

DISEÑO DE UN ALMACÉN AUTOMÁTICO

Francisco M. Vergara, Edith G. Gulino

*Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de La Plata, UNLP.
Av. 1 y 47, (1900) La Plata, Argentina. e-mail: fvergara@ing.unlp.edu.ar.*

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un pequeño almacén automático. La estructura básica es la de un almacén matricial tridimensional (tipo silo), y consiste en un sistema de estanterías, palés y contenedores normalizados. El sistema de transporte y manipulación es un robot tipo cartesiano de accionamiento eléctrico, controlado por un PLC. Juntos constituyen un ASRS (Automatic Storage & Retrieval System). Está configurado como un *almacén de producción*; comparte características con los llamados "Miniload", pero en su diseño se aplicaron algunos conceptos que normalmente se utilizan solo en grandes almacenes.

El artículo describe el diseño de la estructura realizado en base a criterios específicos de almacenes automáticos; el diseño mecánico (CAD) y cinemático del robot, el sistema de automatización y comunicaciones y parcialmente el sistema de gestión del almacén.

Un almacén de pequeña escala como este puede utilizarse en empresas que por sus características manejen existencias de una gran cantidad de productos diferentes, y de pequeño tamaño individual. Además de automatizar la manipulación y almacenamiento, el software de gestión del almacén simplifica el manejo de las existencias.

Las aplicaciones previstas son didáctica, experimental e industrial.

Palabras Claves: Automatización. FMS. Robótica. Almacenes automáticos. AS/RS.

1. INTRODUCCIÓN

Los almacenes matriciales a veces llamados silos en altura, se originan en la necesidad de almacenar gran cantidad de productos en espacios relativamente reducidos. Pueden estar destinados a almacenar solamente productos finales y se los conoce como *almacenes de distribución*. Cuando son parte de otra planta de producción y su objetivo es almacenar productos terminados, materias primas y trabajo en proceso (*WIP*) se conocen como *almacenes de producción*. Estos, en general, son de dimensiones menores que los primeros.

El sistema físico de los almacenes se compone de dos subsistemas: Por un lado la estructura, y por otro, el sistema de manipulación y transporte. La estructura está formada por estanterías, donde se almacenan los productos y materias primas -normalmente en palés-. El sistema de manipulación y transporte puede ser manual o automático. En los almacenes automáticos, Figura 1, estos equipos (transelevadores) cargan/descargan el silo hacia/desde el sistema de transporte de materiales. Suele haber un elevador por pasillo. El sistema de transporte puede estar constituido por cintas transportadoras automáticas y/o vehículos automáticos (*AGV's*).

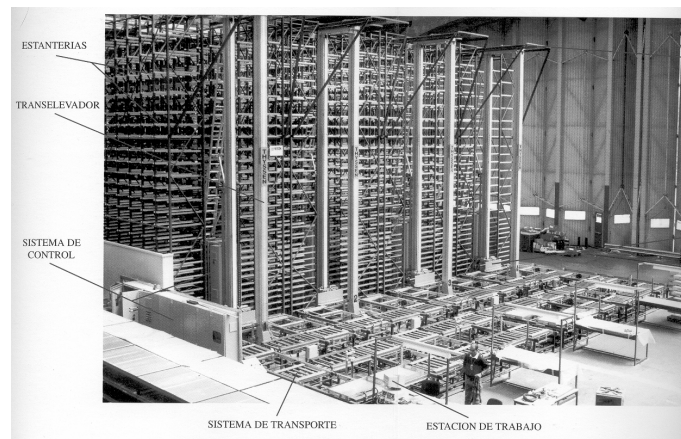


Figura 1: Almacén automático industrial (Thyssen)

Sistemas como el descrito están pensados para grandes almacenes; son muy caros, y en general solo se encuentran en plantas muy importantes. En una escala bastante menor, existen los almacenes llamados *miniload* [1]; éstos tienen normalmente un transelevador por pasillo, y una estación doble para el ingreso/retiro manual en el extremo de cada pasillo. En una configuración aún más simple y económica, se pueden reemplazar los transelevadores por un único robot tipo cartesiano (pórtico), que transporta los productos directamente a la estación. Aquí se presenta el diseño de un almacén de estas características.

En este trabajo se utilizan conceptos y terminología propios de los almacenes, que pueden consultarse en [2]. Las definiciones principales se irán haciendo a medida que se necesiten; además se presenta abundante bibliografía de consulta.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se aborda el diseño desde un punto de vista jerárquico; en la 3 el modelo matemático, en 4 el sistema de administración y control, y en 5 las conclusiones.

2. DISEÑO

El modelo tratado aquí es un pequeño almacén tipo silo; tiene unas dimensiones principales del orden de 3000 mm de largo, 1200 de ancho y 2000 de altura. Tiene 7 estanterías de 8x7 celdas. Está configurado como un *almacén de producción*; por estar destinado a guardar ítems pequeños comparte algunas características con los *miniload*, pero se prevé el almacenamiento también en palés, lo cual no es lo normal en los miniload.

Los problemas que deben considerarse durante el diseño de un almacén se pueden agrupar en tres niveles, donde las decisiones de un nivel condicionan las de los otros [2]:

- I. Nivel estratégico
- II. Nivel Táctico
- III. Nivel Operacional

2.1 Nivel Estratégico

Son las decisiones de largo plazo. Las principales son el diseño del proceso y la selección del equipamiento.

El proceso básico se compone de recepción, almacenamiento, recuperación y despacho.

El equipamiento principal se define en esta etapa, y está condicionado por varias decisiones:

La *unidad de almacenamiento* define de qué manera se almacenan los productos. Este almacén podrá recibir y almacenar los productos y materias primas en palés o en cajas totalizadoras (CT) normalizados (ver Figura 2), que se tratan de la misma manera, y se llamarán aquí contenedores. Cada uno contiene un único tipo de producto pero la cantidad puede ser mayor a uno.

La estructura se construye con componentes modulares, con algunas adaptaciones al diseño específico. Las celdas –casilleros– del almacén pueden ser de igual o distinto tamaño. Lee [3] propone un modelo de almacén con celdas de diferente altura, lo que aumenta la flexibilidad del almacén; en Lee [4] propone el uso de celdas modulares. Esta opción se adoptó para algunas celdas del almacén, Figura 2.

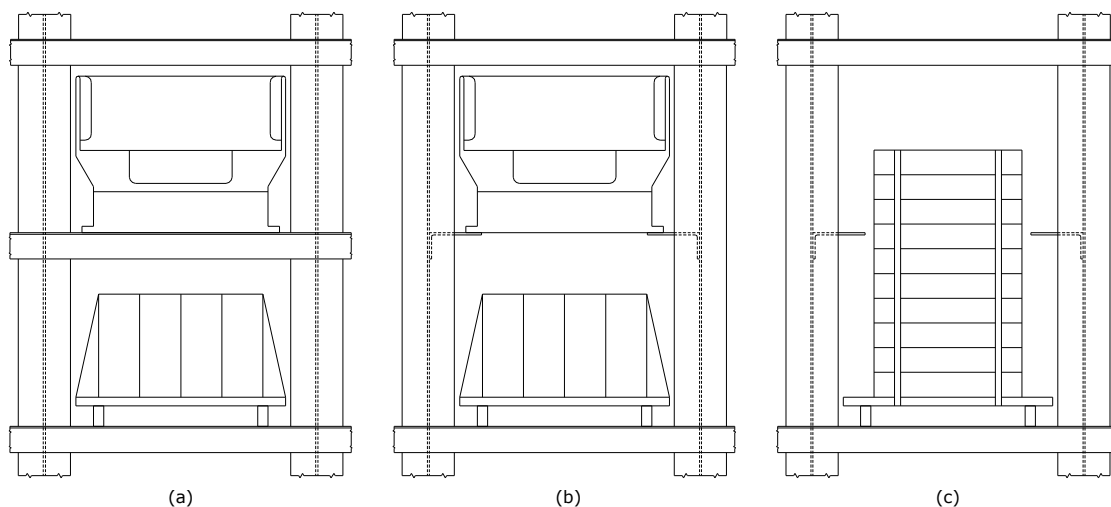


Figura 2: a-Palé y contenedor en celdas de simple altura
b-Palé y contenedor en una celda de doble altura c-Palé en una celda de doble altura

En las celdas de doble altura los palés intermedios se apoyan solamente sobre perfiles. Esto mejora la disponibilidad de espacio, evitando agregar una restricción, situación que se daría si los palés se apoyaran unos en otros. (no podría, por ejemplo, aplicarse una metodología *FIFO* para la recuperación).

En general un almacén puede tener acceso por ambos lados de la estructura y por puntos intermedios. Por su tamaño, este tiene acceso solo a ambos lados. Puede haber celdas sobre un solo lado de cada pasillo (*pasillo simple*, single sided), o de ambos (*pasillo doble*, double sided), siendo la eficiencia del movimiento de materiales en pasillo doble superior a la del simple. Este almacén se ha diseñado como pasillo doble, pues las celdas son de doble profundidad y la horquilla puede girar 180°, pero inicialmente operará como pasillo simple.

Las características actuales de la producción determinan la necesidad de una reconfiguración de los sistemas automáticos más frecuente que en el pasado. Señala Wong [5] que los sistemas para manipulación automática de materiales no están diseñados para su reconfiguración dinámica, y plantea las consideraciones que deben tenerse en cuenta durante el diseño de los mismos; siguiendo estas pautas en este almacén hay sólo una estación de carga/descarga, pero se ha considerado la posibilidad de que a futuro haya dos vinculadas por una cinta. En este caso, se requiere que la cinta sea reversible, ya que si una estación queda inutilizada se debe desviar todo el tránsito a la otra. Esto se hace en el nivel de gerenciamiento.

Se dice que un almacén es *cuadrado en tiempo* (SIT) cuándo el tiempo que tarda el transportador en realizar la carreras horizontal (eje x) y vertical (eje y) a una celda es el mismo. Yugang y de Koster [6] demuestran que esta estructura minimiza los tiempos de maniobra para almacenes 3D con un solo transportador, siendo la dimensión en z la mayor; este es el caso de nuestro almacén, por lo tanto, se diseña como SIT.

Todo el almacén es atendido por un solo equipo de manipulación, el robot cartesiano. La estructura de este tipo de robot es bien conocida; se caracteriza por tener solo juntas prismáticas y se denomina de esta manera porque sus movimientos principales se realizan sobre los tres ejes cartesianos. El modelo diseñado para este proyecto se presenta en la Figura 3.

Este manipulador tiene tres grados de libertad principales, y no puede asir cualquier pieza, pues se requieren seis para lograr cualquier posición y orientación en el espacio, pero es suficiente para mover los contenedores, que se pueden atacar de un solo lado.

Los mandos de potencia son motores eléctricos tipo paso-a-paso. Se utilizan sensores mecánicos solo como fines de carrera de emergencia. La transmisión de los movimientos se hace por medio de correas y poleas dentadas. El actuador final (una horquilla) es de diseño específico para transportar contenedores, pero es intercambiable, en caso de que se desee almacenar productos individuales. La capacidad de transporte del equipo se estableció en 3 kg.

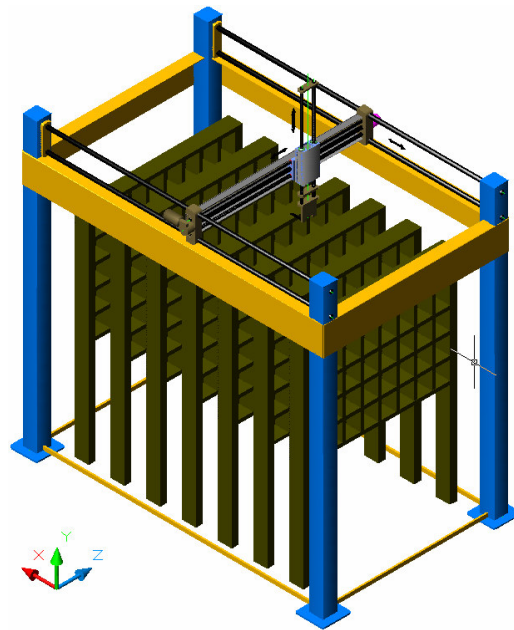


Figura 3: Modelo del Almacén

2.2 Nivel Táctico

Las decisiones son de mediano plazo, y generalmente deben tratarse simultáneamente. Incluye la política de reabastecimiento, tamaño del lote, política de almacenamiento y dimensionado de las zonas ABC.

La política de almacenamiento se basa en clases. Estas se definen por la popularidad [7] de los productos. En un almacenamiento basado en clases, los ítems con mayor rotación se ubican más cerca de la estación, resultando en menores tiempos de viaje del transportador, y en consecuencia mayor velocidad de carga/descarga. Se establecieron inicialmente tres clases (A-B-C), pero el sistema puede manejar hasta cinco. La cantidad de celdas que ocupa cada clase se calcula en función de la participación acumulada de la clase en el movimiento total y se reasigna dinámicamente en función del movimiento de los productos.

Estos temas y los de nivel operacional se tratan más extensamente en el título 4. **Sistema de Administración y Control.**

2.3 Nivel operacional

Son las decisiones de corto plazo. Incluye asignación de tareas al personal, ubicación de los productos entrantes, secuenciamiento de las órdenes, conformado de lotes, selección del punto de espera.

Siendo un sistema automático, las tareas de almacenar/recuperar quedan a cargo del robot; el operador del almacén realiza la asignación, utilizando el módulo de Planeamiento (ver 4.2).

El punto de espera (dwell point) es el lugar donde el transportador permanece cuando está inactivo. En este almacén se adopta inicialmente en la estación de carga/descarga. Este no es necesariamente el óptimo [8]; por esto es posible cambiarlo por software.

3. MODELO MATEMÁTICO

Para la operación y simulación del almacén se requiere un modelo matemático, que contemple la estructura y el sistema de manipulación.

La estructura del almacén puede describirse en forma sencilla por medio de una matriz de tres dimensiones:

$A(L,M,N)$ (A por Almacén), donde L es la cantidad de columnas (eje x), M la de filas (eje y) y N la de pasillos (eje z).

3.1 Modelo cinemático del robot

La descripción cinemática del manipulador y su ambiente de trabajo es un paso previo requerido para la programación de cualquier robot. El problema principal es la resolución del problema cinemático inverso, y se aborda en casi todos los libros de robótica [9]. Para la configuración cartesiana, la solución es trivial, ya que los ejes de coordenadas del ambiente y robot pueden ser paralelos. Aquí se utiliza para la estructura un sistema de referencia cartesiano, cuyo origen está trasladado respecto al sistema de referencia del manipulador (X,Y,Z) , en una distancia $P_0(x_0,y_0,z_0)$, Figura 4. Así, las coordenadas articulares del robot y absolutas de las piezas coinciden en tipo (cartesianas) y su valor difiere en una cantidad fija.

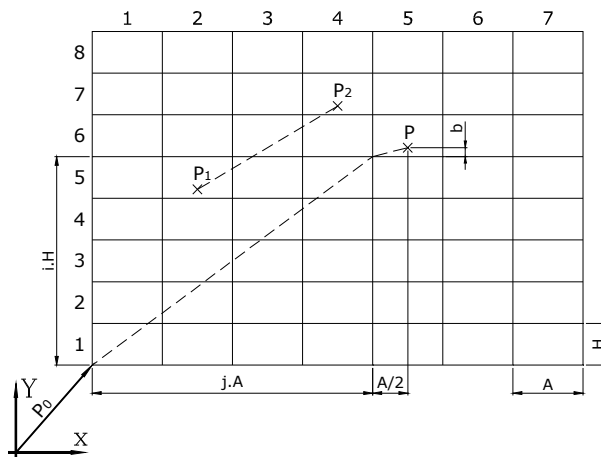


Figura 4: Vista frontal de una estantería

Las coordenadas de cada punto en el espacio $P(x,y,z)$ que puede alcanzar el robot dependen linealmente del número de vueltas dado por el motor de cada eje; las velocidades de desplazamiento en cada eje, de las velocidades angulares de los motores. Por lo tanto, las ecuaciones del problema directo resultan:

$$\begin{aligned} x &= n_1 \cdot r_1 \\ y &= n_2 \cdot r_2 \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned} z &= n_3 \cdot r_3 \\ v_1 &= \omega_1 \cdot r_1 \\ v_2 &= \omega_2 \cdot r_2 \\ v_3 &= \omega_3 \cdot r_3 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Donde:

x, y, z: Coordenadas a alcanzar respecto al origen

v_1, v_2, v_3 : velocidades de los movimientos en los ejes

1,2,3: Número de eje: 1 para el eje x, 2 para el eje y, 3 para el eje z

n_i : número de vueltas dado por cada motor.

ω_i : velocidad angular de régimen de cada motor.

r_i : relación de transmisión total entre el motor y el desplazamiento lineal de cada eje.

Para programar los controladores se debe resolver el problema inverso. Esta solución se obtiene de las Ecuaciones (1.1) y (1.2):

$$\begin{aligned} n_1 &= x / r_1 \\ n_2 &= y / r_2 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} n_3 &= z / r_3 \\ \omega_1 &= v_1 / r_1 \\ \omega_2 &= v_2 / r_2 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\omega_3 = v_3 / r_3$$

La orientación del actuador final del robot (horquilla) se define por los cosenos directores:

$$O = (0,0,1)$$

La posición P que el robot debe alcanzar corresponde a la celda que se desea visitar. Dado que las celdas son todas de iguales dimensiones y los pasillos equidistantes, las coordenadas de P pueden definirse en función de estas dimensiones y los índices de la matriz **A**, Figura 4:

$$\begin{aligned} x &= j.A + x_0 + A/2 \\ y &= i.H + y_0 + b \\ z &= k.D + z_0 \end{aligned} \tag{3}$$

Donde (i, j, k) son los índices de posición de la celda y:

A: Ancho de la celda

H: Altura de la celda

D: Distancia entre pasillos del almacén

b: Distancia que depende del tipo de contenedor

El posicionamiento en P asegura que el robot está enfrenteado con la celda deseada, pero la horquilla está en el pasillo, para permitir el movimiento libre del robot. Para asir el contenedor se requiere un desplazamiento en z, y luego una pequeña elevación b_1 en y; estos desplazamientos se programan en la interfase del módulo de gerenciamiento que se presenta en la Figura 7.

Las celdas de doble altura se tratan como dos celdas individuales; el software de planeamiento define una o ambas celdas como ocupadas, según el tipo de contenedor en el mismo.

Para que los movimientos internos en el rack también sean SIT, se necesita coordinar las velocidades de los ejes. El criterio adoptado es establecer las velocidades máximas a partir del tiempo de tránsito deseado.

4. SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN Y CONTROL

4.1 Estructura del Sistema

En general, los almacenes automáticos modernos se administran en tres niveles [10], Figura 5:



Figura 5: Estructura y flujo de información del sistema de administración y control

En este almacén se aplica una estructura similar, pero la distribución de tareas es algo diferente. Físicamente, los niveles 2 y 3 se realizan en PC's y el primero en un PLC.

4.2 Funciones

Nivel 3: Planeamiento

Involucra las decisiones de alto nivel de la operación, como control del stock, secuenciamiento de las órdenes, armado de los lotes (batchs).

En los almacenes de operación manual frecuentemente una orden se compone de varios *ítems*, y en cada vuelta, los transportadores pueden visitar varias celdas y almacenar o retirar más de un contenedor, por lo cual se forman lotes; en cambio los almacenes automáticos raramente pueden transportar más de un contenedor al mismo tiempo; tal es el caso de este almacén, pero cada operación puede ser un comando simple o dual [10]. Un *comando dual* (Dual Command, DC) consiste en ir a almacenar un contenedor, y recuperar otro sin volver a la estación de entrada/salida. Siempre que sea posible, el comando debe ser dual, (es decir, no hay carrera vacía del robot) para mejorar la eficiencia del almacén. Esto se logra reprogramando las órdenes. Las órdenes deben ejecutarse en forma secuencial (no se pueden realizar lotes) y pueden atenderse según el orden de llegada (*FCFS*), pero el operador puede decidir alterar ese orden, simular las operaciones y realizar análisis del tipo *what if* desde el módulo de gerenciamiento. Se puede observar gráficamente el resultado de las tareas, accediendo a un mapa del almacén, dónde se ve el estado de ocupación de cada estantería, Figura 6.

El almacenamiento se realiza según un criterio de *Celda libre más cercana* (*COL*, [10,7]) dentro de la misma clase. La recuperación se realiza con un criterio del *Vecino más próximo* (*NN*, [10,7]). Ambos algoritmos son de desarrollo propio.

Una vez establecida una secuencia para la cola de órdenes, la información se transfiere al programa de gerenciamiento.

Nivel 2: Gerenciamiento

Sus responsabilidades son mantener la configuración del almacén, generar las trayectorias para el robot a partir de la cola de órdenes a ejecutar, y controlar las comunicaciones.

Este módulo puede correr en la misma PC que el de Planeamiento, o en otra computadora diferente. En el primer caso, es transparente para el operador del almacén. Para hacerlo flexible, los parámetros de configuración del almacén se guardan localmente en un archivo de datos y el programa posee una interfase que da acceso a los mismos, Figura 7.

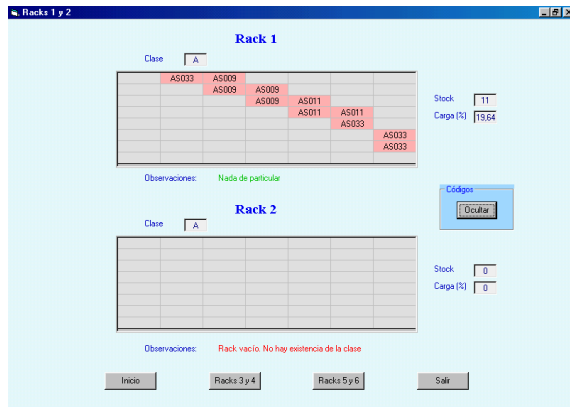


Figura 6: Ocupación de las estanterías

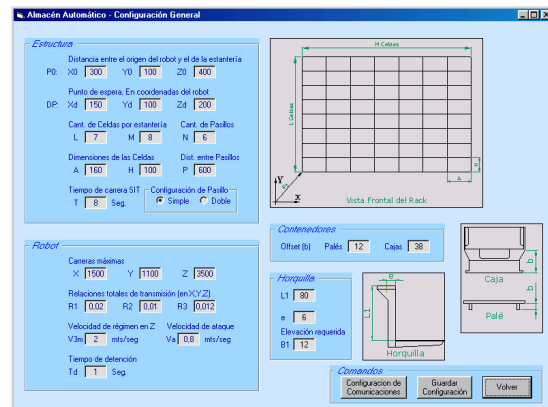


Figura 7: Pantalla de configuración del almacén

Este módulo establece la coordinación necesaria para lograr el comportamiento SIT, y genera las trayectorias para el nivel 1.

Nivel 1: Manipulación

Convierte las misiones de movimiento en tareas físicas de almacenamiento/recuperación.

El PLC se encarga del control de movimiento del robot. El control de los motores se realiza en lazo abierto, y el perfil de velocidades es un trapecial típico, compuesto de tres partes. Las características para cada eje surgen de las Ecuaciones (2.1) y (2.2). La salida de pulsos necesaria para los motores paso a paso se genera por medio de una función propia del controlador.

4.3 Sistema de Comunicaciones

En las plantas manufactureras, las comunicaciones se organizan tradicionalmente en tres niveles: dispositivos o de campo, control y gestión, pero la tendencia actual es a fusionar parcialmente el nivel de control con el de gestión [11]. Aquí se sigue parcialmente este criterio. Las comunicaciones entre los módulos de Planeamiento y Gerenciamiento se realizan directamente por medio de archivos de datos cuando los programas corren en la misma PC y a través de la red administrativa de la empresa (*Ethernet*) cuando corren en diferentes máquinas. Las comunicaciones entre el módulo de Gerenciamiento y el PLC se realizan a través de una red de control en un esquema multi punto con protocolo Modbus.

Está previsto que el software de Planeamiento se comunique con otros módulos de gestión de la empresa, como sistemas MES y ERP sobre la red administrativa.

5. CONCLUSIONES

La tarea presentada consistió en el diseño integral de un pequeño almacén automático. Se siguió una aproximación diferente a la clásica, aplicando al proceso de diseño y al sistema algunos conceptos que normalmente se utilizan solo en grandes almacenes; el resultado es un almacén de pequeña escala con mayor flexibilidad que la propia de estos sistemas, pudiendo constituir una alternativa económica para la utilización de almacenes automáticos en PyMEs.

Aunque el almacén no es escalable directamente, los criterios y metodología empleados en el diseño son aplicables a mayores dimensiones.

El sistema de planeamiento desarrollado está pensado para un almacén automático, pero es aplicable a cualquier almacén con estructura matricial, sea éste manual o automático.

Además, este trabajo permitió al grupo incrementar su experiencia en temas de gestión de la producción con sistemas automáticos.

6. REFERENCIAS

- [1] J. P. van den Berg and W. H. M. Zijm, Models for warehouse management: Classification and examples, *International Journal of Production Economics*, **59** - 1-3, 519-528, 1999.
- [2] B. Rouwenhorst, B. Reuter, V. Stockrahm, G. J. van Houtum, R. J. Mantel and W. H. M. Zijm, Warehouse design and control: Framework and literature review, *European Journal of Operational Research*, **122** - 3, 515-533, 2000.
- [3] Y. H. Lee, J. M. A. Tanchoco, S. J. Chun, Performance estimation models for AS/RS with unequal sized cells, *International Jour. of Production Research*, **37** – 18 , 4197–4216, 1999.
- [4] Y. H. Lee, M. H. Lee and S. Hur. Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS. *International Journal of Production Economics*, **98** - 2, 172-178, 2005.
- [5] M.M. Wong, C.H. Tan, J.B. Zhang, L.Q. Zhuang, Y.Z. Zhao and M. Luo. On-line reconfiguration to enhance the routing flexibility of complex automated material handling operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **23** - 3, 294-304, 2007.
- [6] Y. Yugang and M.B.M. de Koster, Optimal Storage Rack Design for a 3D Compact AS/RS with Full Turnover-Based Storage, *Erim Report Series Research in Management*, 2006.
- [7] J. Gu, M. Goetschalckx, L. McGinnis, Research on warehouse operation: A comprehensive review, *European Journal of Operational Research*, **177**, 1–21. 2007.
- [8] J. P. van den Berg, Analytic expressions for the optimal dwell point in an automated storage/retrieval system, *International Journal of Production Economics*, **76**, 13–25, 2002.
- [9] J. J. Craig, *Robótica. Tercera Edición*, Pearson Educación de México S.A de C.V., Naucalpán de Juárez, 2006.
- [10] F. Amato, F. Basile, C. Carbone and P. Chiacchio. An approach to control automated warehouse systems, *Control Engineering Practice*, **13** - 10, 1223-1241, 2005.
- [11] M. Bertoluzzo, G. Buja, S. Vitturi, Ethernet Networks for Factory Automation, *Industrial electronics*, **50** - 4, 5-10, 2003.