Ninguna	Por Unidad, Seri	Red3, N1, Rtn Hom	Ninguna	0	1	
	AGV4	1	Ninguna	Por Unidad, Seri	Red4, N1, Rtn Hom	Ninguna	0	1	

Figura 5.5.1 Ventana de asignación de recursos.

La asignación de los recursos es similar a lo visto en pasos anteriores, se va agregando en la ventana de recursos y se puede ir visualizando en la ventana de layout, cabe aclarar que los recursos que se están asignando van asociados a una determinada ruta del trabajo por consiguiente se debe usar el campo de especificación para determinar que AGV va atender a cada una de las rutas.

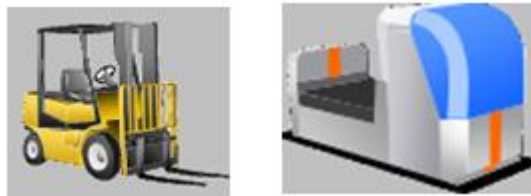


Figura 5.5.2 Iconos para montacargas y AVG en la simulación. .

Se debe especificar en cada recurso cuál es su ruta y cuál es el nodo de origen, es decir al nodo al que el AGV debe regresar una vez haya terminado el servicio. Para esto se establece la información en la siguiente ventana[47]:

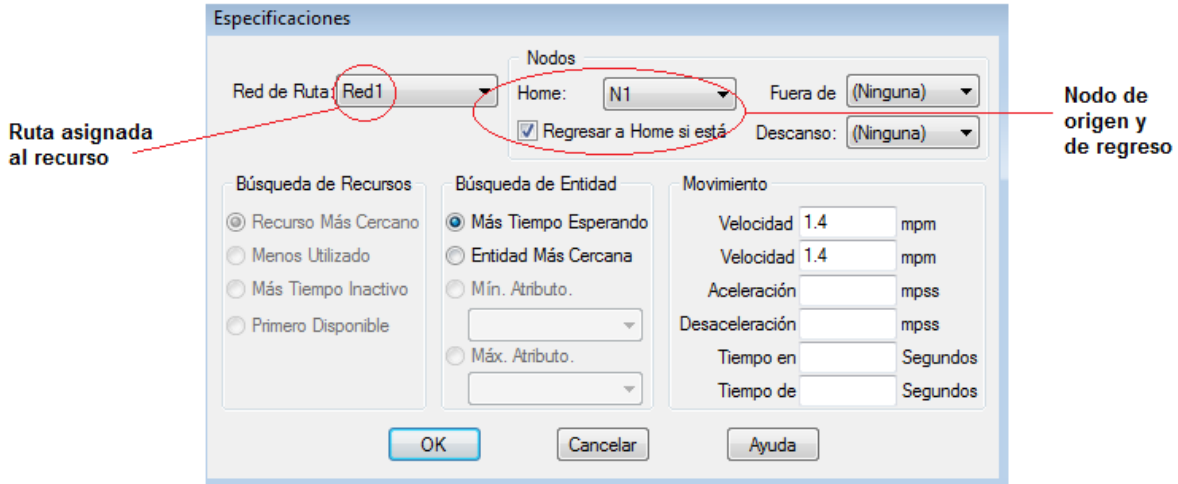


Figura 5.5.3 Ventana para asignar nodo de regreso.

5.6 Arribos

En este ítem se especifica la cantidad de la que se dispone de cada uno de los arribos en cada una de las locaciones, la ocurrencia, que quiere decir cuántas veces se repetirá el proceso; por motivos de facilidad para realizar la simulación se tendrá una frecuencia infinita, esto no afecta para nada la simulación que se desea realizar simplemente garantiza la continuidad a largo del proceso, la frecuencia declara cada cuanto la localización recibe una entidad, debido al interés de despachar la carga se establecerá una frecuencia de arribo que garantice que cada locación tenga disponibilidad de la entidad, esto no afectará para nada el resultado de la simulación, por eso se uso una frecuencia de arribo de 10 segundos por locación. La información se puede apreciar en la siguiente figura:

Entidad...	Locación...	Cant. por Arribo...	Primera Vez...	Ocurrencias	Frecuencia	Lógica...	Deshab.
Box	C2	2	0	inf	10 sec		No
Box	C19	2	0	INF	10 sec		No
Box	C17	2	0	INF	10 sec		No
Box	C3	2	0	INF	10 sec		No
Box	C4	2	0	INF	10 sec		No
Box	C6	2	0	INF	10 sec		No
Box	C5	2	0	INF	10 sec		No

Figura 5.6.1 Ventana de arribos de entidades.

5.7 Procesos

Finalmente se encuentren los parámetros establecidos y las rutas, se procede con la implementación de los procesos, en este caso no se tiene un proceso como tal pero si se tiene una secuencia de pasos lógicos para transportar las mercancías y estos se desarrollarán en procesos, ya que es obligatoria para correr la simulación y permiten la secuencialidad de las operaciones de carga en cada uno de los nodos. Para continuar con la implementación en PROMODEL® el software requiere plantear las entradas y salidas de cada una de las locaciones mediante el uso de tres ventanas para la descripción del proceso.

La primer ventana con la que vamos a trabajar es la ventana de herramientas que permite introducir los nuevos procesos, asignando cada una de las entidades; es decir que a una locación ingresará una entidad y saldrá otra determinada entidad en el caso de tener operaciones, como el modelo que se va a simular es de transportación, no se transformará ninguna entidad y por consiguiente las entidades que entran son las mismas que salen de las locaciones, estos nuevos procesos se introducen como vectores, donde hay una dirección magnitud y sentido, se asociarán a las rutas y se representará mediante un vector gráfico.

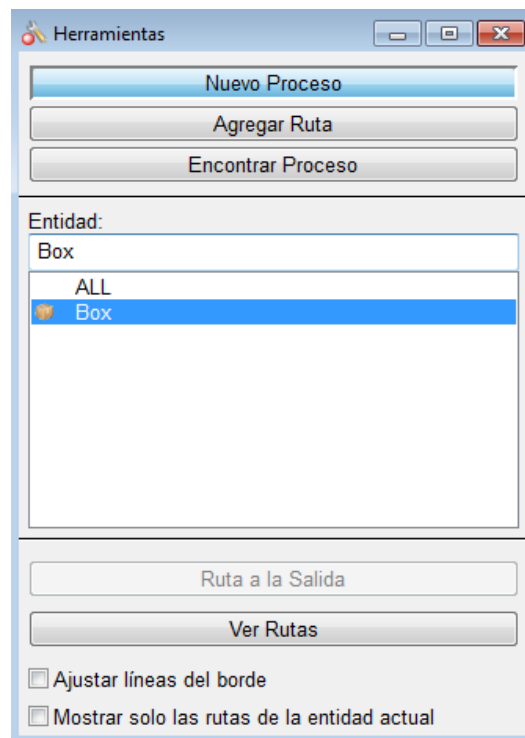
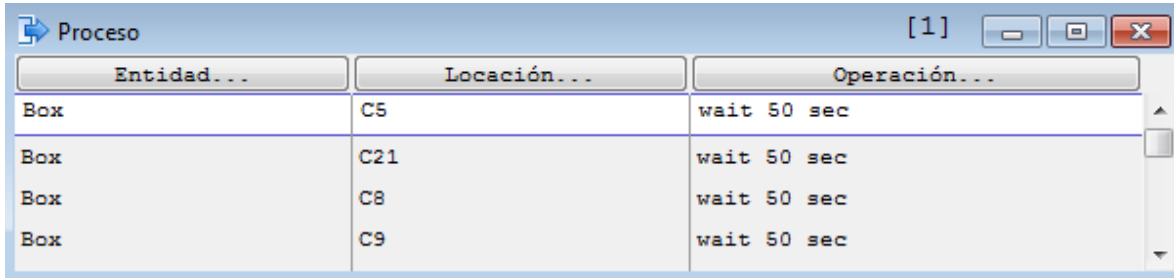


Figura 5.7.0 Herramientas de ayuda para asignar nuevos procesos.

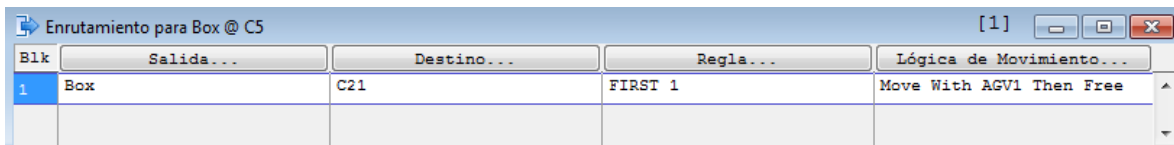
Luego se declaran los procesos como tal en la ventana de procesos, donde se establecerán los campos de entidad que es cada referencia de producto en cada una de las locaciones de almacenaje, luego se declarará la locación en la que se llevará a cabo la operación, aquí aparecen los nombres de C2,C3,C4 según el orden establecido por el ruteo, no irán en orden debido a que se escribirán y se relacionarán de acuerdo al ruteo hecho anteriormente para finalmente llegar al campo de operación, esté es una operación lógica que permite PROMODEL®, se escribe como una línea de programación de computador, se profundizará más adelante el uso de esta función y del asistente incluido en PROMODEL®; por ahora esta operación obedece al tiempo de atención esperado en cada uno de los nodos, es decir la ventana de tiempo. La cual se asigna así: "wait 50 sec", lo que le indica al montacargas o al AVG el tiempo de la operación, este debe hacerse por cada uno de los nodos.



Entidad...	Locación...	Operación...
Box	C5	wait 50 sec
Box	C21	wait 50 sec
Box	C8	wait 50 sec
Box	C9	wait 50 sec

Figura 5.7.1 Ventana de entrada de entidad y locación.

Luego de completar la ventana de procesos se utilizará ventana de enrutamiento en la cual su principal función es establecer las salida y la siguiente locación a la que se dirigirá la entidad dependiendo de la ruta que debe seguir en el procesos, se define la entidad que sale, en el caso de una operación puede en la ventana de procesos entrar una materia prima como una entidad y una vez finalizado el proceso se puede tener una transformación lo que generaría una entidad diferente a la que entro como un producto terminado por ejemplo, debido a las operaciones de transporte únicamente que se realizan, las entidades permanecen constantes a lo largo de la ruta de proceso pasando por los nodos.



Blk	Salida...	Destino...	Regla...	Lógica de Movimiento...
1	Box	C21	FIRST 1	Move With AGV1 Then Free

Figura 5.7.2 Ventana de salida de entidad y recurso que lo transporta.

En el primer campo se especifica la entidad que saldrá, para el caso siempre permanecerá constante y consecuente con la entidad de entrada; el campo destino hace referencia al nodo al que debe dirigirse una vez terminada la operación.

Luego se tiene el campo de regla de ruta, en el cual se establece como las políticas de las operaciones en una ventana espacial se ejecutarán a lo largo de la simulación.

Esta ventana permite programar de manera sencilla cualidades como se ejecutará la operación y quien, como por ejemplo: procesar hasta llenar, por turno, Disponible y otros comandos para hacer la simulación más realista.




Figura 5.7.3 Regla de ruta.

Por último se asigna el campo de lógica de movimiento el cual permite decirle a PROMODEL® como se llevará la entidad desde el proceso actual hasta la siguiente operación, este campo requiere líneas de programación que especifiquen lo que hará cada uno de los recursos, por tal motivo internamente existe un asistente que ayuda a escribir este comando, primero se tiene la pantalla de operación donde se escribirá el código, para usar el asistente se debe hacer clic en el ícono de martillo para activarlo y parecerá una ventana con los posibles comandos a utilizar, estos se encuentran en inglés.

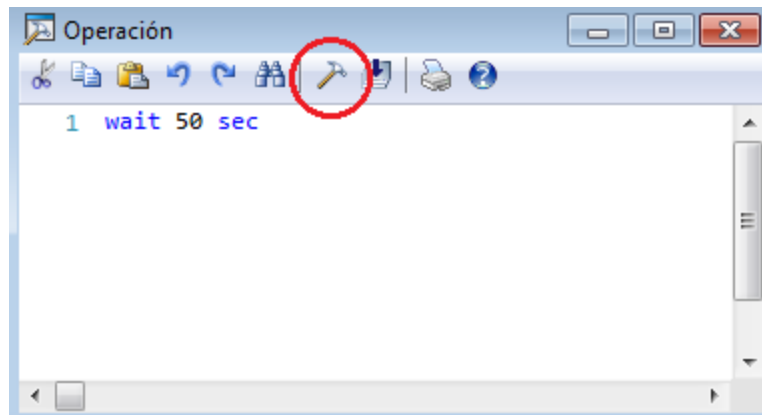


Figura 5.7.4 Estructura de programación en Promodel®.

Inmediatamente después tendremos la ventana del asistente de comandos en la que se asignará el comando: `Move With AGV1 Then Free`, este puede construirse mediante la ventana del asistente y se hace clic en pegar, una vez se tenga creado el comando puede copiarse y pegarse en otros procesos para repetir el comando lógico de movimiento.

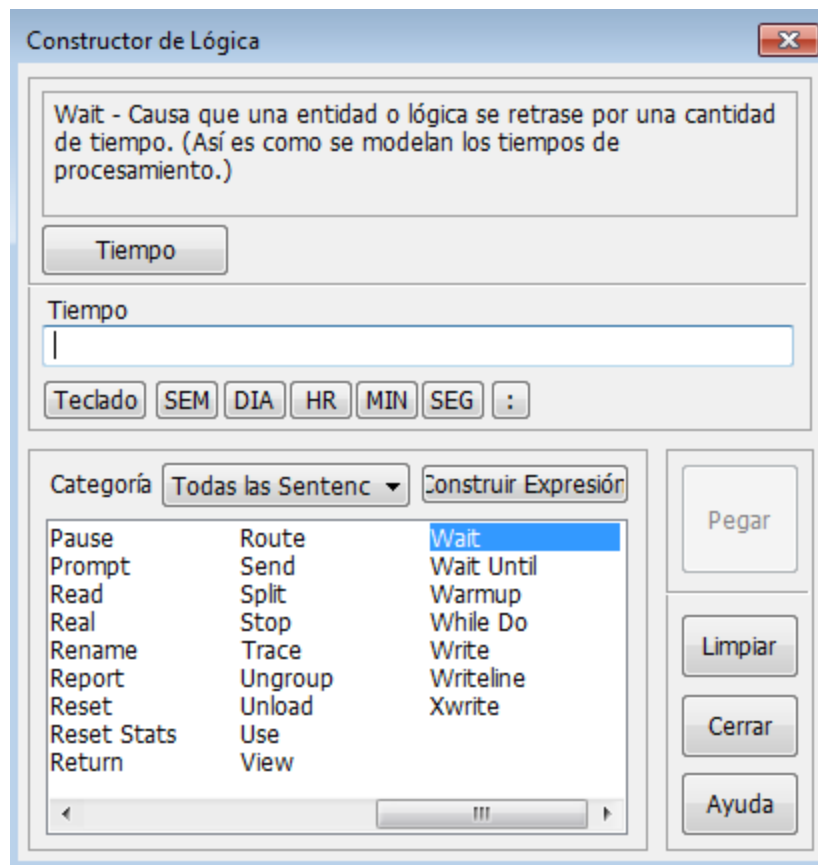


Figura 5.7.5 asistente para comandos lógicos.

Este proceso se realiza describiendo cada una de las rutas y especificando los tiempos de flujo de material junto con los de operación.

Una vez terminados de introducir todos los procesos la pantalla de Layout tendrá las rutas, las locaciones y los procesos demarcados por vectores a lo largo de los recorridos. Cabe aclarar que los vectores pueden atravesar locaciones pasando sobre ellas ya que no son una ruta sino la descripción del proceso al mostrar gráficamente la locación de origen y la de destino.

Hasta aquí se ha implementado los datos teóricos en el programa de PROMODEL® para correr la simulación.

El anterior proceso se repite para simular el cargue con operarios y con montacargas utilizando una política de primeros en entrar primeros en salir (First in First out), de la misma manera que con AGV, los dos modelos construidos en PROMODEL® serán:

Simulación Con Montacargas

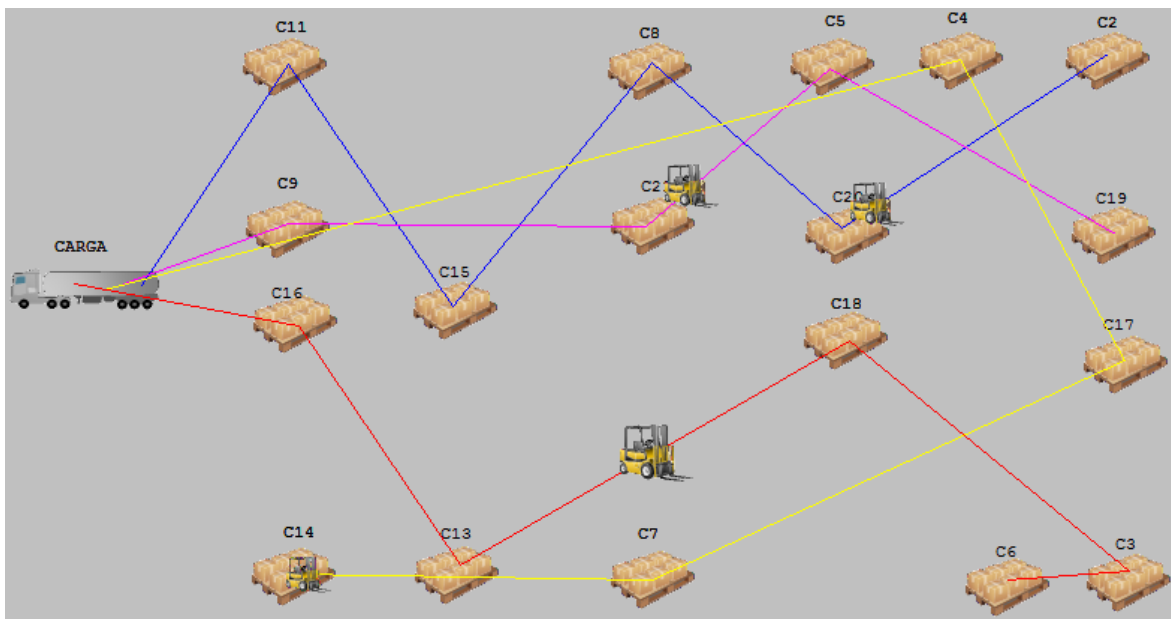


Figura 5.7.6 Simulación con montacargas.

Simulación Con AGV

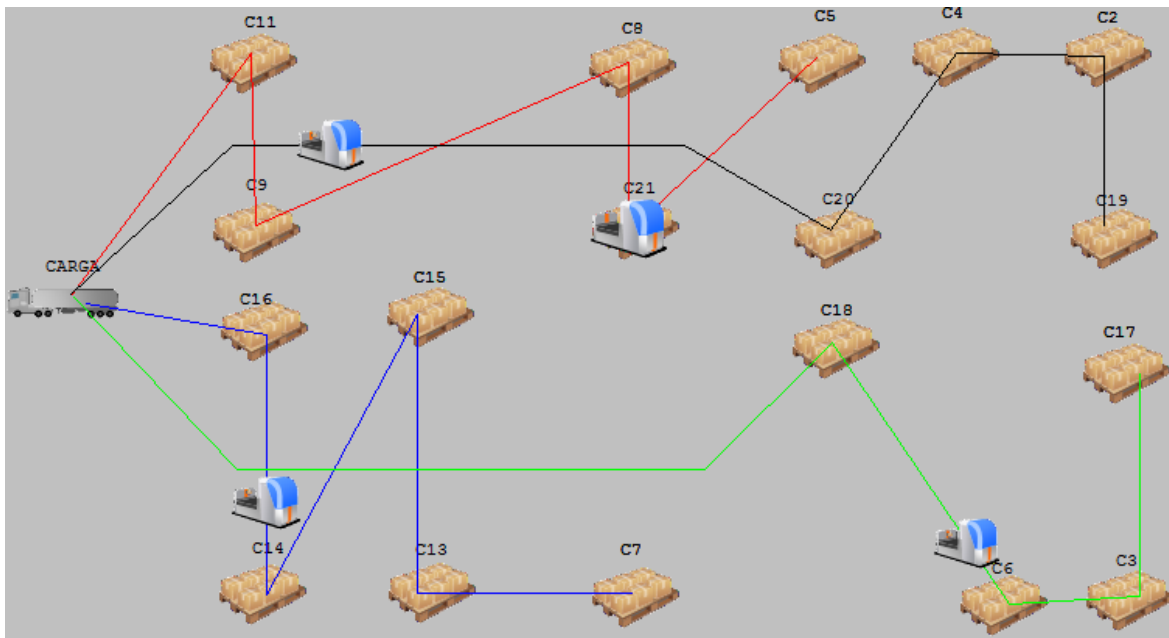


Figura 5.7.7 Simulación con AGV.

5.8 Análisis de resultados.

En el software PROMODEL® se corren las simulaciones para un lapso de 8 horas que corresponde a un turno laboral para los dos escenarios, luego se obtienen los datos estadísticos, los cuales son presentados en el anexo 3 como respaldo a los gráficos que se revisaran en el presente capítulo.

PROMODEL® cuenta con un software llamado Output Viewer, este software permite ver los gráficos estadísticos de la simulación que se corrió; aún con estos gráficos el anexo 3 presenta las tablas con la respectiva información ya que también se exportan a Excel si se llega a necesitar un análisis estadístico adicional. La primer información suministrada por la simulación y el software estadístico es la capacidad de los estados de la locación, este gráfico muestra el estado de cada uno de las locaciones, es decir si en cada uno de los puntos de almacenamiento de las mercancías que porcentaje de uso del espacio se tiene, las tres situaciones que se presentan son: vacío, parcialmente ocupado y lleno.

Estados de ocupación de las locaciones

Montacargas

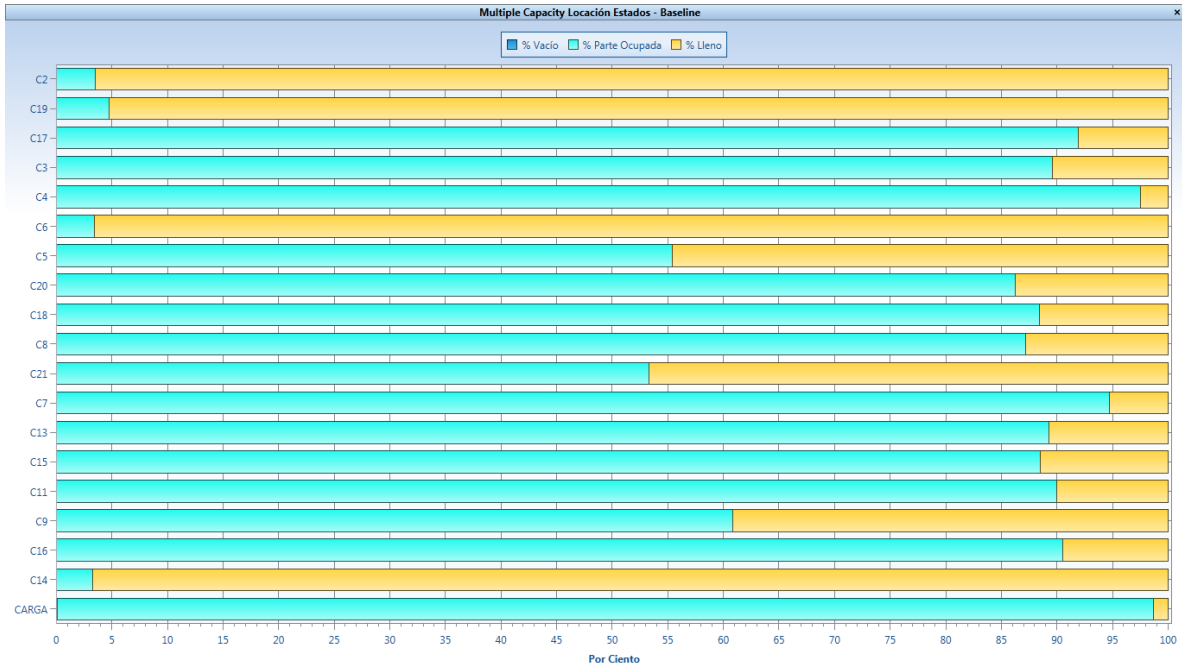


Figura 5.8.1 Estado de ocupación de las locaciones montacargas.

AGV

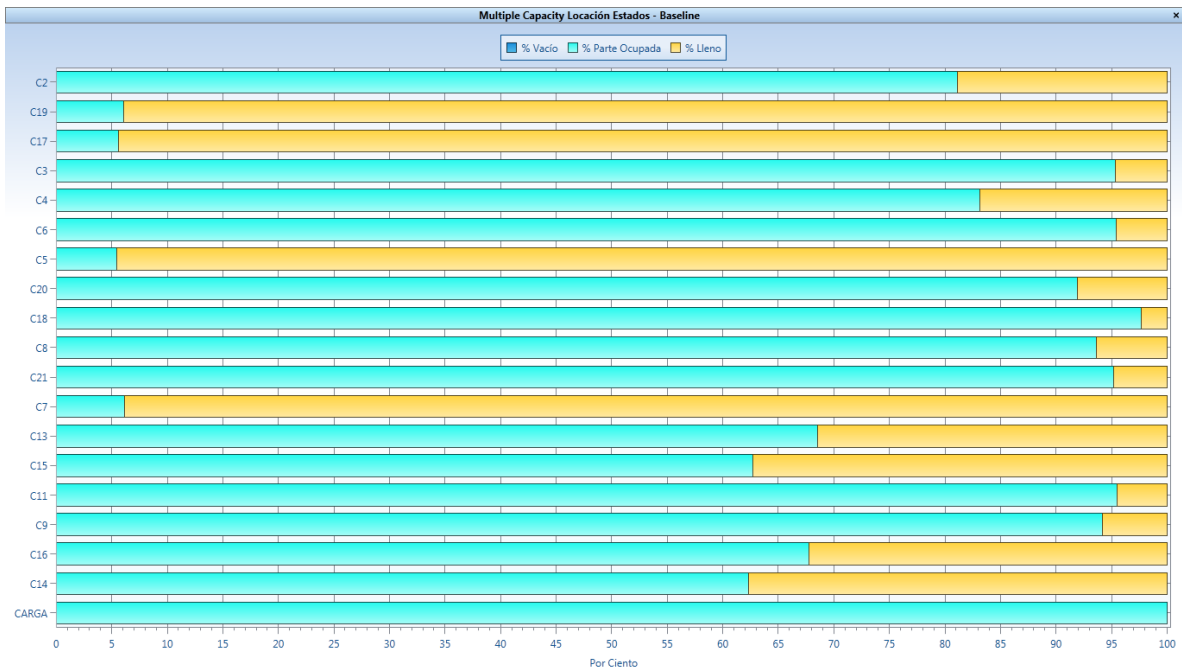


Figura 5.8.2 Estado de ocupación de las locaciones AGV.

Aunque a simple vista los gráficos para los dos escenarios lucen similares, hay sutiles diferencias que son de importancia en el análisis, si se observa la primera locación que aparece designada como C2, esta es una de las locaciones más lejanas a la zona de carga, usando AGV se tiene un menor porcentaje de esta locación llena que en la que es para montacargas tradicional, en la gráfica de montacargas tradicional tiene una mayor cantidad de tiempo lleno, esto quiere decir que no se mueve la referencia de producto de esta localización de acuerdo a lo organizado, este puede deberse a la ocupación de los montacargas o de los AGV, ya que en el modelo no se han evaluado las demoras por bloqueos o cruces entre los mismos, finalmente el si se analiza la locación de carga esta nunca debe tener un lleno como tal debido a que cuando se llena el camión transportador sale del almacén, en el caso del escenario con AGV se observa que nunca hay un porcentaje de tiempo en el que esté lleno, mientras que con montacargas existe una pequeña fracción amarilla que indica un llenado lo cual permite inferir que una vez terminado de llenar existe una cola saliendo de la locación, aunque es mínima, esta no debería existir[3].

Se puede soportar también la información analizada anteriormente en un gráfico de barras que solo indique el porcentaje de ocupación de cada una de las respectivas locaciones, en las cuales la locación donde se encuentra el camión para cargar siempre debe estar ocupada, mientras que las otras locaciones se ocuparan en función de la demanda y el tiempo que le toma a cada uno de los montacargas o AGV en recoger la referencia de producto, aunque el modelo de montacargas se simulo bajo la política de FIFO para inventarios se tuvo en cuenta que los montacargas no atendieran la misma locación, con el fin de no complicar la simulación con colas y demoras por las mismas, la única locación donde se puede presentar esta situación es en la locación de carga.

AGV

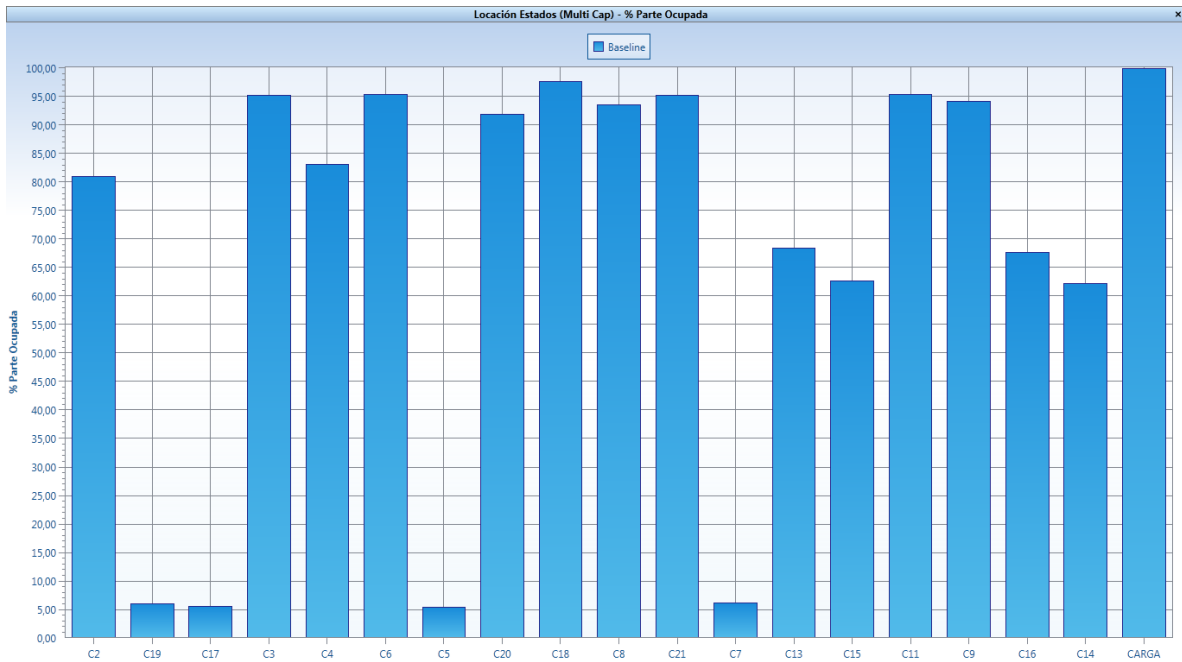


Figura 5.8.3 Porcentaje de Ocupación AGV.

Montacargas

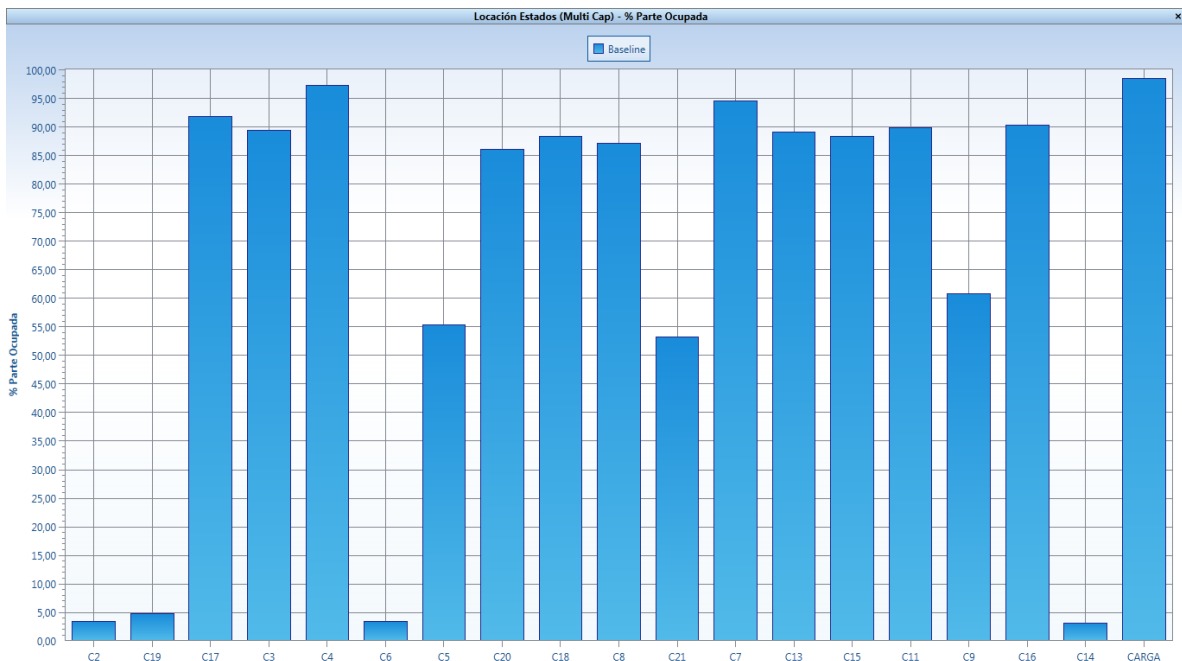


Figura 5.8.4 Porcentaje de Ocupación Montacargas.

Los dos gráficos anteriores solo muestran el porcentaje de ocupación de cada una de las locaciones en el sentido de cuanta capacidad de almacenamiento se utiliza, mostrando los mismos resultados previamente vistos.

Utilización de Locaciones.

Este gráfico muestra el porcentaje de utilización con respecto de cada una de las locaciones, es diferente del anterior ya que el anterior mide la capacidad de almacenamiento utilizada mientras que este gráfico presenta cuantas veces es visitada la localización para cumplir con los requisitos de demanda para cumplir con los envíos, hay referencias de producto que por su demanda tienen solamente una locación asignada para su almacenamiento mientras que otras referencias de producto con una demanda alta tienen asignadas varias locaciones para almacenar y despachar está determinada referencia de producto, por lo cual el porcentaje en que es utilizada una locación por los Montacargas o AGV debe ser alta lo cual es medido a continuación.

Montacargas

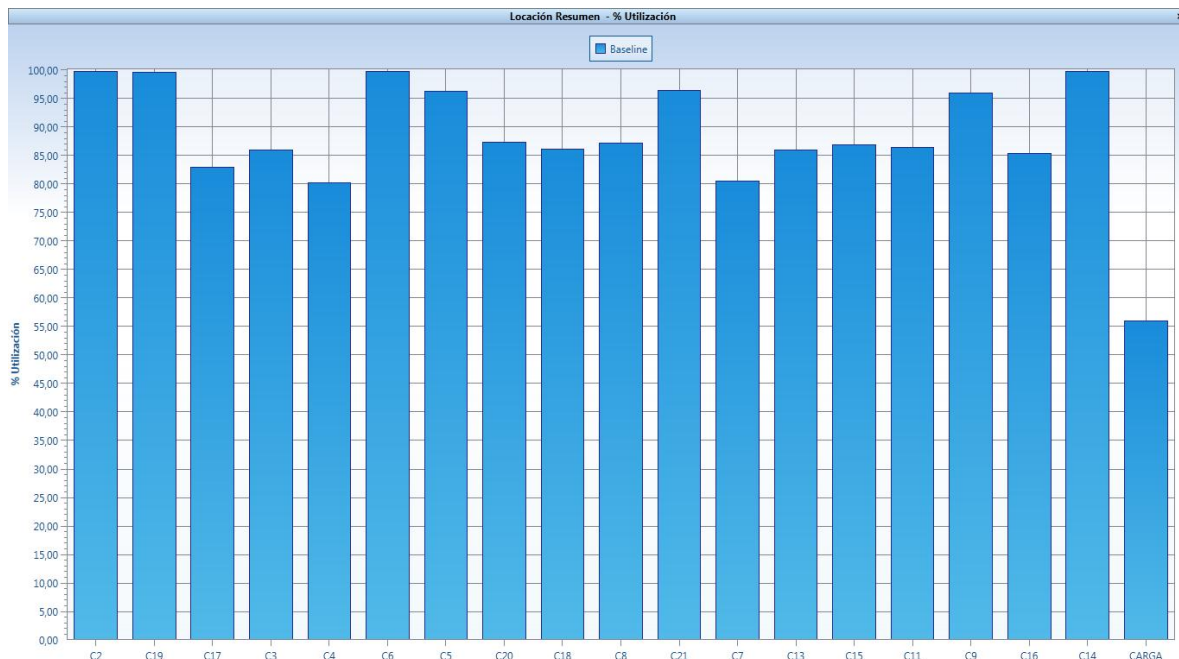


Figura 5.8.5 Porcentaje de Ocupación montacargas.

AGV

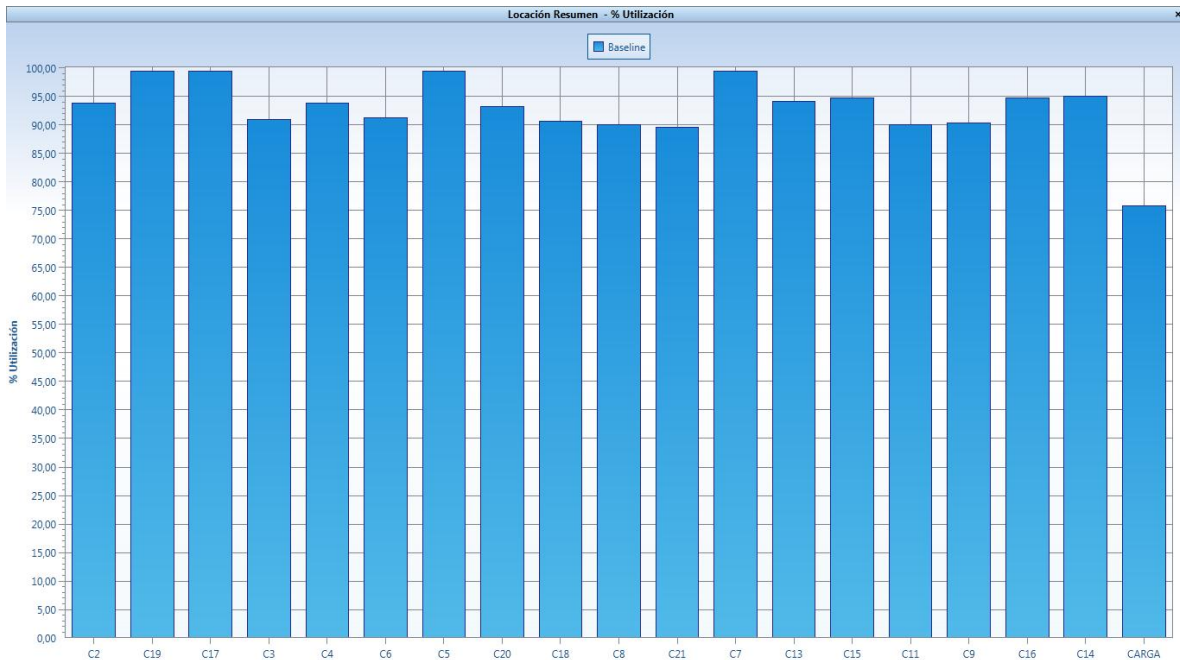


Figura 5.8.6 Porcentaje de utilización AGV.

Se puede apreciar que la eficiencia de trabajo en la locación de carga donde converge la ruta es mayor con el AGV en comparación con el montacargas, aunque es mayor no es la deseada debido a la falta de modelación de teoría de colas en el proceso de cargue, en otras palabras hay una demora debido a las filas ocupadas dentro de esta locación, se ve un aumento en la utilización de todas las locaciones comparadas con la utilización por parte de los montacargas, evidenciando una mayor eficiencia del sistema utilizando AGV con su respectivo ruteo de carga, la simulación solo incluye el cargue para despacho de las mercancías que tiene el principal interés de estudio, si se combinara con el recibo de mercancías las diferencias de rendimiento serían aún mayores.

Estado de los recursos

El siguiente gráfico representa en que porcentaje los AGV o montacargas que son los recursos usados para el proceso están realizando el transporte de las mercancías, cuando está haciendo un viaje para iniciar un servicio, cuando está estacionado o el caso de estar inactivo. Debido en que ambos escenarios solo usaron 4 recursos sean montacargas o AGV el grado de utilización es alta pero no se puede evitar los vehículos ociosos en ambos casos o el estar estacionados esperando el servicio

en la localización de carga, pero se evidencia un menor porcentaje de estacionamiento y ocio con el sistema de AGV que con los montacargas.

Montacargas

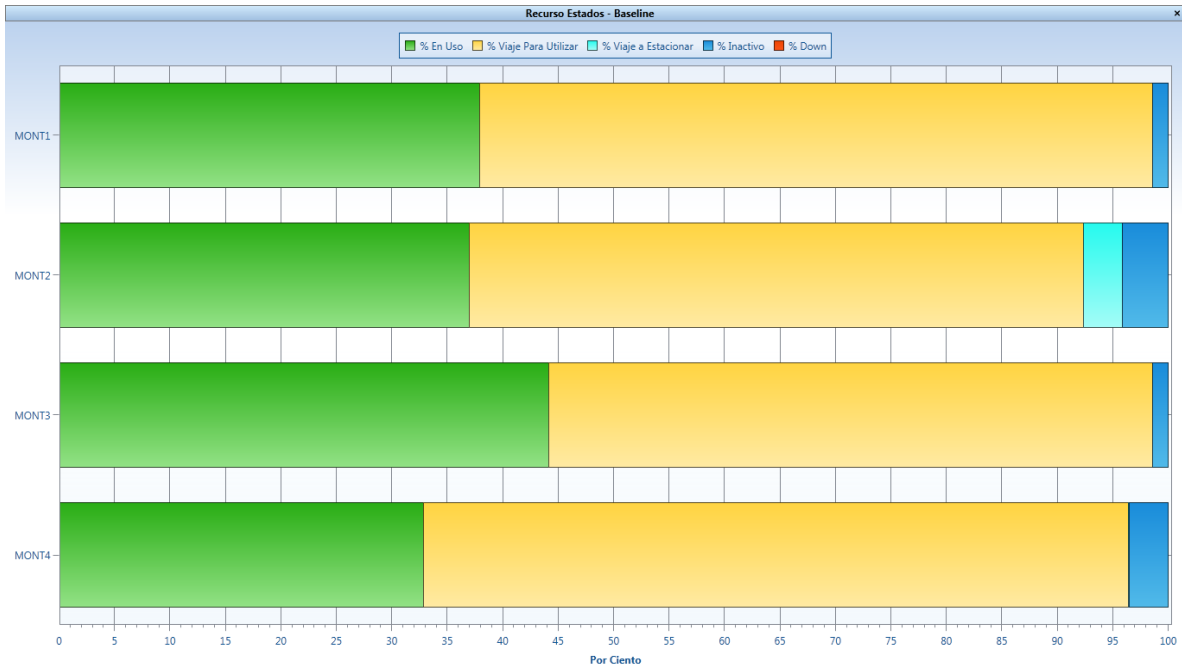


Figura 5.8.7 Porcentaje de utilización AGV.

AGV

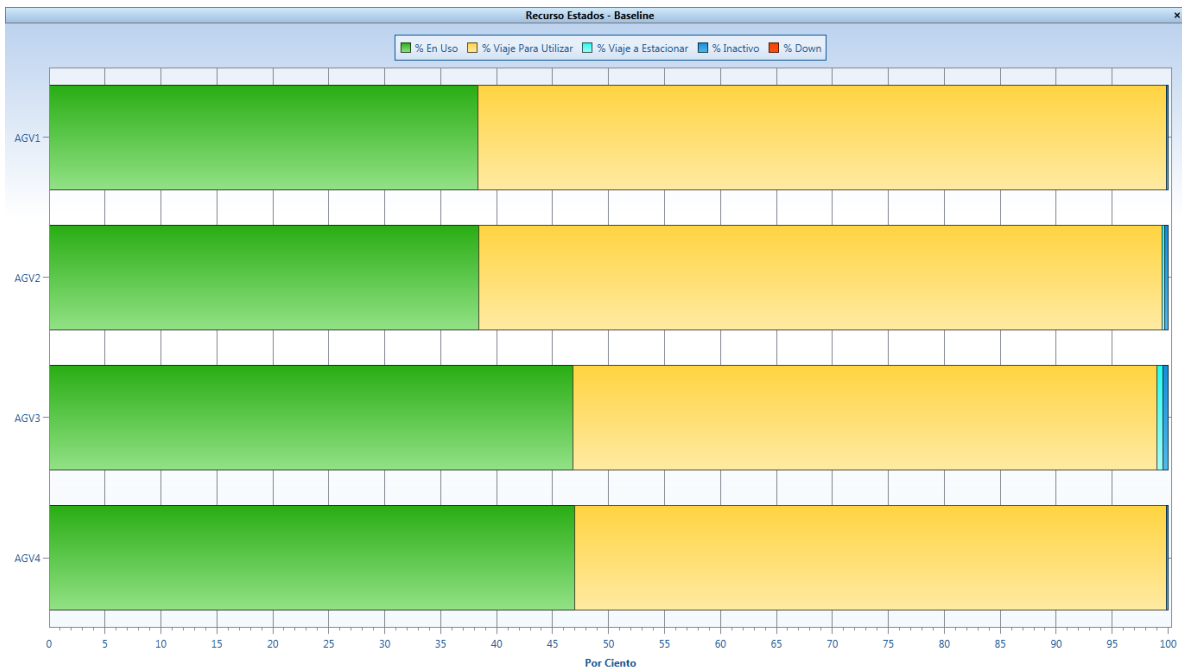


Figura 5.8.8 Porcentaje de Ocupación AGV.

Este es el gráfico más representativo para el presente trabajo que pretende evaluar la eficiencia de implementar un sistema AGV, el resultado es significativo, ya que la utilización óptima de cada uno de los vehículos es mayor y eficiente como se puede apreciar en los gráficos anteriores; esto también se puede apreciar si solo se observa los gráficos de uso de los AGV y montacargas llegando a la misma conclusión.

Histograma

Los presentes histogramas son referentes a la simulación y representa la generación de cada uno de los procesos varias veces para sacar los valores de la repetición del proceso de cargue varias veces, muestra el porcentaje de tiempo en que los datos cayeron dentro de un determinado rango de valores para la simulación de cada uno de los escenarios planteados.

AGV

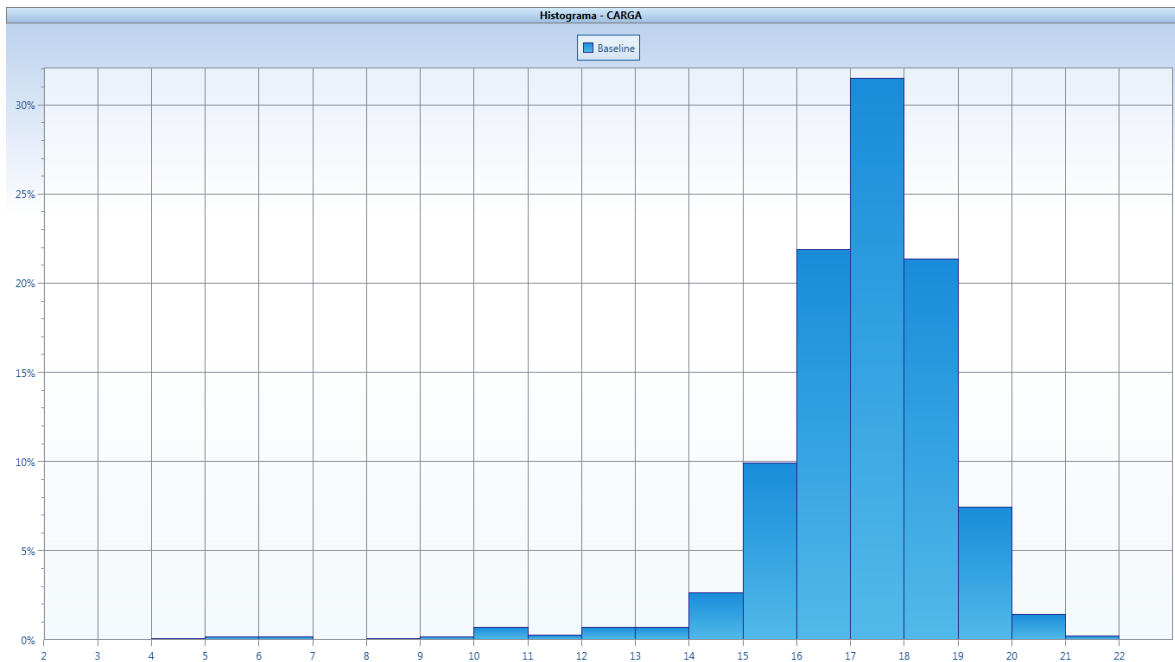


Figura 5.8.9 Histograma de generación de valores de Carga para AGV.

Montacargas

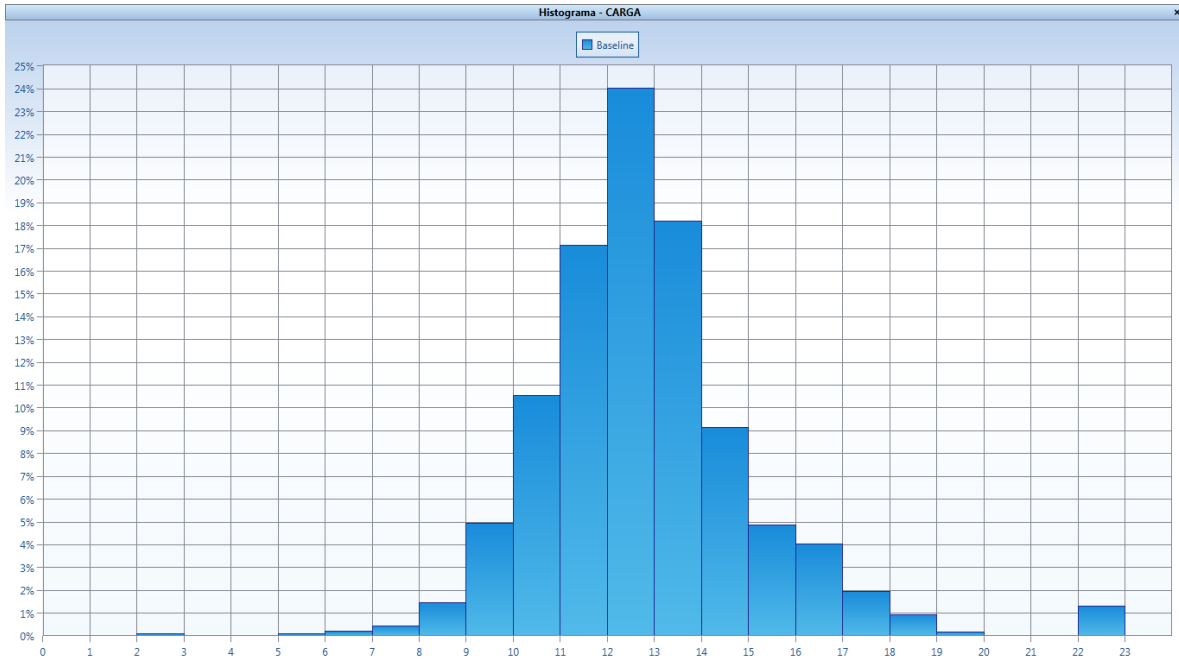


Figura 5.8.10 Histograma de generación de valores de Carga para montacargas.

Se puede apreciar que aunque cambian los intervalos de valores la distribución de las frecuencias de los datos generados por computador obedecen a una distribución normal en los dos escenarios, en este caso solo se aprecia para localización de carga, este mismo histograma puede ser generado para cada una de las locaciones especificadas dentro de proceso; los datos fueron generados por procesos matemáticos y estadísticos internos que garantizan la correcta simulación arrojando los resultados previamente estudiados, aunque para este estudio se utilizaron valores de tiempo determinísticos calculados en el capítulo previo podría volver a correrse la simulación no incluyendo valores de tiempo precisos, sino valores de tiempo estadísticos, es decir generados mediante números aleatorios, seleccionando una distribución estadística y estableciendo una desviación estándar para cada una de las locaciones, lo cual podría usarse en futuros estudios de tipo probabilístico.

Según los datos obtenidos es apreciable que el rendimiento de un sistema de AGV es más eficiente que con montacargas tradicionales como se esperaba.

6 CONCLUSIONES

I Se comparó un proceso de cargue de mercancías en un almacén de despacho, bajo unas situaciones y características controladas como lo son: la cantidad y tipo de mercancías, el tamaño del almacén, una demanda determinística, la distribución de los productos dentro del almacén, el tiempo de atención a cada uno de los nodos de almacenamiento, la capacidad de carga de cada uno de los vehículos y una velocidad promedio constante dentro del almacén, todas estas variables y parámetros se mantuvieron iguales para los dos escenarios simulados (con montacargas tradicionales y con AGV); la única variación entre los escenarios fue el enrutamiento mediante VRPTW para el sistema con AGV que permitió un desarrollo de la operación, según las estadísticas arrojadas por la simulación, con una eficiencia en tiempo de uso de los vehículos en el que se evidenció una mejora del 8.2% aplicando el sistema de AGV, se disminuyeron los tiempos muertos en el proceso en un 5.3% y minimizando la distancia recorrida dentro del almacén y la ocupación de las locaciones de almacenaje como se pudo ver ya que con montacargas el índice de ocupación se encontró entre el 70% y el 80%, mientras que con los AGV se logró superar el 90% de la misma.

Se puede reorganizar el proceso a pesar de su complejidad permitiendo ser flexible en cambios, recalculando las principales variables del sistema. Para la escala manejada en el presente trabajo la eficiencia del sistema AGV fue significativa sobre el sistema tradicional permitiendo inferir que en un proceso de mayores dimensiones la eficiencia será mucho mayor con AGV que con montacargas tradicional.

II Actualmente las tecnologías que están al alcance de las organizaciones permiten una gran variedad de alternativas para sistematizar y optimizar operaciones, puede conseguirse software y hardware incluso sobre las medidas de las necesidades de las empresas para desarrollar procesos específicos que permitan un incremento considerable de la eficiencia de las mismas, sin embargo la implementación y utilización de este tipo de tecnologías requiere de personal altamente cualificado al grado de maestría y doctorado para su correcto diseño y funcionamiento.

III Se logró plantear un proceso logístico de almacenamiento y cargue de mercancías, evaluando todas las variables posibles: cantidad, dimensiones de peso y volumen, unitarización por pallet, embalaje, pedidos según la demanda, forma de almacenaje, medidas de bodegas y estanterías,

incluyéndolas en la optimización del proceso al planear el despacho de mercancías, asociando los parámetros y variables al proceso.

IV Durante el desarrollo del diseño del sistema con AGV se aplicaron modelaciones matemáticas complejas, programación en GAMS y simulación por computador, las cuales fueron ejecutadas correctamente pero se evidencio que la mayor dificultad esta en determinar cuáles son los pasos que se deben desarrollar sistemáticamente, en toda la literatura e investigaciones recientes no hay un proceso secuencial que pueda seguirse, la implementación de un sistema de AGV no tiene unos pasos claramente definidos y por consiguiente los desarrolladores deben evaluar cuáles son las variables específicas de cada problema, resolverlas y tomar las decisiones específicas correspondientes para cada situación, por lo cual no se puede generalizar los pasos para implementar un sistema de AGV.

V. En la literatura hay suficientes algoritmos matemáticos de enrutamiento de vehículos según las características de cada problema, aunque la aplicación requiere personal altamente cualificado, no fue problema aplicar VRPTW, programarlo y correrlo para resolver la forma en que los AGV van a cargar el camión de despachos.

VI. Se alcanzó la mayoría de los objetivos propuestos para este trabajo con la salvedad del cuarto objetivo ya que no es posible proponer una secuencia de pasos generales para implementar un sistema de AVG, solo se puede hablar de tener unas variables principales en cuenta durante el desarrollo. Decidir cuáles son las más relevantes o cuales no dependerá de cada situación específica y las decisiones será de nivel estratégico, táctico y operativo.

VII. Después de la simulación y análisis lo siguiente consistirá en la implementación del sistema de AGV en un entorno productivo real, lo que implicará ver si la cantidad de variables que se tuvieron en cuenta fueron las indicadas o si falta incluir alguna otra en la implementación real, lo que conllevará a estudios de costos vs beneficios debido a que son tecnologías emergentes y su costo aún continua siendo el mayor impedimento para su implementación, pero puede planearse y medir la eficiencia como se evidencio en el presente trabajo para evaluar la relación de costo beneficio.

7 Bibliografía.

- [1] T. Le-Anh and M. B. M. De Koster, "A review of design and control of automated guided vehicle systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 171, no. 1, pp. 1–23, May 2006.
- [2] S. Berman, E. Schechtman, and Y. Edan, "Evaluation of automatic guided vehicle systems," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 25, no. 3, pp. 522–528, 2009.
- [3] M. Scholz, S. Kreitlein, C. Lehmann, J. Böhner, J. Franke, and R. Steinhilper, "Integrating Intralogistics into Resource Efficiency Oriented Learning Factories," in *Procedia CIRP*, 2016, vol. 54, pp. 239–244.
- [4] K. S. and S. S. K. Kumagai, "Maximum transportation throughput of automated guided vehicle system by use of models of traffic capacity and traffic capacity consumption," *SICE Int. Symp. Control Syst. (SICE ISCS)*, vol. único, pp. 1–8, 2017.
- [5] E. H. Grosse, C. H. Glock, and W. P. Neumann, "Human factors in order picking: a content analysis of the literature," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 5, pp. 1260–1276, Mar. 2017.
- [6] C. N. de P. Económica., *Documento Conpes 3866*. 2016, p. 124.
- [7] V. Digani, L. Sabattini, C. Secchi, and C. Fantuzzi, "Ensemble Coordination Approach in Multi-AGV Systems Applied to Industrial Warehouses," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 922–934, Jul. 2015.
- [8] S. Zamiri Marvizadeh and F. F. Choobineh, "Entropy-based dispatching for automatic guided vehicles," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 7543, no. 11, pp. 3303–3316, 2014.
- [9] G. Iassinovskaia, S. Limbourg, and F. Riane, "The inventory-routing problem of returnable transport items with time windows and simultaneous pickup and delivery in closed-loop supply chains," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 183, pp. 570–582, 2017.
- [10] P. Beinschob, M. Meyer, C. Reinke, V. Digani, C. Secchi, and L. Sabattini, "Semi-automated map creation for fast deployment of AGV fleets in modern logistics," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 87, pp. 281–295, 2017.
- [11] Q. Lin, L. Liu, D. Wang, and Y. Li, "Process Optimization for Operating Room Base on Pro-Model," in *2015 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT (IEEM)*, 2015, pp. 1332–1336.
- [12] H. J. Carlo, I. F. A. Vis, and K. J. Roodbergen, "Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme," *European Journal of Operational Research*, vol. 236, no. 1, pp. 1–13, Jul-2014.

- [13] M. Nageswararao, K. Narayanarao, and G. Ranagajanardhana, "Simultaneous Scheduling of Machines and AGVs in Flexible Manufacturing System with Minimization of Tardiness Criterion," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 1492–1501, 2014.
- [14] D. Cinar, J. A. Oliveira, Y. I. Topcu, and P. M. Pardalos, "Scheduling the truckload operations in automated warehouses with alternative aisles for pallets," *Appl. Soft Comput.*, vol. 52, pp. 566–574, 2017.
- [15] F. Chen, H. Wang, Y. Xie, and C. Qi, "An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse," *J. Intell. Manuf.*, vol. 27, no. 2, pp. 389–408, Apr. 2016.
- [16] J. Li, M. Moghaddam, and S. Y. Nof, "Dynamic storage assignment with product affinity and ABC classification—a case study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 84, no. 9–12, pp. 2179–2194, Jun. 2016.
- [17] M. E. Fontana and V. S. Nepomuceno, "Multi-criteria approach for products classification and their storage location assignment," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9–12, pp. 3205–3216, Feb. 2017.
- [18] M. Seelinger and J.-D. Yoder, "Automatic visual guidance of a forklift engaging a pallet," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 54, pp. 1026–1038, 2006.
- [19] Research and Markets, "Global Automated Guided Vehicle (AGV) Market 2017-2021," *Research and Market*, 2017. [Online]. Available: http://www.researchandmarkets.com/research/55lpfj/global_automated. [Accessed: 04-May-2017].
- [20] ResearchinChina.com, "Global and China AGV (Automated Guided Vehicle/ Mobile Robot) Industry Report, 2017-2021," *Research in China*, 2017. .
- [21] L. Schulze and A. Wullner, "The Approach of Automated Guided Vehicle Systems," 2006 *IEEE Int. Conf. Serv. Oper. Logist. Informatics*, pp. 522–527, Jun. 2006.
- [22] D. Herrero, J. Villagra, and H. Martinez, "Self-Configuration of Waypoints for Docking Maneuvers of Flexible Automated Guided Vehicles," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 470–475, Apr. 2013.
- [23] N. Boysen, D. Briskorn, and S. Emde, "Sequencing of picking orders in mobile rack warehouses," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 259, pp. 293–307, 2016.
- [24] I. F. A. Vis, "Survey of research in the design and control of automated guided vehicle

- systems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 170, no. 3, pp. 677–709, 2006.
- [25] H. Martínez-Barberá and D. Herrero-Pérez, “Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 4, pp. 296–311, 2010.
- [26] G. ; Seebacher, H. & Winkler, and Oberegger, “IN-PLANT LOGISTICS EFFICIENCY VALUATION USING DISCRETE EVENT SIMULATION,” *Int j simul Model*, vol. 14, no. 1, pp. 60–70, 2015.
- [27] S. Emde and N. Boysen, “Optimally locating in-house logistics areas to facilitate JIT-supply of mixed-model assembly lines,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 135, no. 1, pp. 393–402, 2012.
- [28] G. Zhang, T. Nishi, S. D. O. Turner, K. Oga, and X. Li, “An integrated strategy for a production planning and warehouse layout problem: Modeling and solution approaches,” *Omega*, vol. 68, pp. 85–94, 2016.
- [29] D. Das, M. B. Kar, A. Roy, and S. Kar, “Two-warehouse production inventory model for a deteriorating item with time-varying demand and shortages: a genetic algorithm with varying population size approach,” *Optim. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 889–907, Dec. 2014.
- [30] Z. Zhao, J. Fang, G. Q. Huang, and M. Zhang, “Location Management of Cloud Forklifts in Finished Product Warehouse,” *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 342–370, Apr. 2016.
- [31] M. H. Khalili and F. Zahedi, “Modeling and simulation of a mattress production line using ProModel,” in *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference - Simulation: Making Decisions in a Complex World, WSC 2013*, 2013, pp. 2598–2609.
- [32] E. Cardarelli, V. Digani, L. Sabattini, C. Secchi, and C. Fantuzzi, “Cooperative cloud robotics architecture for the coordination of multi-AGV systems in industrial warehouses,” *Mechatronics*, vol. 45, pp. 1–13, Aug. 2017.
- [33] R. Guo and T. Tang, “A simulation model for pedestrian flow through walkways with corners,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 21, no. 1, pp. 103–113, 2012.
- [34] J. Chen, Y. Wang, Z. Chen, and Y. Zou, “Sequence-guided siamese neural network for video summarization of unmanned aerial vehicles,” in *2017 22nd International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 2017, pp. 1–5.
- [35] L. Sabattini *et al.*, “The PAN-Robots Project: Advanced Automated Guided Vehicle Systems for Industrial Logistics,” *IEEE Robot. Autom. Mag.*, pp. 1–1, 2017.
- [36] J. Bacik, F. Durovsky, M. Biroš, K. Kyslan, D. Perdukova, and P. Sanjeevikumar, “Pathfinder –

- Development of Automated Guided Vehicle for Hospital Logistics,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2017.
- [37] Y. Li, N. Lyu, Z. Li, and Z. Huang, “Research on the longitudinal guide and control system of automated cone placement and retrieval vehicle for the freeway traffic accident scene isolation,” in *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 2017, pp. 377–383.
- [38] F. Turki, M. Detweiler, and T. Vossnagen, “Three phase high power contactless power supply for harbour automated guided vehicles,” in *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2017, pp. 169–174.
- [39] H. A. Taha, *Investigación de Operaciones.*, PEARSON ED. México, 2012.
- [40] T. Mercy, R. Van Parys, and G. Pipeleers, “Spline-Based Motion Planning for Autonomous Guided Vehicles in a Dynamic Environment,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, pp. 1–8, 2017.
- [41] H. H. Nguyen, D. H. Kim, C. K. Kim, H. Yim, S. K. Jeong, and S. B. Kim, “A Simple Path Planning for Automatic Guided Vehicle in Unknown Environment,” in *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2017, pp. 337–341.
- [42] J. Kim, S. Woo, and J. Kim, “Lidar-guided autonomous landing of an aerial vehicle on a ground vehicle,” in *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2017, pp. 228–231.
- [43] E. Kaoud, M. A. El-Sharief, and M. G. El-Sebaie, “Scheduling problems of automated guided vehicles in job shop, flow shop, and container terminals,” in *2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 2017, pp. 60–65.
- [44] J.-H. Cho and Y.-T. Kim, “Design of Autonomous Logistics Transportation Robot System with Fork-Type Lifter,” *Int. J. FUZZY Log. Intell. Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 177–186, Sep. 2017.
- [45] S. Lu, C. Xu, R. Y. Zhong, and L. Wang, “A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 44, pp. 179–190, Jul. 2017.
- [46] S. Yang, Z. Wang, and H. Zhang, “Kinematic model based real-time path planning method with guide line for autonomous vehicle,” in *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 2017, pp. 990–994.
- [47] M.-J. Han, C.-Y. Kuo, and N. Y.-C. Chang, “Vision-based range finder for automated guided vehicle navigation,” in *2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*

(ARSO), 2016, pp. 146–151.

- [48] K. Osman, J. Ghommam, and M. Saad, “Vision Based Lane Reference Detection and Tracking Control of an Automated Guided Vehicle,” *2017 25th Mediterr. Conf. Control Autom.*, pp. 595–600, Jul. 2017.

8 ANEXO 1

Referencia B

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 3

Paletas factibles 3 Número de cajas factibles 1

Número de paleta 0003 Número de cajas estándar N/A

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa 904/910
 Ancho int./externo de la caja 179/185
 Altura de caja int./externa 562/575
 Peso de caja llena 4,65

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta
 Cajas por ancho de paleta
 Cajas por altura de paleta
 Cajas por nivel
 Total de cajas por paleta

1
 6
 6
 6

Paleta Eficiencia de área 84,41%
 Paleta Eficiencia en volumen 46,00%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1095	1200
Ancho carga	925	1000
Alt. carga	575	720
Peso carga	28	58
Volumen de la carga	0,58 m ³	0,86 m ³

Agrandar cajas 910 X 185 X 575

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Anch...	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	910	185	575	4,65	1,68	1	5	1	5	5	910	925	575	53	70,15%	38,23%	1
0002	910	185	575	4,65	1,68	6	1	1	6	6	1110	910	575	58	84,17%	45,88%	2
0003	910	185	575	4,65	1,68	-	-	1	6	6	1095	925	575	58	84,41%	46,00%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación B Quick Pallet Maker®

Referencia C

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 10

Paletas factibles: 3 Número de cajas factibles: 1
 Número de cajas estándar: N/A

Número de paleta: 0002

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa: 679/685
 Ancho int./externo de la caja: 554/560
 Altura de caja int./externa: 117/130
 Peso de caja llena: 2.39

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta: 2
 Cajas por ancho de paleta: 1
 Cajas por altura de paleta: 8
 Cajas por nivel: 2
 Total de cajas por paleta: 16

Paleta Eficiencia de area: 63.93%
 Paleta Eficiencia en volumen: 63.02%

Optimizar Ir

Int: 1120 x 685 x 1040
 Ext: 1200 x 1000 x 1185

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	685	560	130	2.39	1.72	1	1	8	1	8	685	560	1040	49	31.97%	31.51%	1
0002	685	560	130	2.39	1.72	2	1	8	2	16	1120	685	1040	68	63.93%	63.02%	2
0003	685	560	130	2.39	1.72	-	-	8	2	16	1120	685	1040	68	63.93%	63.02%	10

Agrandar cajas: 685 X 560 X 130

Figura Anexo 1 Solución estibación C Quick Pallet Maker®

Referencia D

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 8

Paletas factibles: 2 Número de cajas factibles: 1
 Número de cajas estándar: N/A

Número de paleta: 0001

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa: 1184/1190
 Ancho int./externo de la caja: 234/240
 Altura de caja int./externa: 227/240
 Peso de caja llena: 11.40

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta: 1
 Cajas por ancho de paleta: 4
 Cajas por altura de paleta: 4
 Cajas por nivel: 4
 Total de cajas por paleta: 16

Paleta Eficiencia de area: 95.20%
 Paleta Eficiencia en volumen: 86.63%

Optimizar Ir

Int: 1190 x 960 x 212
 Ext: 1200 x 1000 x 240

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	1190	240	240	11.40	1.38	1	4	4	4	16	1190	960	960	212	95.20%	86.63%	1
0002	1190	240	240	11.40	1.38	-	-	4	4	16	1190	960	960	212	95.20%	86.63%	10

Agrandar cajas: 1190 X 240 X 240

Figura Anexo 1 Solución estibación D Quick Pallet Maker®

Referencia E

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 1

Paletas factibles 3

Número de cajas factibles 1

Número de cajas estándar N/A

Núm...	Longit...	Ancho	Altura	L	W	H
0001	430	105	355	0	0	0

Número de paleta 0003

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa 424/430
 Ancho int./externo de la caja 99/105
 Altura de caja int./externa 342/355
 Peso de caja llena 0.77

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta 2
 Cajas por ancho de paleta 24
 Cajas por altura de paleta 48
 Total de cajas por paleta 48

Paleta Eficiencia de area 92.53%
 Paleta Eficiencia en volumen 62.27%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1175	1200
Ancho carga	945	1000
Alt. carga	710	855
Peso carga	37	67
Volumen de la carga	0.77 m3	1.03 m3

Agrandar cajas 430 X 105 X 355

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	430	105	355	0.77	0.50	2	9	2	18	36	860	945	710	58	67.73%	45.58%	1
0002	430	105	355	0.77	0.50	11	2	2	22	44	1155	860	710	64	82.78%	55.71%	2
0003	430	105	355	0.77	0.50	-	-	2	24	48	1175	945	710	67	92.53%	62.27%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación E Quick Pallet Maker®

Referencia F.

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 2

Paletas factibles 3

Número de cajas factibles 1

Número de cajas estándar N/A

Núm...	Longit...	Ancho	Altura	L	W	H
0001	440	180	350	0	0	0

Número de paleta 0003

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa 434/440
 Ancho int./externo de la caja 174/180
 Altura de caja int./externa 337/350
 Peso de caja llena 1.33

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta 3
 Cajas por ancho de paleta 14
 Cajas por altura de paleta 42
 Total de cajas por paleta 42

Paleta Eficiencia de area 94.73%
 Paleta Eficiencia en volumen 94.28%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1160	1200
Ancho carga	980	1000
Alt. carga	1050	1195
Peso carga	56	86
Volumen de la carga	1.16 m3	1.43 m3

Agrandar cajas 440 X 180 X 350

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	440	180	350	1.33	0.67	2	5	3	10	30	880	900	1050	70	66.00%	65.69%	1
0002	440	180	350	1.33	0.67	6	2	3	12	36	1080	880	1050	78	79.20%	78.82%	2
0003	440	180	350	1.33	0.67	-	-	3	14	42	1160	980	1050	86	94.73%	94.28%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación F Quick Pallet Maker®

Referencia G.

Soluciones disponibles - Caja a paleta - Sin título 3

Paletas factibles 3

Número de cajas factibles 1

Número de cajas estándar N/A

Núm. Longit. Ancho Altura L W H

0001	355	140	300	0	0	0
------	-----	-----	-----	---	---	---

Número de paleta 0003

Información de las cajas

Longitud de caja int./externa 349/355

Ancho int./externo de la caja 134/140

Altura de caja int./externa 287/300

Peso de caja llena 0.72

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta 3

Cajas por ancho de paleta 23

Cajas por altura de paleta 69

Cajas por nivel 23

Total de cajas por paleta 69

Paleta Eficiencia de area 98.59%

Paleta Eficiencia en volumen 84.10%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1195	1200
Ancho carga	990	1000
Alt. carga	900	1045
Peso carga	50	80
Volumen de la carga	1.03 m3	1.25 m3

Agrandar cajas 355 X 140 X 300

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0001	355	140	300	0.72	0.45	3	7	3	21	63	1065	980	900	75	86.98%	74.20%	1
0002	355	140	300	0.72	0.45	8	2	3	16	48	1120	710	900	65	66.27%	56.53%	2
0003	355	140	300	0.72	0.45	-	-	3	23	69	1195	990	900	80	98.59%	84.10%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación G Quick Pallet Maker®

Referencia I

Soluciones disponibles - Empaque primario a paleta - Sin título 8

Paletas factibles 36

Número de cajas factibles 12

Número de cajas estándar N/A

Núm. Longit. Ancho Altura L W H

0002	381	226	148	3	4	1
0003	411	226	138	3	4	1
0004	336	131	283	6	1	2
0005	336	141	263	6	1	2
0006	256	171	283	2	3	2
0007	276	171	263	2	3	2
0008	226	141	388	4	1	3

Número de paleta 0021

Información de las cajas

Empaques / Caja 12

Longitud de caja int./externa 270/276

Ancho int./externo de la caja 165/171

Altura de caja int./externa 250/263

Peso de caja llena 3.72

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta 4

Cajas por ancho de paleta 25

Cajas por altura de paleta 100

Cajas por nivel 100

Total de cajas por paleta 100

Paleta Eficiencia de area 99.99%

Paleta Eficiencia en volumen 99.60%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1199	1200
Ancho carga	1000	1000
Alt. carga	1051	1196
Peso carga	372	402
Volumen de la carga	1.24 m3	1.44 m3

Total empaques primarios por paleta 1200

Agrandar cajas 276 X 171 X 263

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0020	276	171	263	3.72	0.40	7	3	4	21	84	1199	829	1051	343	82.87%	82.54%	2
0021	276	171	263	3.72	0.40	-	-	4	25	100	1199	1000	1051	402	99.99%	99.60%	10
0022	226	141	388	3.73	0.40	5	7	2	35	70	1132	989	775	291	93.32%	68.59%	1
0023	226	141	388	3.73	0.40	8	4	2	32	64	1131	905	775	268	85.32%	62.71%	2
0024	226	141	388	3.73	0.40	-	-	2	36	72	1188	989	775	298	97.96%	72.00%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación I Quick Pallet Maker®

Referencia J

Soluciones disponibles - Empaque primario a paleta - Sin título 9

Paletas factibles 39

Número de cajas factibles 13

Número de cajas estándar N/A

Información de empaque primario

Empaque Primario Longitud	200
Empaque Primario Ancho	140
Empaque Primario Altura	90
Empaque Primario Peso	0.12

Número de paleta 0030

Información de las cajas

Empaques / Caja	12
Longitud de caja int./externa	400/406
Ancho int./externo de la caja	180/186
Altura de caja int./externa	420/433
Peso de caja llena	1.90

Inf. de cajas en la paleta

Cajas/Long. de paleta	2
Cajas por ancho de paleta	15
Cajas por altura de paleta	2
Cajas por nivel	15
Total de cajas por paleta	30

Paleta Eficiencia de area 98.69%

Paleta Eficiencia en volumen 80.95%

Optimizar Ir

Dimensiones de la carga

	Sin incluir la paleta	Incluyendo la paleta
Long. carga	1185	1200
Ancho carga	999	1000
Alt. carga	865	1010
Peso carga	57	87
Volumen de la carga	0.98 m3	1.21 m3

Total empaques primarios por paleta 360

Agrandar cajas 406 X 186 X 433

Sol	L Caja	A Caja	Alt Caja	P caja	Area	CxLon	CxAnch	CxAlt	CxNiv	Total	Long. C	Ancho C	Altura C	Peso C	Ef. Area	Ef. Vol	Código
0029	406	186	433	1.90	0.75	6	2	2	12	24	1118	813	865	76	75.72%	62.11%	2
0030	406	186	433	1.90	0.75	-	-	2	15	30	1185	999	865	87	98.69%	80.95%	10
0031	406	286	283	1.93	0.80	2	3	3	6	18	813	859	848	65	58.18%	46.77%	1
0032	406	286	283	1.93	0.80	4	2	3	8	24	1145	813	848	76	77.57%	62.36%	2
0033	406	286	283	1.93	0.80	-	-	3	9	27	1145	979	848	82	93.45%	75.12%	10

Figura Anexo 1 Solución estibación J Quick Pallet Maker®

9 ANEXO 2

A) Resultados de la programación de Orden de Pedido Económico.

GAMS 24.8.4 r60966 Released Apr 10, 2017 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 10/12/17
13:16:27 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation

```

1 sets
2 i articulo / 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ,10/;
3 parameters
4 K(i) Costo pedido / 1 14600, 2 12200, 3 9200, 4 9050, 5 7100, 6 10300, 7
  6800, 8 7900, 9 8000, 10 6350/
5 D(i) Demanda / 1 4, 2 4, 3 5, 4 5, 5 16, 6 14, 7 35, 8 100, 9 200 ,10 300/
6 h(i) Costo almacenamiento / 1 3302.88, 2 4403.83, 3 1651.44, 4 1651.44, 5
  550.48, 6 629.12, 7 382.94, 8 220.19, 9 22.02,10 73.40/
7 a(i) Area requerida / 1 1, 2 1, 3 1, 4 1, 5 1, 6 1, 7 1, 8 1, 9 1, 10 1/;
8 scalar
9 E /192/;
10 variables
11 TCU;
12 positive variables
13 y(i);
14 equations
15 minTCU, espacio;
16 minTCU.. TCU=e=sum(i, (((K(i)*D(i))/(y(i)+0.1))+((h(i)*y(i))/2)));
17 espacio.. sum(i, a(i)*y(i))=l=E;
18 model EOQ /all/;
19 solve EOQ using nlp minimize TCU;
20 Display y.l;

```

COMPILATION TIME = 0.000 SECONDS 3 MB 24.8.4 r60966 WIN-VS8
GAMS 24.8.4 r60966 Released Apr 10, 2017 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 10/12/17
13:16:27 Page 2

General Algebraic Modeling System
Equation Listing SOLVE EOQ Using NLP From line 19

Resultados de ejecución en GAMS

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	EOQ	OBJECTIVE	TCU
TYPE	NLP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CONOPT	FROM LINE	19

```

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      2 Locally Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    212300.8146

```

```

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.047      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT     24      2000000000
EVALUATION ERRORS          0          0

```

CONOPT 3 24.8.4 r60966 Released Apr 10, 2017 VS8 x86 32bit/MS Windows

C O N O P T 3 version 3.17C

Copyright (C) ARKI Consulting and Development A/S

Bagsvaerdvej 246 A
DK-2880 Bagsvaerd, Denmark

The model has 11 variables and 2 constraints
with 21 Jacobian elements, 10 of which are nonlinear.
The Hessian of the Lagrangian has 10 elements on the diagonal,
0 elements below the diagonal, and 10 nonlinear variables.

Pre-triangular equations: 0

Post-triangular equations: 1

** Optimal solution. Reduced gradient less than tolerance.

CONOPT time Total 0.044 seconds

of which: Function evaluations 0.000 = 0.0%

1st Derivative evaluations 0.000 = 0.0%

2nd Derivative evaluations 0.001 = 2.3%

Directional 2nd Derivative 0.000 = 0.0%

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- EQU minTCU	.	.	.	1.000
---- EQU espacio	-INF	192.000	192.000	-662.407
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR TCU	-INF	2.1230E+5	+INF	.
---- VAR y				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1	.	4.924	+INF	EPS
2	.	4.028	+INF	EPS
3	.	5.460	+INF	EPS
4	.	5.414	+INF	EPS
5	.	10.907	+INF	EPS
6	.	12.049	+INF	-1.52E-10
7	.	16.595	+INF	.
8	.	31.879	+INF	EPS
9	.	48.644	+INF	EPS
10	.	52.101	+INF	EPS

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

GAMS 24.8.4 r60966 Released Apr 10, 2017 WIN-VS8 x86 32bit/MS Windows 10/12/17
13:16:27 Page 6

General Algebraic Modeling System
Execution

---- 20 VARIABLE y.L
1 4.924, 2 4.028, 3 5.460, 4 5.414, 5 10.907, 6 12.049
7 16.595, 8 31.879, 9 48.644, 10 52.101

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 3 MB 24.8.4 r60966 WIN-VS8

B) Modelo de VRPTW en GAMS.

Implementación en GAMS.

```
Executed on prod-exec-4.neos-server.org
GAMS 24.8.5 r61358 Released May 10, 2017 LEX-LEG x86 64bit/Linux
10/29/17 19:45:41 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation
COMPILATION TIME = 0.000 SECONDS 3 MB 24.8.5 r61358 LEX-
LEG GAMS 24.8.5 r61358 Released May 10, 2017 LEX-LEG x86 64bit/Linux
10/29/17 19:45:41 Page 2
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE vrp Using MIP From line 179
```

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	11	SINGLE EQUATIONS	1,385
BLOCKS OF VARIABLES	5	SINGLE VARIABLES	884
NON ZERO ELEMENTS	5,364	DISCRETE VARIABLES	441

```
GENERATION TIME = 0.004 SECONDS 4 MB 24.8.5 r61358 LEX-
LEG
```

```
EXECUTION TIME = 0.005 SECONDS 4 MB 24.8.5 r61358 LEX-
LEG
```

```
GAMS 24.8.5 r61358 Released May 10, 2017 LEX-LEG x86 64bit/Linux
10/29/17 19:45:41 Page 3
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE vrp Using MIP From line 179
```

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	vrp	OBJECTIVE	z
TYPE	MIP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CPLEX	FROM LINE	179

```
**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE 385.2641
```

```
RESOURCE USAGE, LIMIT 0.040 1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT 124 2000000000
```

```
IBM ILOG CPLEX 24.8.5 r61358 Released May 10, 2017 LEG x86 64bit/Linux
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
Cplex 12.7.1.0
```

```
Space for names approximately 0.05 Mb
Use option 'names no' to turn use of names off
MIP status(101): integer optimal solution
```

Cplex Time: 0.03sec (det. 13.52 ticks)
 Fixing integer variables, and solving final LP...
 Fixed MIP status(1): optimal
 Cplex Time: 0.00sec (det. 1.09 ticks)
 Proven optimal solution.

MIP Solution: 385.264106 (124 iterations, 0 nodes)
 Final Solve: 385.264106 (0 iterations)

Best possible: 385.264106
 Absolute gap: 0.000000
 Relative gap: 0.000000

---- VAR w

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
c1	-INF	800.000	+INF	.
c2	-INF	68.080	+INF	.
c3	-INF	68.910	+INF	.
c4	-INF	65.970	+INF	.
c5	-INF	20.396	+INF	.
c6	-INF	66.120	+INF	.
c7	-INF	62.660	+INF	.
c8	-INF	15.524	+INF	.
c9	-INF	55.760	+INF	.
c10	-INF	5.099	+INF	.
c11	-INF	8.944	+INF	.
c12	-INF	54.570	+INF	.
c13	-INF	12.083	+INF	.
c14	-INF	55.580	+INF	.
c15	-INF	11.180	+INF	.
c16	-INF	6.325	+INF	.
c17	-INF	25.080	+INF	.
c18	-INF	20.100	+INF	.
c19	-INF	25.020	+INF	.
c20	-INF	20.025	+INF	.
c21	-INF	60.740	+INF	.

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--	-------	-------	-------	----------

---- VAR k -INF 11.000 +INF .

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED

GAMS 24.8.5 r61358 Released May 10, 2017 LEX-LEG x86 64bit/Linux
 10/29/17 19:45:41 Page 4

General Algebraic Modeling System
 Execution

---- 180 VARIABLE z.L = 385.264

```
---- 181 VARIABLE x.L
c1 .c5 1
c1 .c8 1
c1 .c10 1
c1 .c11 1
c1 .c13 1
c1 .c15 1
c1 .c16 1
c1 .c17 1
c1 .c18 1
c1 .c19 1
c1 .c20 1
c2 .c1 1
c3 .c1 1
c4 .c1 1
c5 .c1 1
c6 .c1 1
c7 .c1 1
c8 .c21 1
c9 .c1 1
c10.c12 1
c11.c9 1
c12.c1 1
c13.c1 1
c14.c1 1
c15.c7 1
c16.c14 1
c17.c3 1
c18.c6 1
c19.c2 1
c20.c4 1
c21.c1 1
```

```
---- 182 VARIABLE y.L
c1 .c5 2
c1 .c8 2
c1 .c10 2
c1 .c11 2
c1 .c13 2
c1 .c15 2
c1 .c16 2
c1 .c17 2
c1 .c18 2
c1 .c19 2
c1 .c20 2
c8 .c21 1
c10.c12 1
c11.c9 1
c15.c7 1
c16.c14 1
c17.c3 1
c18.c6 1
c19.c2 1
c20.c4 1
```


EXECUTION TIME = 0.007 SECONDS 3 MB 24.8.5 r61358 LEX-
LEG

USER: Small MUD - 5 User License G170411/0001AS-LNX
University of Wisconsin-Madison, Computer Sciences Dept. DC8499
License for teaching and research at degree granting institutions

**** FILE SUMMARY

Input /var/lib/condor/execute/dir_848628/MODEL.gms
Output /var/lib/condor/execute/dir_848628/solve.out

10 ANEXO 3

Tabla anexo 3. Resumen de localización sistema Montacargas.

Nombre	Tiempo Programado (Min)	Total Entradas	Tiempo Por entrada Promedio (Min)	Contenido Promedio	Contenido Actual	% Utilización
C2	479.958	223	42.96317489	19.96172165	20	99.80860825
C19	479.958	284	33.71377113	19.94906013	20	99.74530063
C17	479.958	198	40.27748485	16.61591639	16	83.07958196
C3	479.958	210	39.30486667	17.19738394	16	85.98691969
C4	479.958	202	38.14454455	16.05390055	16	80.26950275
C6	479.958	210	45.62450952	19.96246963	20	99.81234816
C5	479.958	284	32.56264789	19.26791928	18	96.33959638
C20	479.958	223	37.61846188	17.47843978	17	87.3921989
C18	479.958	214	38.67833645	17.24560066	18	86.22800328
C8	479.958	226	37.03484956	17.43876756	16	87.19383779
C21	479.958	286	32.37942308	19.29442785	19	96.47213923
C7	479.958	195	39.68040513	16.12157522	17	80.60787611
C13	479.958	216	38.25284259	17.2152855	16	86.07642752
C15	479.958	229	36.48220087	17.40657308	16	87.03286538
C11	479.958	233	35.64183691	17.30265565	18	86.51327825
C9	479.958	287	32.11406969	19.20321778	19	96.01608891
C16	479.958	220	37.27440909	17.08559916	16	85.42799578
C14	479.958	195	49.13865128	19.96432396	20	99.82161981
CARGA	479.958	894	6.614980984	12.32148021	14	56.00672824

Tabla anexo 3. Localización estados multicapacidad Montacargas.

Nombre	Tiempo Programado (Min)	% Vacío	% Parte Ocupada	% Lleno
C2	479.958	0	3.51	96.48531747
C19	479.958	0	4.78	95.21916501
C17	479.958	0	91.9	8.09779189
C3	479.958	0	89.61	10.38799228
C4	479.958	0	97.48	2.521262277
C6	479.958	0	3.44	96.56011568
C5	479.958	0	55.42	44.58015076
C20	479.958	0	86.24	13.75703707
C18	479.958	0	88.46	11.542885
C8	479.958	0	87.22	12.77653461
C21	479.958	0	53.28	46.72200484
C7	479.958	0	94.75	5.251709525
C13	479.958	0	89.27	10.73343918
C15	479.958	0	88.54	11.46037778
C11	479.958	0	89.96	10.04212869
C9	479.958	0	60.84	39.15780131
C16	479.958	0	90.49	9.511248901
C14	479.958	0	3.25	96.74554857
CARGA	479.958	0.055629868	98.62	1.319490455

Tabla anexo 3. Estado de los Montacargas

Período	Nombre	Unidades	Tiempo Programado (Min)	Tiempo de Trabajo (Min)	Número de Veces Utilizado	Tiempo Por Uso Promedio (Min)	Tiempo Viaje Para Utilizar Promedio (Min)	Tiempo Viaje a Estacionar Promedio (Min)	% Bloqueado En Viaje	% Utilización
1	MON T1	1	479.958	473.124	1047	0.173817	0.278069	0	4	98.57613
1	MON T2	1	479.958	443.456	1065	0.166844	0.249312	0.517	6	92.39475
1	MON T3	1	479.958	473.291	721	0.293836	0.362601	0	0	98.61092
1	MON T4	1	479.958	462.587	984	0.16023	0.309564	0.7	2	96.38072

Tabla anexo 3. Resumen de localización sistema AGV.

Período	NOMBRE	Tiempo Programado (Min)	Capacidad	Total Entradas	Tiempo Por entrada Promedio (Min)	Contenido Promedio	Contenido Actual	% Utilización
1	C2	481.199	20	341	26.48898534	18.77132745	20	93.85663727
1	C19	481.199	20	347	27.61107205	19.91076873	20	99.55384363
1	C17	481.199	20	326	29.3967362	19.91553598	19	99.57767992
1	C3	481.199	20	320	27.38081875	18.20839611	18	91.04198055
1	C4	481.199	20	335	26.99749552	18.79505361	19	93.97526803
1	C6	481.199	20	316	27.80705063	18.26069464	20	91.3034732
1	C5	481.199	20	320	29.95090938	19.91752061	19	99.58760305
1	C20	481.199	20	329	27.31293009	18.67409118	19	93.37045588
1	C18	481.199	20	310	28.18366774	18.15659841	19	90.78299207
1	C8	481.199	20	310	28.0024	18.03982136	18	90.19910681
1	C21	481.199	20	314	27.48948408	17.9378968	18	89.68948398
1	C7	481.199	20	356	26.91167697	19.90976083	20	99.54880413
1	C13	481.199	20	350	25.93054	18.86057328	19	94.30286638
1	C15	481.199	20	345	26.4670087	18.97576263	19	94.87881313
1	C11	481.199	20	301	28.82595349	18.03123448	18	90.15617239
1	C9	481.199	20	306	28.45040196	18.09193909	19	90.45969547
1	C16	481.199	20	335	27.26391642	18.98052988	19	94.90264942
1	C14	481.199	20	340	26.92796765	19.0264506	19	95.13225298
1	CARGA	481.199	22	1212	6.625054455	16.68658081	16	75.8480946

Tabla anexo 3. Localización estados multicapacidad AGV.

Nombre	Tiempo Programado (Min)	% Vacío	% Parte Ocupada	% Lleno
C2	481.199	0	81.12	18.87639002
C19	481.199	0	6.11	93.88797566
C17	481.199	0	5.64	94.36470151
C3	481.199	0	95.33	4.672079535
C4	481.199	0	83.18	16.82360105
C6	481.199	0	95.44	4.558197336
C5	481.199	0	5.43	94.57064541
C20	481.199	0	91.89	8.10537844
C18	481.199	0	97.65	2.354119605
C8	481.199	0	93.63	6.366181143
C21	481.199	0	95.22	4.776817907
C7	481.199	0	6.19	93.80859062
C13	481.199	0	68.54	31.45891824
C15	481.199	0	62.72	37.28311987
C11	481.199	0	95.49	4.512062577
C9	481.199	0	94.17	5.826279772
C16	481.199	0	67.75	32.24861232
C14	481.199	0	62.29	37.71163282
CARGA	481.199	0	100	0

Tabla anexo 3. Estado de los AGV.

Nom bre	Unida des	Tiempo Programado (Min)	Tiempo de Ttrabajo (Min)	Número de Veces Utilizado	Tiempo Por Uso Promedio (Min)	Tiempo Viaje Para Utilizar Promedio (Min)
AGV1	1	481.199	480.366	1459	0.126339273	0.202904044
AGV2	1	481.199	478.607	1630	0.1134	0.180113427
AGV3	1	481.199	476.349	1274	0.176770016	0.197130298
AGV4	1	481.199	480.366	1196	0.189133779	0.212510033