

**DISEÑO CINEMÁTICO DE UN SISTEMA PALETIZADOR DE PRODUCTO  
TERMINADO DE LA INDUSTRIA LICORERA DE CALDAS (ILC)**

**JUAN PABLO LONDOÑO CASTRO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN  
PEREIRA  
2013**

**DISEÑO CINEMÁTICO DE UN SISTEMA PALETIZADOR DE PRODUCTO  
TERMINADO DE LA INDUSTRIA LICORERA DE CALDAS (ILC)**

**JUAN PABLO LONDOÑO CASTRO**

**Trabajo de grado para optar al Título de  
Magister en Sistemas Automáticos de Producción**

**SUPERVISOR  
Dr. Ing. SEBASTIÁN DURANGO IDÁRRAGA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MAESTRÍA EN SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE PRODUCCIÓN  
PEREIRA  
2013**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

*Firma del Presidente del jurado*

---

*Ingeniero mecánico  
Prof. Gabriel Calle Trujillo  
Jurado*

---

*Ingeniero mecánico  
Prof. Fabio Marcelo Peña Bustos  
Jurado*

**Pereira, octubre de 2013.**

Dedico este proyecto de grado a Dios, a mi esposa, a mi hijo y a mis padres.

A Dios porque sé que está junto a mí en todo momento, brindándome su amor y su protección incondicional.

A mi esposa Carolina Amador, porque con su apoyo constante, su paciencia y comprensión se evidencia su gran amor siendo un estímulo persistente para terminar este proyecto.

A mi hijo Diego Alejandro, porque ha sido mi fuente de inspiración y fortaleza.

A mis padres, porque siempre me han guiado por el camino del bien depositando en mí sus mejores deseos con mucho amor y dedicación.

Doy gracias a la Industria Licorera de Caldas por su apoyo económico para realizar esta maestría.

Agradezco de manera especial a mi supervisor Dr. Ing. Sebastián Durango Idárraga, docente de la Universidad Autónoma de Manizales, por su paciencia, dedicación y su valioso aporte intelectual para la realización de este proyecto.

Agradezco a la Universidad Tecnológica de Pereira por la formación que me ha brindado por medio de los docentes de la Maestría en Sistemas Automáticos de Producción.

Agradezco a Gina Camila Murillo Henao y Santiago Montoya Hurtado estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Manizales, por su colaboración en el desarrollo de la cinemática directa.

## CONTENIDO

	pág.
CONTENIDO .....	6
LISTA DE TABLAS .....	8
LISTA DE CUADROS .....	9
LISTA DE FIGURAS .....	10
GLOSARIO .....	12
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
<b>1. CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>16</b>
INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1.1 ECUACIÓN DEL NIOSH.....	21
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	29
1.3 OBJETIVOS .....	31
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	31
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
1.4 MARCO REFERENCIAL .....	32
1.4.1 Marco Teórico.....	32
1.4.2 Marco conceptual.....	34
1.4.2.1 Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.....	34
1.4.2.2 Síntesis de tipo. ....	35
1.4.2.3 Análisis cinemático. ....	35
1.4.2.4 Análisis de singularidad. ....	36
1.4.2.5 Síntesis dimensional.....	36
1.5 DISEÑO METODOLÓGICO .....	37
<b>2. CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>39</b>
DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA.....	39
2.1 TRADUCIR LOS DESEOS DEL USUARIO FINAL EN ÍNDICES NUMÉRICOS.....	39
2.2 SÍNTESIS DE TIPO .....	46
2.2.1 Selección del sistema mecánico de giro. ....	51
2.2.1.1 Sistema mecánico de giro por descarrilador.....	51
2.2.1.2 Sistema mecánico de elevación y giro.....	54

2.2.2	Selección del sistema mecánico de traslado. ....	58
2.3	MODELO CINEMÁTICO DEL SISTEMA.....	64
2.3.1	Análisis de la cinemática inversa. ....	65
2.3.2	Análisis de la cinemática directa. ....	67
2.3.3	Matrices Jacobianas. ....	70
2.3.4	Análisis de singularidad. ....	71
2.4	SÍNTESIS DIMENSIONAL.....	73
2.4.1	Diseño óptimo basado en el espacio de trabajo ( $W_t$ ). ....	75
2.4.1.1	Función objetivo.....	77
2.5	VALIDACIÓN DE ÍNDICES.....	83
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>90</b>
	RESULTADOS.....	90
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>94</b>
4.1	CONCLUSIONES.....	94
4.2	RECOMENDACIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	96
	ANEXOS.....	99
	Anexo A. Programa para la síntesis dimensional óptima del manipulador paralelo PRR(Pa)P en el espacio de trabajo. ....	99
	Anexo B. Función de la cinemática inversa .....	102

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Factor de ponderación para evaluación de requisitos	46



## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Masa de referencia recomendada para diferentes poblaciones	23
Cuadro 2. Valores del multiplicador de frecuencia ( $F_M$ )	27
Cuadro 3. Multiplicador de acople ( $C_M$ ) para la calidad de agarre	27
Cuadro 4. Masa límite bajo las condiciones del paletizado de producto terminado en la ILC	28
Cuadro 5. Relación de la metodología de este proyecto con la de otros autores	37
Cuadro 6. Índices numéricos	46
Cuadro 7. Sistemas manipuladores comerciales	47
Cuadro 8. Matriz de decisión para síntesis de tipo	48
Cuadro 9. Criterios de evaluación para seleccionar el sistema mecánico de giro	56
Cuadro 10. Matriz de decisión para el sistema de giro	56
Cuadro 11. Grado de declinación para transportador de gravedad	58
Cuadro 12. Estructuras paralelas de 2 GDL	59
Cuadro 13. Operaciones para el paletizado de cajas de la ILC y la síntesis de tipo	63
Cuadro 14. Síntesis dimensional a partir análisis geométrico y síntesis dimensional a partir de la optimización del manipulador 2 DOF (PRR(Pa)P)	82
Cuadro 15. Manipuladores comerciales	91
Cuadro 16. Resultados de la simulación del manipulador paralelo de 2 GDL PRR(Pa)P.	93

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Línea de producción de la ILC	19
Figura 2. Variables de tarea de manipulación manual	21
Figura 3. Variables de la tarea de paletizado de la ILC	24
Figura 4. Ángulo de asimetría de manipulación manual	25
Figura 5. Ángulo de asimetría en la operación de paletizado manual en la ILC	26
Figura 6. Caja de cartón para el producto terminado de la ILC y sus dimensiones	40
Figura 7. Estiba completa, isométrico	40
Figura 8. Estiba completa, vistas	41
Figura 9. Posición de la estiba y del transportador de cajas, isométrico	42
Figura 10. Posición de la estiba y del transportador de cajas, vista lateral	42
Figura 11. Posición de la estiba y del transportador de cajas, vista frontal	43
Figura 12. Desplazamiento Total y la representación del sistema de coordenadas en una caja	44
Figura 13. Desplazamiento y orientación de las cajas en los niveles 1 y 2, con la representación del sistema de coordenadas en la caja	45
Figura 14. Orientación de las cajas en la estiba	50
Figura 15. Fila de cuatro cajas sin giro sobre el plano horizontal en el transportador	50
Figura 16. Fila de cinco cajas giradas 90° sobre el plano horizontal en el transportador	51
Figura 17. Sistema mecánico de giro por descarrilador.	52
Figura 18. Descarrilador alineado con la ruta 1 (Giro de 90°)	53
Figura 19. Descarrilador alineado con la ruta 2 (Sin giro)	53
Figura 20. Sistema mecánico de elevación y giro	54
Figura 21. Sistema mecánico de elevación y giro sin actuar	54
Figura 22. Sistema mecánico de elevación y giro actuado	55
Figura 23. Transportador	57

Figura 24. Mecanismo paralelogramo de 4 barras	61
Figura 25. Mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura	62
Figura 26. Sistema de agarre por medio de ventosas	63
Figura 27. Mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura: Esquema cinemático	65
Figura 28. Esquema cinemático modificado	68
Figura 29. Configuraciones singulares del manipulador paralelo de 2 GDL PRR(Pa)P	73
Figura 30. Área de trabajo para el sistema de paletizado de la ILC	74
Figura 31. Espacio de trabajo del manipulador paralelo planar 2 DOF (PRR(Pa)P)	75
Figura 32. Diseño óptimo del manipulador paralelo planar 2 DOF (PRR(Pa)P)	76
Figura 33. División del espacio de trabajo en una malla	79
Figura 34. Minimización de $\eta$ para diferentes valores de $l$	80
Figura 35. Número de condición en relación con el parámetro $l$ óptimo	81
Figura 36. Número de condición del manipulador paralelo de 2 DOF PRR(Pa)P como función del espacio de trabajo $W_t$	82
Figura 37. Diseño óptimo del mecanismo paletizador del producto terminado de la ILC	83
Figura 38. Numeración de la filas en la estiba para la simulación	84
Figura 39. Velocidad, aceleración y fuerza del actuador lineal Y1	86
Figura 40. Velocidad, aceleración y fuerza del actuador lineal Y2	87
Figura 41. Actuador con husillo sin fin y guías de bolas circulantes	88

## GLOSARIO

**ACTUADOR:** los actuadores son dispositivos que generan las fuerzas o pares necesarios para mover o animar la estructura mecánica. Estos pueden ser, según la energía que consuman, de tipo neumático, hidráulico o eléctrico.

**ATAN2(.,.):** función arco tangente de dos argumentos.

**B-SPLINE:** son curvas de interpolación a trazos cuyos puntos definidos que delimitan cada segmento no son puntos por los que pasa la curva, si no que son puntos de control, es decir, estos puntos dan forma a la curva pero sin que la curva pase por ellos, a excepción del punto inicial y el punto final.

**DECLINACIÓN:** caída, descenso o declive.

**DESPALETIZAR:** (Desestibar) colocar el producto paletizado en otra posición.

**DOF:** *degree of freedom* (grados de libertad).

**ESPACIO DE TRABAJO:** es el volumen de espacio que puede ser alcanzado por el efector final del manipulador.

**ILC:** Industria Licorera de Caldas.

**INERCIA:** tendencia de los cuerpos a oponerse a cualquier cambio de su estado de reposo o movimiento.

**JERK:** es la derivada de la aceleración, conocido como el “tirón” que sufre un mecanismo o cualquier objeto debido al cambio brusco de aceleración.

**MANIPULADOR:** generalmente es un dispositivo mecánico capaz de reproducir los movimientos humanos para la manipulación de objetos. Particularmente se refiere a los elementos mecánicos de un robot que producen su adecuado posicionamiento y operación.

**NÚMERO DE CONDICIÓN:** El número de condición de una matriz es usado en el análisis numérico para estimar el error generado en la solución de un sistema de ecuaciones lineales por el error en los datos. En cuanto a la matriz jacobiana de un manipulador, el número de condición es un factor de amplificación de error de los actuadores, por lo que afecta a la exactitud de la velocidad cartesiana del efector final. El número de condición se utiliza para la planificación de trayectorias óptimas y la capacidad de movimiento de un manipulador en el espacio de trabajo

**PA:** mecanismo paralelogramo planar de cuatro barras.

**PALET:** (Estiba) es una plataforma de tablas, se utiliza como base para apilar las cajas y transportarlas por medio de un montacargas.

**PALETIZAR:** (Estibar) apilar un producto ordenadamente, procurando ocupar el menor espacio posible y generando una distribución uniforme del peso.

**PROBLEMA CINEMÁTICO:** consiste en el estudio analítico de la geometría de movimiento de un mecanismo con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo sin tener en cuenta las fuerzas o momentos que producen el movimiento.

**SAGITAL:** en anatomía, los planos sagitales, son aquellos planos perpendiculares al suelo que dividen al cuerpo en mitades izquierda y derecha.

**SISTEMA PALETIZADOR:** es un mecanismo, robot u algún otro medio de manipulación para estibar en un palet de producto terminado.

**SPLINE:** se refiere a cualquier curva compuesta que se forma con secciones polinómicas que satisfacen ciertas condiciones específicas de continuidad en la frontera de cada intervalo.

**TRANSPORTADOR:** es un dispositivo utilizado para trasladar un determinado producto; pueden ser de rodillos, banda o cadena, entre otros.

## RESUMEN

Este trabajo se desarrolla en el contexto del paletizado de producto terminado en la línea 2 de la Industria Licorera de Caldas (ILC). Este proceso se realiza manualmente por cuadrillas en turnos de 9 horas. Para evaluar el proceso se aplicó la norma técnica colombiana (NTC) 5693-1 "*Levantamiento y Transporte*", resultando desfavorable (se estableció un riesgo ergonómico alto). En consecuencia, se requiere un sistema para el paletizado sin intervención humana directa.

Dado el problema, este trabajo se enfoca en el desarrollo de una metodología de diseño aplicable al problema de paletizado de la ILC. La metodología propuesta consolida las propuestas de autores significativos y responde a las necesidades del medio local. Se compone de 5 etapas que inician con el cálculo de los índices numéricos basados en el análisis de los requerimientos del usuario final, y termina con la validación de estos índices con respecto a los resultados obtenidos de la simulación del robot.

La nueva metodología se implementó en el diseño cinemático del sistema paletizador. El diseño resultante quedó compuesto por dos partes: la primera consiste de un descarrilador mecánico que orienta cajas al final del transportador de la línea y la segunda corresponde a un robot paralelo de 2 grados de libertad (GDL) para el traslado de las cajas desde el final del descarrilador hasta la estiba. El total de cuatro grados de libertad necesarios para la estiba (3 traslaciones más orientación) queda completo en la operación secuencial de las dos partes.

El diseño obtenido se evaluó en aspectos propios de la cinemática: desplazamientos, velocidades, aceleraciones, singularidades, etc. Sin embargo, no se avanzó en el diseño de trayectorias óptimas para el paletizado, quedando propuesto como trabajo futuro.

## ABSTRACT

This work takes place in the context of the finished product palletizing line 2 of the Industria Licorera de Caldas (ILC). This process is performed manually by gangs in shifts of 9 hours. To evaluate the process the *Norma Técnica Colombiana (NTC) 5693-1 "Levantamiento y Transporte"* was applied, resulting unfavorable (it was established a high ergonomic risk). Consequently, it requires a system without direct human intervention for palletizing.

Given the problem, this paper focuses on the development of a design methodology applicable to the problem of the ILC palletizing. The proposed methodology consolidates significant authors proposals and responds to the needs of the local environment. It consists of 5 steps starting with the calculation of numerical indices based on analysis of the requirements of the final user, and ends with the validation of these indices with respect to the results of the simulation of the robot.

The new methodology was implemented in kinematic design palletizer system. The resulting design was composed by two parts: the first consists of a mechanical derailleur that guides the boxes in the conveyor at the end of the line, the second one corresponds to a parallel robot with two degrees of freedom (DOF) for transporting the boxes from the derailleur end up to the stowage. The total of four degrees of freedom needed for stowage (3 translations plus guidance) is complete in the sequential operation of the two parts.

The design was evaluated in specific aspects of kinematics: displacements, velocities, accelerations, singularities, etc. However, no progress was made in the design of optimal trajectories for palletizing, being proposed as future work.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

La Industria Licorera de Caldas cuenta con cuatro líneas de producción para el envasado de bebidas alcohólicas. Al final de cada línea de producción salen cajas de cartón selladas conteniendo 12 botellas de 750 ml. Este proyecto tiene como finalidad realizar el diseño cinemático de un sistema paletizador, que apile las cajas provenientes de una línea de producción sobre una estiba, en la bodega de producto terminado de la ILC.

La operación de paletizado en la ILC se realiza de forma manual, entonces se aplicó la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5693-1 Levantamiento y Transporte, para evaluar las condiciones ergonómicas del sitio de trabajo, en este proceso también se identifican los requerimientos de la ILC para la aplicación de un sistema de paletizado automático.

La realización de este proyecto es una herramienta para justificar la importancia de adoptar un sistema de paletización del producto terminado en la ILC, contribuyendo también a la evolución tecnológica que la empresa ha tenido en los últimos años.

Para el diseño cinemático del sistema paletizador, se plantea una metodología de diseño que sintetiza las propuestas de varios autores R. L. Norton (Norton, 2006), J. P. Merlet y D. Daney (Merlet & Daney, 2008), J. P. Merlet (Merlet, 2006) y B. Siciliano (Siciliano & Khatib, 2008), de manera que se establece una metodología de diseño cinemático de robots paralelos adecuada a las necesidades del medio local.

Una vez consolidados los índices numéricos del proceso de paletizado de la ILC, se analizan algunos sistemas manipuladores empleados actualmente en este tipo de procesos (ver Cuadro 7), se observa que es necesario implementar un mecanismo que reduzca la velocidad de manera que no genere un impacto negativo en los requerimientos del proceso.

El paletizado manual en la ILC se realiza pasando las cajas de una en una desde el transportador hasta su ubicación en la estiba. Un sistema manipulador que realice esta tarea, deberá trabajar a una alta velocidad, de tal manera que respete



el tiempo estibado. Para reducir esta velocidad de traslado, se busca una estructura capaz de trasladar varias cajas a la vez.

En el transcurso de la revisión de literatura sobre manipuladores, se encuentra que, en los últimos años, para los investigadores las aplicaciones industriales están siendo más atacadas con manipuladores de cadena cinemática paralela (Liu & Wang, 2006), a diferencia de los manipuladores de cadena cinemática serial la carga soportada está distribuida por varios brazos haciendo el sistema más ligero, y con una inercia menor, como también la potencia desarrollada por los actuadores es menor (Vázquez Gonzales, Cisneros Limón, Mendoza Vázquez, & Alejos Palomares, 2007).

Como resultado del análisis sobre manipuladores para paletización basado en los índices numéricos del proceso de la ILC, se selecciona un manipulador con estructura paralela para implementarla en el diseño cinemático del sistema paletizador de producto terminado de la ILC, adicionando a esta estructura un mecanismo paralelogramo planar de cuatro barras (Pa), con el objetivo de garantizar una traslación pura con elevada rigidez.

Para la síntesis dimensional, se desarrollan dos métodos, el primero consiste en obtener geoméricamente las dimensiones de la estructura paralela; y el segundo se fundamenta en una optimización dimensional basada en la minimización de un Índice de Desempeño Global y Exhaustivo (Huang, Li, Li, Derek G., & Clement M., 2004), generando así un manipulador con un desempeño óptimo en todo el espacio de trabajo.

La estructura del presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera:

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN. En esta parte se desarrolla: la formulación del problema, la justificación, se plantean los objetivos y se establece una metodología para realizar el Diseño Cinemático del Sistema Paletizador de Producto Terminado de la ILC.

Capítulo 2: DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA. En este capítulo se aplica la propuesta metodológica concebida en el diseño metodológico capítulo 1.

Capítulo 3: RESULTADOS. En esta parte se exponen los resultados obtenidos en el desarrollo del Diseño Cinemático del Sistema Paletizador de Producto Terminado de la ILC.

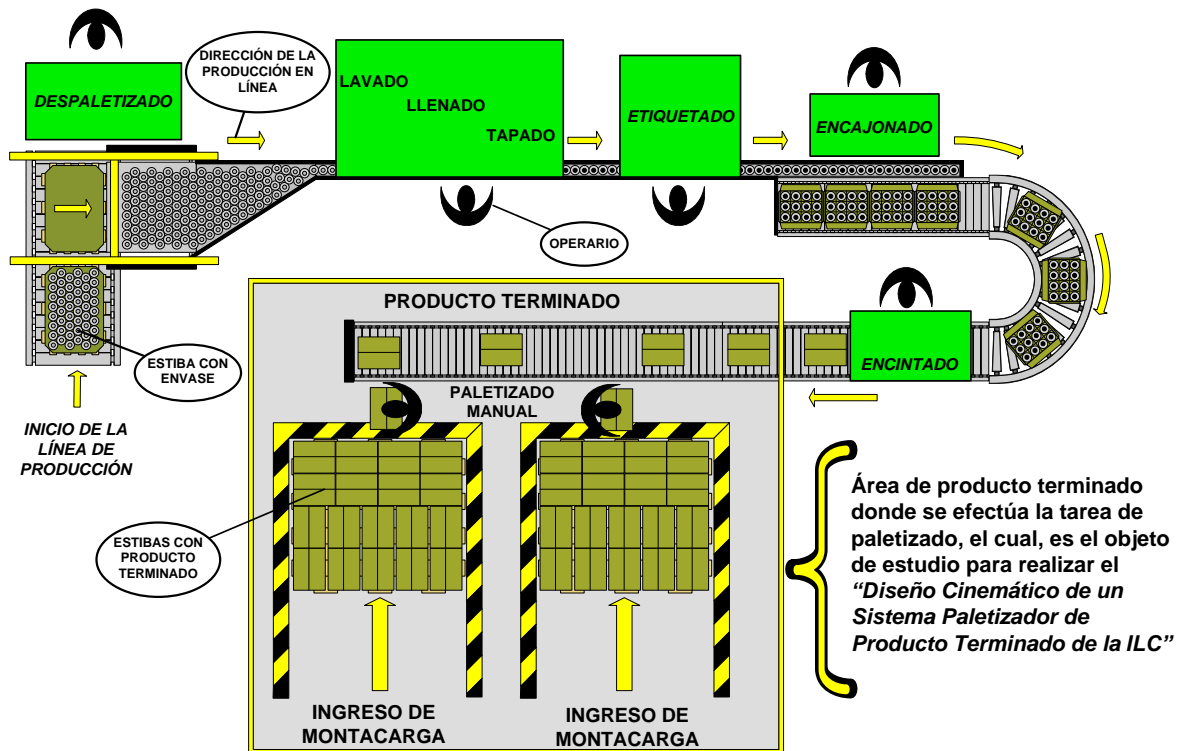
Capítulo 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

## 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Las operaciones de envasado y empaçado en la Industria Licorera de Caldas (ILC) están constituidas por cuatro líneas de producción, cada línea es alimentada por materia prima (envase, licor, tapa, etiqueta y caja), según el licor a envasar. Tres de estas líneas cuentan con máquinas despaletizadoras para enviar las botellas de una en una a la línea de producción, ver Figura 1.

Las líneas de producción entregan 12 botellas de 750 ml ó 24 botellas de 375 ml empacadas en cajas de cartón con una masa de aproximadamente 15 kg dirigidas a la bodega de producto terminado, donde son arrumadas manualmente sobre estibas. La Figura 1 muestra el proceso de botellas de 750 ml donde se introducen 12 botellas en una caja, en la producción de botellas de 375 ml se introduce 24 botellas en una caja.

Figura 1. Línea de producción de la ILC



En la figura 1, se ilustra de manera general una línea de producción de la ILC. El proceso inicia con el despaletizado, el cual consiste en que una máquina despaletizadora toma la estiba con envase para enviar de a uno hacia el lavado

donde se quitan posibles impurezas que contenga cada envase. Estando este limpio se procede con la operación de llenado con licor y posteriormente el tapado, se sigue con el etiquetado donde se pega la etiqueta con la información del producto. Una vez terminada la operación de etiquetado se introducen de a doce botellas en una caja en la zona de encajonado. Esta operación la realiza una máquina que encajona de a cuatro cajas al tiempo, y por último se cierran las cajas en la máquina de encintado. De esta manera se obtiene el producto final que es una caja de cartón que contiene 12 botellas de 750 ml cada una. Cada caja tiene una masa de aproximadamente 15 kg.

Desde hace pocos años la ILC ha venido optimizando sus operaciones en las líneas de producción con la aplicación de automatización en cada una de sus etapas (despaletizado, lavado, llenado, tapado, etiquetado y empacado), efecto que no se refleja aún en la etapa de producto terminado, esto, además de generar una demora y disparidad en el paletizado, también es un riesgo ergonómico, con la manipulación de cajas se pueden dañar la musculatura, huesos y tendones de los operarios y, especialmente cuando se afecta a la estructura de la espalda.

La línea de producción número 2 es la que entrega mayor velocidad con 16 020 botellas por hora (b/h). Entonces, esta línea arroja una caja de 12 botellas cada 2,7 segundos. En una estiba se arruman 90 cajas en cinco tendidos de 18 cajas cada uno.

Teniendo en cuenta que se realizan dos arrumes al mismo tiempo (ver Figura 1), cada operario debe realizar el paletizado en 8,1 minutos. Cada puesto de trabajo tiene 3 operarios, lo que indica que el tiempo de descanso es el doble del tiempo de trabajo, es decir 16,2 minutos.

Con relación a la manipulación manual de cargas, se hace referencia al Compendio de Normas de Ergonomía MANIPULACIÓN MANUAL DE CARGAS (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009) de ICONTEC. La primera parte de ese compendio contiene la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5693-1 Levantamiento y Transporte, donde se especifican los límites recomendados para el levantamiento y transporte manual, teniendo en cuenta la intensidad, la frecuencia y la duración de la tarea.

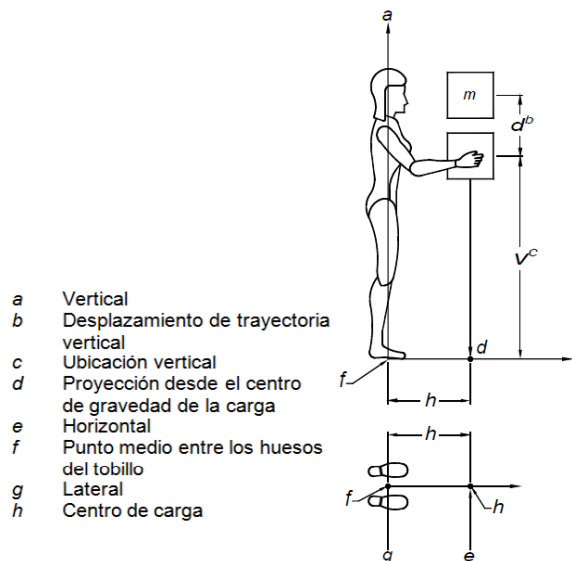
Para evaluar el puesto de trabajo en la zona de paletizado se aplicará la ecuación del NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*) incluida en la NTC 5693-1, la cual permite evaluar tareas en las que se realizan levantamientos de carga, ofreciendo como resultado el peso máximo recomendado (RWL:

*Recommended Weight Limit*) que es posible levantar en las condiciones del puesto para evitar la aparición de problemas de espalda.

### 1.1.1 ECUACIÓN DEL NIOSH

La ecuación (1) parte de definir un "levantamiento ideal", que sería aquél realizado desde lo que el NIOSH define como "localización estándar de levantamiento". Se trata de una referencia en el espacio tridimensional para evaluar la postura de levantamiento. La distancia vertical del agarre de la carga al suelo es de 75 cm y la distancia horizontal del agarre al punto medio entre los tobillos es de 25 cm. Cualquier desviación respecto a esta referencia implica un alejamiento de las condiciones ideales de levantamiento. En la Figura 2 se muestra las variables de la tarea de levantamiento.

Figura 2. Variables de tarea de manipulación manual



Fuente: Tomado del INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009

$m$ , es la masa del objeto en kilogramos.

$h$ , es la distancia horizontal, en metros, medida desde el punto medio de la línea que une los tobillos hasta el punto medio en el que las manos agarran el objeto en posición de levantamiento.

$v$ , es la ubicación vertical, en metros, determinada por la medición de la distancia desde el piso hasta el punto en el que las manos agarran el objeto.

$d$ , es el desplazamiento de trayectoria vertical, en metros, desde el origen hasta el destino del levantamiento.

$f$ , es la frecuencia de levantamiento, expresada como un número promedio de levantamientos por minuto.

$\alpha$ , es el ángulo de asimetría, en grados, ver Figura 4.

$c$ , corresponde a la calidad de agarre.

La ecuación del NIOSH calcula el límite para la masa del objeto.

$$m \leq m_{ref} \cdot h_M \cdot v_M \cdot d_M \cdot \alpha_M \cdot f_M \cdot c_M \quad (1)$$

donde

$m_{ref}$ , es la masa de referencia para el grupo identificado de población de usuarios.

Las cajas con el producto terminado de la ILC tienen una masa de aproximadamente 15 kg, entonces se toma como masa de referencia 20 kg que corresponden a la población trabajadora en general, incluyendo jóvenes y adultos mayores. El 99% de población usuarios son protegidos, puesto que los operarios encargados del paletizado de producto terminado son hombres (ver Cuadro 1).

$h_M$ , es el multiplicador de distancia horizontal.

El factor  $h_M$  (*horizontal multiplier*) está relacionado con la distancia horizontal  $h$ , medida entre la proyección sobre el suelo del punto medio entre los agarres de la carga y la proyección del punto medio entre los tobillos, expresado por la ecuación (2).

$$h_M = \begin{cases} 0,25 & \text{si } h \leq 0,25 \text{ entonces } h_M = 1 \\ h & \text{si } h > 0,63 \text{ entonces } h_M = 0 \end{cases} \quad (2)$$

La distancia  $h$  que se mide en la operación de paletizado de la ILC varía entre 0,2 m y 0,25 m, reemplazando en (2) se tiene que el factor  $h_M = 1$ .

Cuadro 1. Masa de referencia recomendada para diferentes poblaciones

Campo de aplicación	$m_{ref}$	Porcentaje de población de usuarios protegido (M = mujeres, H = hombres)			Grupo poblacional	
	kg	M y H	M	H		
Uso no laboral	5	Datos no disponibles			Niños y ancianos	Población total
	10	99	99	99	Población realizando actividades no laborales	
Uso laboral	15				Población trabajadora en general, incluyendo jóvenes y adultos mayores	Población trabajadora en general
	20	95	90	99		
	23					
	25	85	70	95	Población trabajadora adulta	Población trabajadora especializada en circunstancias particulares
	30	Ver NOTA			Población trabajadora adulta especializada	
	35					
	40					

NOTA. Circunstancias particulares. Pese a que deben ser hechos todos los esfuerzos para evitar las manipulaciones manuales o para reducir los riesgos a los niveles más bajos posibles, pueden existir circunstancias excepcionales en las cuales la masa de referencia recomendada puede superar los 25 kg (por ejemplo cuando los desarrollos tecnológicos o las intervenciones no están suficientemente avanzadas). En estas circunstancias excepcionales deben ser adoptadas una atención y una importancia acrecentada a la educación y a la capacitación de la persona (por ejemplo un conocimiento especializado relativo a la identificación y a la reducción de los riesgos), en cuanto a las condiciones de trabajo predominantes y a la capacidad física de las personas

Fuente: Tomado del INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009.

$v_M$ , es el multiplicador de ubicación vertical.

El factor  $v_M$  (*vertical multiplier*) está relacionado con la distancia vertical  $v$  (ver Figura 3) medida desde el punto de agarre de la carga hasta el suelo, expresado por la ecuación (3).

$$v_M = 1 - 0,3 \cdot |0,75 - v| \quad \begin{array}{l} \text{si } v > 1,75 \text{ entonces } v_M = 0 \\ \text{si } v < 0 \text{ entonces } v_M = 0 \end{array} \quad (3)$$

La distancia  $v$  medida entre el agarre de la caja hasta el suelo es de 0,75 m, reemplazando en (3) se tiene que el factor  $v_M = 1$ .

$d_M$ , es el multiplicador de desplazamiento vertical.

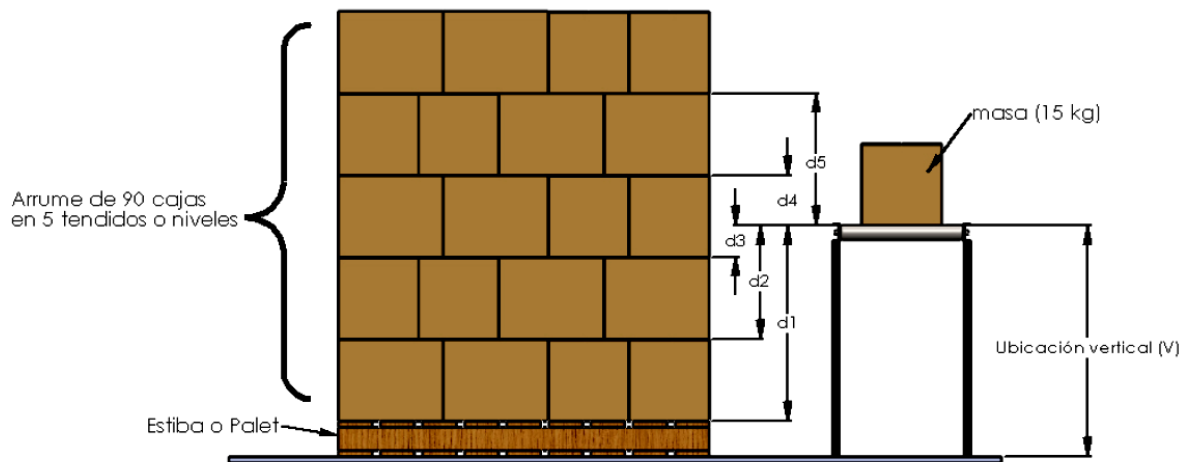
El factor  $d_M$  (*distance multiplier*), donde  $d$  es la distancia medida verticalmente desde el punto de agarre de la carga hasta su destino, derivado de la ecuación (4).

$$d_M = 0,82 + \frac{0,045}{d} \quad \begin{array}{l} \text{si } d > 1,75 \text{ entonces } d_M = 0 \\ \text{si } d < 0,25 \text{ entonces } d_M = 1 \end{array} \quad (4)$$

El arrume de 90 cajas sobre la estiba de producto terminado de la ILC, se realiza en 5 tendidos o niveles de 18 cajas cada uno, por lo tanto, se tienen una distancia  $d$  para cada nivel. Tomando la distancia del nivel 1 como  $d1$  y así sucesivamente hasta el nivel 5 como  $d5$  (ver Figura 3), se tienen los siguientes valores:

$d1 = 0,633$  metros  
 $d2 = 0,368$  metros  
 $d3 = 0,103$  metros  
 $d4 = 0,163$  metros  
 $d5 = 0,428$  metros

Figura 3. Variables de la tarea de paletizado de la ILC



Aplicando la ecuación (4) para determinar el multiplicador de desplazamiento vertical  $d_M$  en cada nivel, se tiene que:

Para	$d1 = 0,633$ metros,	$d_M = 0,891$
Para	$d2 = 0,368$ metros,	$d_M = 0,94$
Para	$d3 = 0,103$ metros,	$d_M = 1,25$
Para	$d4 = 0,163$ metros,	$d_M = 1,09$
Para	$d5 = 0,428$ metros,	$d_M = 0,92$

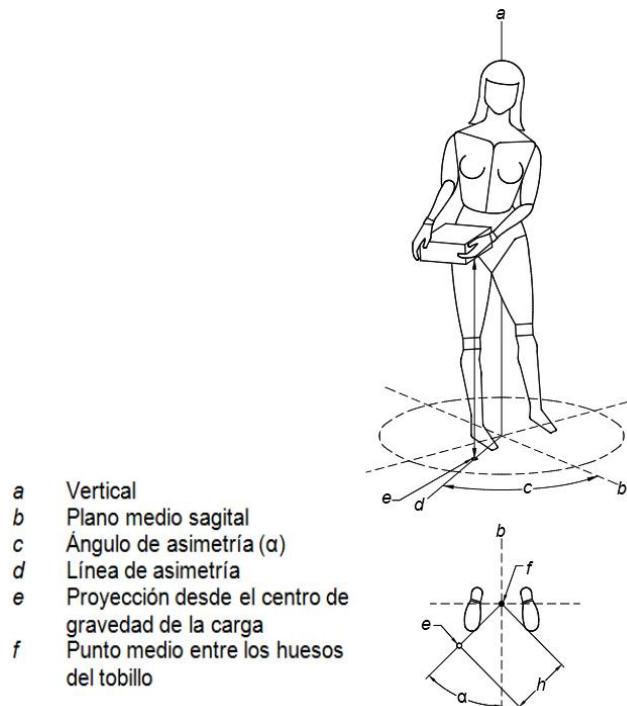
$\alpha_M$ , es el multiplicador de asimetría (ver Figura 4).



Cuando un movimiento empieza o termina fuera del plano medio-sagital, como muestra la Figura 4 se considera movimiento asimétrico, el cual deberá evitarse siempre que sea posible. El multiplicador de asimetría se deriva de la ecuación (5).

$$\alpha_M = 1 - 0,0032 \cdot \alpha \quad \text{si } \alpha > 135^\circ \text{ entonces } \alpha_M = 0 \quad (5)$$

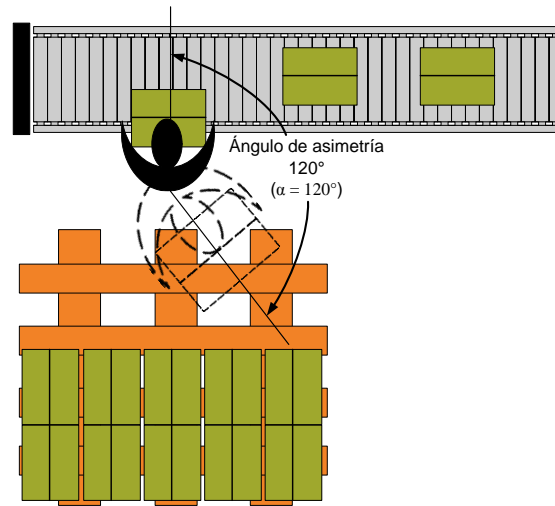
Figura 4. Ángulo de asimetría de manipulación manual



Fuente: Tomado de (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009).

Para determinar el ángulo de giro que realizan los operarios de producto terminado en la ILC, se observan los movimientos de 3 de ellos cuando hacen el paletizado de 90 cajas. Se encuentra que el ángulo de asimetría  $\alpha$  es en promedio de  $120^\circ$  (ver Figura 5), por lo tanto, según la ecuación (5), el multiplicador de asimetría es  $0,616$  ( $\alpha_M = 0,616$ ).

Figura 5. Ángulo de asimetría en la operación de paletizado manual en la ILC



$f_M$ , es el multiplicador de frecuencia.

El factor  $f_M$  (*frequency multiplier*) se determina, considerando en primer lugar, la duración continua de la tarea de levantamiento y luego la duración del periodo de descanso que sigue inmediatamente a la tarea de levantamiento.

El periodo de trabajo y el periodo de descanso se consideran en conjunto como un ciclo de trabajo-descanso. El periodo de trabajo para paletizar las 90 cajas en una estiba se realiza en 8,1 minutos y el periodo de descanso es el doble del periodo de trabajo, es decir 16,2 minutos, entonces el ciclo trabajo-descanso se realiza en 24,3 minutos. Durante este ciclo se realizan 90 levantamientos, lo que genera una frecuencia de levantamientos de 3,7 levantamientos/min.

En la ILC la jornada laboral es de 9 horas, teniendo en cuenta los tiempos paros por alimentación, pausas activas, entre otros, las 9 horas laborales se reducen a un promedio de 7,5 horas.

El valor del multiplicador de frecuencia se determina a partir del Cuadro 2, donde se requiere el tiempo de duración de la tarea ( $t_L = 7,5$  horas), la ubicación vertical de la caja al inicio del levantamiento ( $v = 0,75$  m) y la frecuencia de levantamientos (3,7 levantamientos/min). Se tiene que el valor del multiplicador de frecuencia para el proceso del paletizado manual de la ILC es 0,45 ( $f_M = 0,45$ ).

Cuadro 2. Valores del multiplicador de frecuencia ( $F_M$ )

Frecuencia de levantamiento número de levantamientos/min	Valores de $F_M$					
	$t_L \leq 1h$		$1h < t_L \leq 2h$		$2h < t_L \leq 8h$	
	$V < 0,75$ m	$V \geq 0,75$ m	$V < 0,75$ m	$V \geq 0,75$ m	$V < 0,75$ m	$V \geq 0,75$ m
$\leq 2$	1,00	1,00	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,97	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,80	0,80	0,60	0,60	0,35	0,35
6	0,75	0,75	0,50	0,50	0,27	0,27
7	0,70	0,70	0,42	0,42	0,22	0,22
8	0,60	0,60	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,30	0,30	0,00	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0,00	0,13
11	0,41	0,41	0,00	0,23	0,00	0,00
12	0,37	0,37	0,00	0,21	0,00	0,00
13	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
$>15$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Tomado del INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009.

$c_M$ , es el factor de acoplamiento para la calidad de agarre.

Según (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009), los criterios para sujetar la caja de producto terminado de la ILC, para tener una calidad de agarre buena o aceptable no se cumplen, pues para que se cumpla alguna de estas dos condiciones, la caja debe tener como mínimo muescas o manijas de agarre (ver Figura 6), entonces con base en el Cuadro 3 se tiene una calidad de agarre deficiente y como la altura a la que está la caja al inicio del levantamiento es de 0,75 m ( $v = 75$  m), se tiene que el multiplicador de acople es 0,90 ( $C_M = 0,90$ ).

Cuadro 3. Multiplicador de acople ( $C_M$ ) para la calidad de agarre

Calidad de agarre	Valores de $C_M$	
	Altura $< 0,75$ m	Altura $\leq 0,75$ m
Buena	1,00	1,00
Aceptable	0,95	1,00
Deficiente	0,90	0,90

Fuente: Tomado del INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009.

Con los factores de la ecuación del NIOSH identificados, se procede a calcular el límite para la masa de la caja bajo las condiciones presentes en la tarea de paletizado manual del producto terminado de la ILC. El límite de masa se obtiene para cada nivel del paletizado (ver Figura 3).

La ecuación (1), indica que el resultado del producto de los factores  $m_{ref}$ ,  $h_M$ ,  $v_M$ ,  $d_M$ ,  $\alpha_M$ ,  $f_M$  y  $c_M$  es la masa límite que se debe manipular bajo estas condiciones, la cual debe ser igual o mayor que la masa real, de lo contrario se deben corregir dichos factores para alcanzar y en lo posible superar la masa real.

El resultado del análisis ergonómico realizado a la tarea del paletizado manual de la ILC, se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Masa límite bajo las condiciones del paletizado de producto terminado en la ILC

<b>NIVEL</b>	<b><math>m_{ref}</math></b>	<b><math>h_M</math></b>	<b><math>v_M</math></b>	<b><math>d_M</math></b>	<b><math>\alpha_M</math></b>	<b><math>f_M</math></b>	<b><math>c_M</math></b>	<b>masa límite kg</b>	<b>masa real kg</b>
1	20	1	1	0,9	0,6	0,45	0,9	4,4	15
2	20	1	1	0,94	0,6	0,45	0,9	4,7	15
3	20	1	1	1,25	0,6	0,45	0,9	6,2	15
4	20	1	1	1,09	0,6	0,45	0,9	5,4	15
5	20	1	1	0,92	0,6	0,45	0,9	4,6	15

Según el Cuadro 4, las condiciones de trabajo en la paletización manual del producto terminado de la ILC están dadas para la manipulación de cargas con una masa límite muy inferior a la masa real (15 kg).

Con base en el anterior planteamiento se formula la siguiente cuestión

**¿Cuál es el diseño cinemático adecuado de un sistema paletizador de producto terminado para la ILC?**

El diseño cinemático está conformado por el análisis y la síntesis de una estructura o mecanismo, con el objetivo de determinar su estructura y dimensiones cinemáticas, de tal manera que realice su tarea de forma óptima.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El paletizado manual de producto terminado de la ILC, no cuenta con buenas condiciones ergonómicas (ver Cuadro 4), dado que el estudio realizado sobre el puesto de trabajo indica que los operarios están realizando el levantamiento de una carga mucho más pesada que la permitida con las condiciones actuales de trabajo, véase sección 1.1.

La NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5693-1 (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009) dice que “Aquellos que diseñan nuevos sistemas de trabajo o instalan nuevas plantas deben considerar la introducción de un sistema de manipulación integrado que, cuando resulte apropiado, utilice plenamente la manipulación automática o mecánica en lugar de un sistema manual”.

Este proyecto es un aporte tecnológico para las líneas de producción de la ILC, con el cual se optimiza la operación de paletizado en la bodega de producto terminado y mejora las condiciones laborales de los operarios.

Actualmente la competitividad de una empresa va de la mano con el nivel tecnológico aplicado en sus procesos de producción, para garantizar una calidad unificada en cada uno de sus productos, respuesta oportuna para los clientes y lograr un nivel elevado de confiabilidad tanto al interior como al exterior de la organización.

Desde un punto de vista empresarial la aplicación de este proyecto tiene los siguientes beneficios (Velasquez C., 2004):

**Seguridad:** Ahorros en compra de implementos de seguridad para trabajos en zonas peligrosas (cascos, botas, guantes, iluminación, trajes especiales, arneses, etc.), seguros de vida, hospitalización y accidentes, indemnizaciones a familiares, costos de representación legal, multas provenientes de organismos reguladores de la actividad laboral, tiempo fuera de servicio de los equipos al producirse un accidente, reemplazo o reparación de equipos afectados.

**Calidad:** Ahorros en reproceso, aumento de la demanda debido a la mejora esperada de la calidad del producto, disminución de la devolución de artículos por parte del consumidor, aumento de la demanda por parte de clientes nacionales y/o internacionales debido a la continuidad en el cumplimiento de las especificaciones.

**Logística:** Disminución de los costos operacionales.

Este proyecto es relevante para la ILC y otras empresas que lo vean como una idea productiva para mejorar la operación de paletizado del producto terminado.

El desarrollo y culminación de este proyecto son un requerimiento para optar al título de Magister en Sistemas Automáticos de Producción.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar el diseño cinemático de un sistema de paletizado de cajas para la ILC.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**1.3.2.1** Identificar y cuantificar los requerimientos de la ILC en la operación de paletizado de producto terminado.

**1.3.2.2** Seleccionar el tipo sistema adecuado para realizar la operación de paletización de producto terminado en la ILC.

**1.3.2.3** Desarrollar el análisis cinemático del sistema de paletizado de producto terminado de la ILC.

**1.3.2.4** Realizar la síntesis dimensional del sistema de paletizado basándose en los índices cuantificados en el objetivo 1.3.2.1.

**1.3.2.5** Verificar el cumplimiento de los índices de desempeño del sistema paletizador de producto terminado de la ILC, cuantificados en el objetivo 1.3.2.1.

## **1.4 MARCO REFERENCIAL**

### **1.4.1 Marco Teórico**

A continuación se describen las propuestas de diseño de diferentes autores, las cuales se analizaron para definir una metodología particular e implementarla en el desarrollo de este proyecto.

Para definir e implementar un proceso de diseño con el fin de enfrentar un problema no estructurado, existen varias posibles soluciones, las cuales, incluyen un número de pasos identificados para cada una. Según R. L. Norton (Norton, 2006), en la siguiente lista se hace referencia a un proceso de diseño de diez pasos:

1. Identificación de la necesidad.
2. Investigación de antecedentes.
3. Enunciado del objetivo.
4. Especificaciones de la tarea.
5. Síntesis.
6. Análisis.
7. Selección.
8. Diseño detallado.
9. Prototipos y pruebas.
10. Producción.

Los pasos anteriores no requieren de un seguimiento secuencial, puesto que, durante todo el proceso de diseño es necesaria una constante iteración, de tal manera que se reformen, cambien o clarifiquen ideas, conceptos, desarrollos, planteamientos, u otros, para que correspondan a los objetivos planteados.

Otra propuesta de diseño, específicamente para el caso de robots y mecanismos, es la establecida un por J. P. Merlet y D. Daney (Merlet & Daney, 2008):

1. Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.
2. Elegir la estructura del mecanismo.
3. Elegir el dimensionamiento del robot.

Cecarelli (Ceccarelli, Carbone, & Ottaviano, 2005) concluye que los sistemas automáticos de manipulación son cada vez más utilizados en aplicaciones industriales e incluso no industriales. La dualidad entre manipuladores serie y



paralelo ya no es entendida como una competencia, por el contrario son concebidas como alternativas para desarrollar tareas de manipulación.

Merlet (Merlet, 2006) dice que para el diseño de un sistema mecánico primero se debe elegir una arquitectura mecánica, lo que puede realizarse a través de una síntesis a partir de las condiciones iniciales, como lo es el número de grados de libertad requerido. En segundo lugar, la arquitectura mecánica elegida debe ser modelada para obtener una síntesis geométrica.

Según B. Siciliano (Siciliano & Khatib, 2008), Las etapas de diseño de un sistema manipulador se pueden descomponer en 2 fases:

1. **Síntesis estructural:** determinar la topología de la cadena cinemática que subyace a la estructura mecánica en primer lugar el tipo de robot: serie, paralelo o híbridos. Luego, se definen los tipos de articulaciones.

2. **Síntesis geométrica:** determinar las dimensiones de la estructura con base en la arquitectura del robot, con el fin de abarcar el espacio de trabajo requerido.

Para realizar el presente trabajo (Diseño Cinemático de un Sistema Paletizador de Producto Terminado de la ILC), se adoptó una nueva metodología, la cual involucra las metodologías descritas y consiste en los siguientes cinco pasos:

1. Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.
2. Síntesis de tipo.
3. Desarrollo del modelo cinemático del sistema.
4. Síntesis dimensional.
5. Validación de los índices.

Primer paso (Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos), consiste en interpretar numéricamente los requerimientos de la ILC en la tarea de paletización manual.

Segundo paso (Síntesis de tipo), consiste en seleccionar una estructura de aplicaciones industriales que se pueda implementar en la ILC en el proceso de paletización. Las diferentes propuestas se obtienen de recursos bibliográficos y de experiencia del diseñador.

Tercer paso (Desarrollo del modelo cinemático del sistema), la cinemática estudia el movimiento del mecanismo con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que lo producen, en donde se pretende conocer las relaciones entre la posición y orientación del extremo final del robot con los valores angulares de las articulaciones. El modelo cinemático del sistema paletizador de producto terminado para la ILC se desarrolla analíticamente, el cual inicialmente no requiere de dimensiones.

Cuarto paso (Síntesis dimensional), consiste en determinar las dimensiones del esquema cinemático seleccionado en el paso 2 (Síntesis de tipo), de manera que realice la tarea de paletizado en el espacio de trabajo requerido.

Quinto paso (Validación de los índices), consiste en la comprobación del cumplimiento de los requisitos (índices numéricos), por el sistema de paletizado diseñado.

Esta propuesta metodológica se desarrolla en la sección 1.5, correspondiente al capítulo de Diseño Metodológico.

## **1.4.2 Marco conceptual**

En el marco conceptual se definen los conceptos correspondientes a cada paso de la metodología empleada para el desarrollo del diseño cinemático de un sistema paletizador de producto terminado de la ILC.

### **1.4.2.1 Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.**

La primera etapa de este proyecto, consiste en justificar el desarrollo del diseño cinemático de un sistema paletizador de producto terminado de la ILC, a partir de la evaluación del proceso de paletizado manual, con base en la norma de ergonomía manipulación manual parte 1: Levantamiento y transporte (NTC 5693-1) (INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, 2009), véanse las secciones 1 y 2, después de haber identificado el problema, se implementa el diseño metodológico propuesto en el marco teórico, véase la sección 1.4.1.

Para determinar los requisitos que tiene la ILC en la tarea del paletizado, se cuantifica el desplazamiento total que debe realizar el sistema para paletizar el producto terminado. Este desplazamiento se calcula a partir de la configuración de la estiba y asistido por el software Matlab. Con estos datos se establecen el área y

el volumen del sistema paletizador. En esta etapa se identifican los índices numéricos.

#### **1.4.2.2 Síntesis de tipo.**

La segunda etapa consiste en definir el tipo de estructura que se implementará para realizar el diseño del sistema de paletizado de la ILC (síntesis de tipo). Con base en los requisitos, se determina que la estructura debe tener 4 grados de libertad (GDL): 3 GDL corresponden a la translación de las cajas y 1 GDL corresponde a la orientación en el plano horizontal.

En la selección de la estructura se analizan las propuestas de varios fabricantes con respecto a los requisitos de la tarea, y se encuentra que ninguno cumple completamente. Como la velocidad del sistema paletizador debe ser alta (en promedio 1,21 metros por segundo) para lograr arrumar de a una caja en la estiba, entonces, se opta por trasladar de a 4 y de a 5 cajas según la configuración en la estiba para bajar la velocidad del sistema de paletizado. Un grupo de cajas se pueden trasladar desde el transportador hasta la estiba con la orientación con la que están en el transportador, pero las otras se deben de girar 90° para ubicarlas en la estiba.

Para girar las cajas, se selecciona entre 2 opciones, propuestas con base en la experiencia del diseñador y aplicaciones industriales, un sistema de 1 GDL que realice el giro a las cajas que lo requieran desde el mismo transportador.

Para seleccionar el sistema de traslado de cajas desde el transportador hasta la estiba, requiriendo sólo 2 GDL no se necesita de una búsqueda intensiva, por ejemplo usando grafos, sino que basta con una exploración de combinatoria y de literatura.

En ingeniería mecánica es común iniciar un proceso de diseño con la búsqueda de estructuras o cadenas en serie, según J. P. Merlet y D. Daney (Merlet & Daney, 2008), ya que estas presentan un número limitado de opciones, lo que no se puede decir de las estructuras paralelas o de cadena cerrada, debido a que el número de opciones que se han propuesto en literatura es grande, tal que supera a los 200.

#### **1.4.2.3 Análisis cinemático.**

El análisis cinemático tiene por objetivo determinar la relación (posición, velocidad y aceleración) de cada uno de los elementos que conforman el sistema mecánico, en función de las coordenadas.

#### **1.4.2.3.1 Cinemática inversa.**

Determina la configuración de la estructura, dadas la posición y orientación del extremo o efector final.

#### **1.4.2.3.2 Cinemática Directa.**

Determina la posición y orientación del extremo de la estructura respecto al sistema de referencia, dados los parámetros geométricos y los valores articulares

#### **1.4.2.4 Análisis de singularidad.**

Las configuraciones singulares son aquellas en la cuales el sistema manipulador pierde o gana uno o más grados de libertad instantáneamente, por lo tanto, se afecta su capacidad de movilidad.

Según las propiedades de las matrices jacobianas, las configuraciones singulares se clasifican en tres tipos (Tsai, 1999). El primer tipo ocurre cuando la matriz  $j_x$  es singular y se conoce como Singularidad Directa, el segundo tipo ocurre cuando la matriz  $j_q$  es singular y se conoce como Singularidad Inversa, y el tercer tipo es cuando ambas matrices son singulares y se conoce como Singularidad Combinada.

#### **1.4.2.5 Síntesis dimensional.**

En esta etapa se determinan unas dimensiones apropiadas de la estructura seleccionada, con base en el análisis cinemático.

#### **1.4.2.5.1 Síntesis dimensional óptima.**

Para desarrollar la optimización dimensional del sistema paletizador, se trabaja con un Índice Global y Exhaustivo como función objetivo para minimización, con la finalidad de obtener una estructura que tenga un desempeño óptimo en todo el espacio de trabajo.

## 1.5 DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología empleada para realizar este proyecto, parte del análisis de una revisión literaria de diferentes propuestas sobre el proceso de diseño, las cuales, se describen en la sección 1.4.1. En el Cuadro 5, se puede ver la relación que presenta la metodología empleada para la realización de este proyecto, con la de otros autores.

Cuadro 5. Relación de la metodología de este proyecto con la de otros autores

<b>PROPUESTAS DE DISEÑO</b>				
<b>Metodología para realizar este proyecto</b>	<b>R. L. Norton (Norton, 2006)</b>	<b>J. P. Merlet y D. Daney (Merlet &amp; Daney, 2008)</b>	<b>J. P. Merlet (Merlet, 2006)</b>	<b>B. Siciliano (Siciliano &amp; Khatib, 2008)</b>
1. Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.	1. Identificación de la necesidad. 2. Investigación de antecedentes. 3. Enunciado del objetivo. 4. Especificaciones de la tarea.	1. Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.	1. primero se debe elegir una arquitectura mecánica, lo que puede realizarse a través de una síntesis a partir de las condiciones iniciales, como lo es el número de grados de libertad requerido.	
2. Síntesis de tipo.	5. Síntesis. 6. Análisis. 7. Selección.	2. Elegir la estructura del mecanismo.		1. Síntesis estructural: determinar la topología de la cadena cinemática que subyace a la estructura mecánica, en primer lugar el tipo de robot: serie, paralelo o híbridos. Luego, se definen los tipos de articulaciones.
3. Modelo cinemático del sistema.	8. Diseño detallado.	3. Elegir el dimensionamiento del robot.	2. En segundo lugar, la arquitectura mecánica elegida debe ser modelada para obtener una síntesis geométrica.	
4. Síntesis dimensional.				2. Síntesis geométrica: determinar las dimensiones de la estructura con base en la arquitectura del robot, con el fin de copar el espacio de trabajo requerido.
5. Validación de índices.				
	9. Prototipos y pruebas. 10. Producción.			

Nota: Las líneas punteadas indican la prolongación de los pasos, más no la división de una celda.

La propuesta de diseño de R. L. Norton (Norton, 2006), está definida para un problema no estructurado, lo que indica que al final del paso 4 (Especificaciones de la tarea) el problema debe tener una estructura, de manera que se pueda seleccionar el área del conocimiento que se implementará para el diseño de su solución. Por otra parte, los pasos 9 y 10 de R. L. Norton no se incluyen en las otras propuestas de diseño, ya que estas, incluida la propuesta metodológica para

este proyecto, se limitan a un diseño que no contempla la etapa de prototipos ni construcción.

El planteamiento de esta metodología se realiza con la intención de involucrar los procesos de diseño analizados en una propuesta unificada, expuesta en el Cuadro 5. Entonces, el diseño metodológico se desarrolla en las siguientes etapas:

1. Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.
2. Síntesis de tipo.
3. Desarrollo del modelo cinemático del sistema.
4. Síntesis dimensional.
5. Validación de índices.

La propuesta metodológica descrita en estos cinco pasos, no requiere aplicación secuencial, por el contrario es un desarrollo iterativo que conlleve al logro del objetivo propuesto en cada instancia.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA**

En este capítulo se implementa la metodología planteada en la sección 1.5 para desarrollar el Diseño Cinemático de un Sistema Paletizador de Producto Terminado de la ILC.

#### **2.1 TRADUCIR LOS DESEOS DEL USUARIO FINAL EN ÍNDICES NUMÉRICOS**

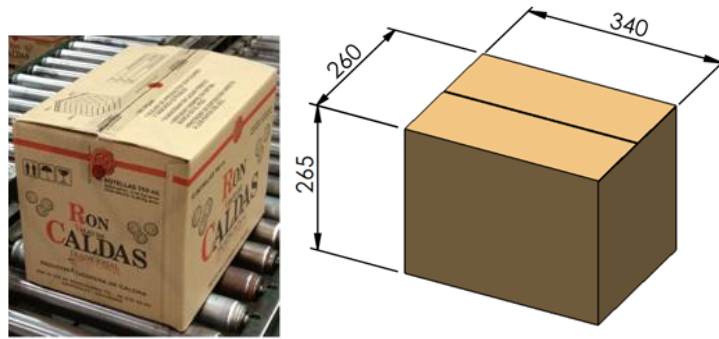
Los índices numéricos son el resultado de cuantificar las necesidades del usuario final. La traducción de los deseos del usuario tiene un significado físico real y se deben definir en sentido matemático.

El proceso de envasado en la ILC se lleva a cabo en cuatro líneas de producción, la cuales, presentan velocidad variable que depende de factores como: calidad de materia prima (etiquetas, envase, goma, cartón, entre otros), tipo de presentación o producto, y por último la línea donde se va envasar el licor, es decir, las cuatro líneas de producción no ofrecen una velocidad similar; siendo la línea número 4 la más lenta y también donde se producen licores de baja demanda, y la línea más rápida es la número 2 donde se ha producido hasta 16 020 botella/hora (b/h), las líneas número 1 y número 3 presentan velocidades más bajas.

El diseño cinemático de un sistema paletizador de producto terminado para la ILC se realiza con base en la producción de la línea número 2, la cual representa la mayor demanda para el sistema manipulador. La palabra sistema puede hacer referencia a un mecanismo, un robot, u otro método de paletizado.

El proceso de producción representado en la Figura 1, muestra la etapa de encajonado, en donde se empaca el producto final en una caja de cartón, ver Figura 6. Una vez empacado el producto final, se dirigen las cajas con una masa de aproximadamente 15 kg hacia la zona de producto terminado, por lo tanto, su peso es de 147 N.

Figura 6. Caja de cartón para el producto terminado de la ILC y sus dimensiones



Dimensiones en milímetros.

En la zona de producto terminado, se culmina el proceso apilando manualmente las cajas en una estiba (Ver Figura 7 y Figura 8).

Figura 7. Estiba completa, isométrico

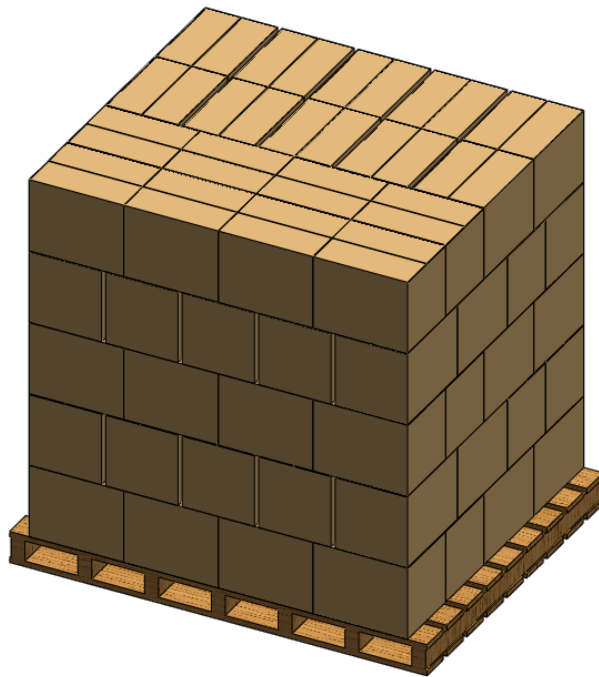
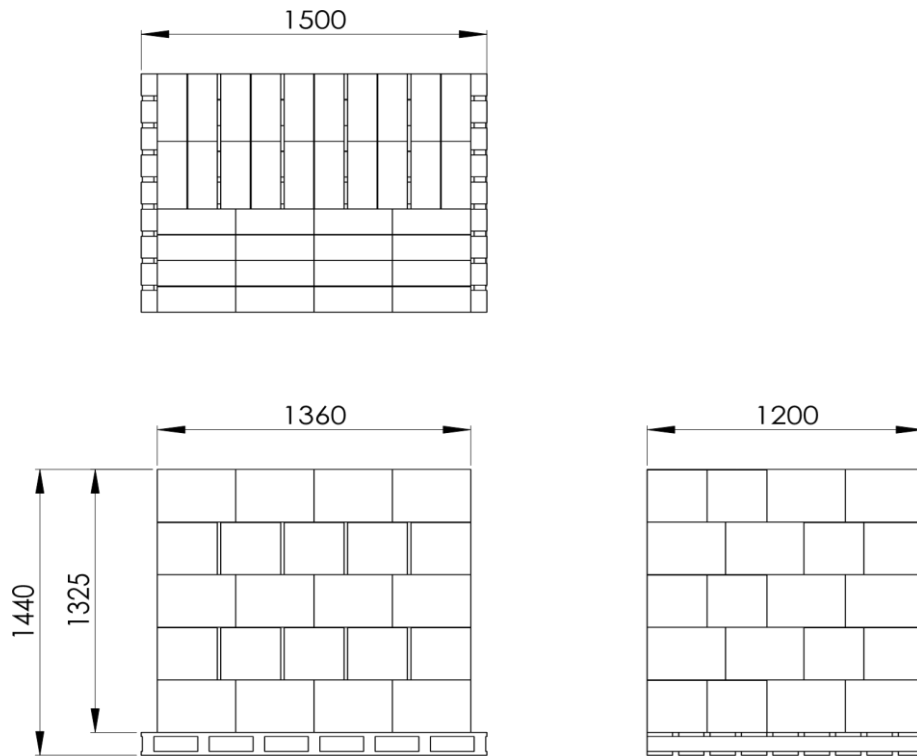




Figura 8. Estiba completa, vistas



Dimensiones en milímetros.

La estiba se compone de 90 cajas distribuidas en 5 niveles y cada nivel cuenta con 18 cajas, para un total de 1 080 botellas por estiba, se realiza una distribución contraria (giro 90° en el plano horizontal) en cada nivel para estabilizar la estiba.

Partiendo del hecho de que la mayor velocidad de producción es de 16 020 b/h (botellas por hora), entonces una caja de 12 botellas se produce en 2,7 segundos y para conformar una estiba completa se requiere de 243 segundos, lo que indica que el sistema manipulador cuenta con 4,05 minutos para apilar las cajas en la estiba.

Para determinar la velocidad promedio con que se debe trasladar cada caja desde la ubicación inicial hasta su posición en la estiba se debe conocer esta distancia, la cual, se puede obtener de las Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

Figura 9. Posición de la estiba y del transportador de cajas, isométrico

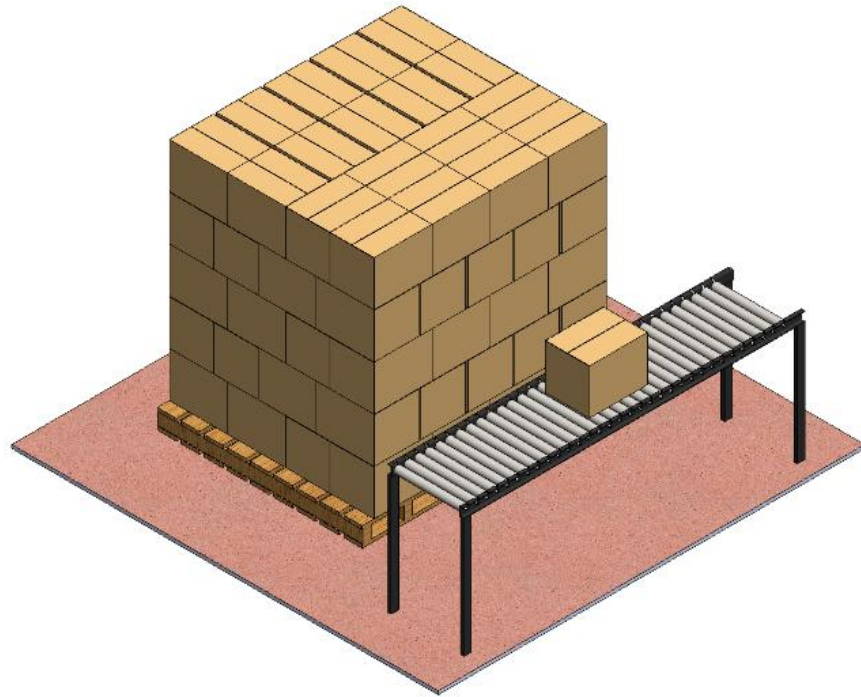
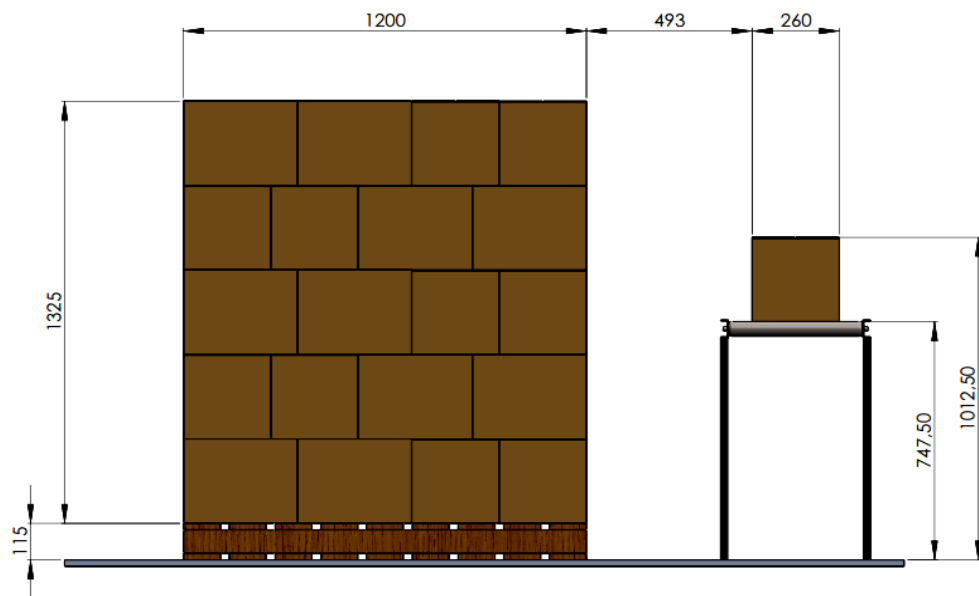
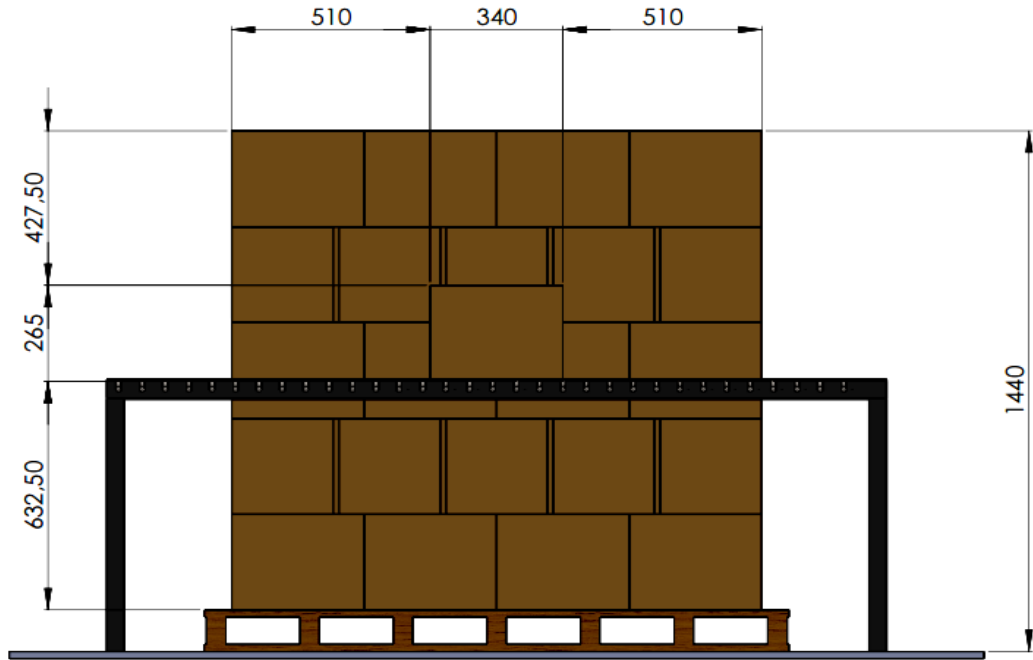


Figura 10. Posición de la estiba y del transportador de cajas, vista lateral



Dimensiones en milímetros.

Figura 11. Posición de la estiba y del transportador de cajas, vista frontal



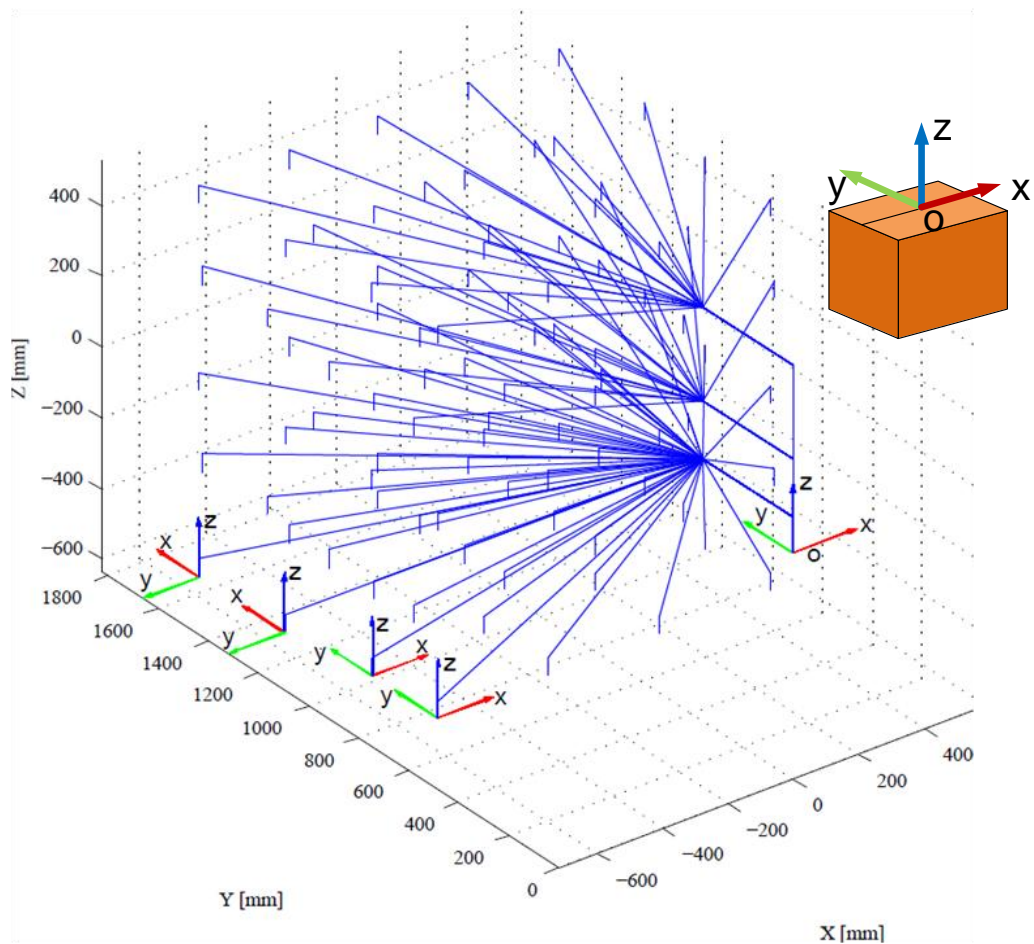
Dimensiones en milímetros.

Con base en las dimensiones determinadas en las Figura 10 y Figura 11, se traza la trayectoria que debe generar el sistema manipulador para apilar en la estiba las 90 cajas, ver Figura 12, también se realiza la suma de cada uno de los 90 recorridos que debe realizar para acomodar cada caja en su respectiva ubicación en la estiba.

La suma de los 90 recorridos genera la distancia total que debe seguir el manipulador para completar una estiba, con este dato y con el tiempo mínimo que permite el proceso trabajando a su máxima velocidad (4,05 minutos) se obtiene la velocidad con que se debe desplazar cada caja para completar la estiba en el tiempo establecido; se buscan estos datos (trayectoria, distancia total y velocidad) para definir cuantitativamente cómo es el proceso de paletizado en la actualidad y posteriormente compararlo con el sistema a proponer. La trayectoria se realiza con base en los movimientos que hacen los operarios para trasladar las cajas desde el transportador hasta su ubicación en la estiba.

El espacio de trabajo que debe ser abarcado por el mecanismo paletizador está dado a partir del centro de gravedad de las cajas ubicadas en los extremos de la estiba.

Figura 12. Desplazamiento Total y la representación del sistema de coordenadas en una caja

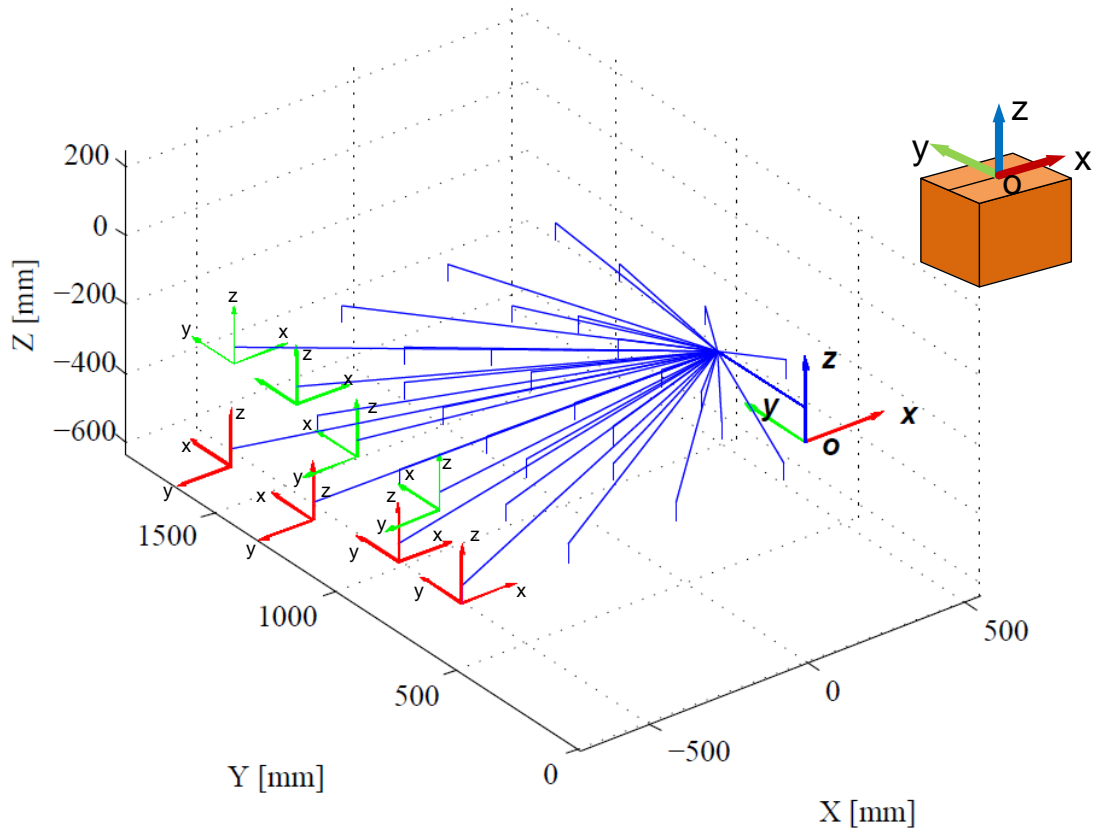


El sistema paletizador debe ser generado por un mecanismo que tenga un desplazamiento tridimensional (Ejes x, y, z) y también debe realizar un movimiento rotacional de  $90^\circ$  alrededor del eje z. Por lo anterior se requiere un sistema compuesto por 4 GDL, de la siguiente forma: 3GDL son requeridos por los desplazamientos lineales con el fin de obtener la posición deseada, y 1GDL para rotar la caja según su posición en la estiba; en la Figura 12 y Figura 13 se observa el posicionamiento de las cajas respecto al sistema de referencia  $O_{xyz}$ .

El desplazamiento total resultado de la suma de las trayectorias ilustradas en la Figura 12 es de 296 metros, este recorrido lo debe hacer en un tiempo de 4,05 minutos; dando como resultado una velocidad promedio de 1,21m/s.

Para dar estabilidad a la estiba, en cada nivel se rotan las cajas con relación a las del nivel inferior; en la Figura 13 se puede ver que las cajas del segundo nivel (coordenadas de color verde) están rotadas  $90^\circ$  con respecto a las cajas del primer nivel (coordenadas de color rojo).

Figura 13. Desplazamiento y orientación de las cajas en los niveles 1 y 2, con la representación del sistema de coordenadas en la caja



Con base en el análisis realizado en el punto 2.1, se establecen los índices numéricos requeridos (ver Cuadro 6) para el desarrollo del Diseño Cinemático de un Sistema Paletizador de Producto Terminado de la Industria Licorera de Caldas.

Cuadro 6. Índices numéricos

ÍNDICES NUMÉRICOS	
Cantidad de estibas	1
Grados de Libertad	4
Cajas por estiba	90
Volumen de Trabajo	2,6 m <sup>3</sup>
Tiempo de conformado de una estiba	4,05 min.
Velocidad Media	1,21 m/s
Ciclos por minuto	22,22

## 2.2 SÍNTESIS DE TIPO

Se refiere a la definición del tipo de mecanismo mejor adaptado al problema. En el Cuadro 7 se muestran las características de algunos sistemas manipuladores comerciales, donde las casillas rojas indican que esta característica no cumple con el requisito y las casillas verdes indican que sí cumplen con el requisito.

Para valorar las características de los sistemas enunciados en el Cuadro 7, se emplea una matriz de decisión (ver Cuadro 8); en la cual se establece un factor de ponderación de cero a uno, este se multiplica por la calificación dada a cada característica (ciclos por minuto, Dimensión del palet con el producto terminado, Capacidad de carga) que posea el manipulador comercial, estas características se evalúan en una escala de uno a diez según el cumplimiento con el requisito, y para su asignación se realiza una interpolación lineal.

El factor de ponderación se asigna a cada requisito, de manera que, su suma sea 1, ver Tabla 1. El requisito de capacidad de carga es cumplido por casi todos los sistemas (ver Cuadro 7) por tal razón tiene menor valor de factor de ponderación. Los requisitos de velocidad en ciclos/min y dimensión del palet con producto terminado se consideran de igual importancia, por tal razón se les asigna el mismo factor de ponderación.

Tabla 1. Factor de ponderación para evaluación de requisitos

REQUISITO	FACTOR DE PONDERACIÓN
Velocidad en ciclo/min	0,35
Dimensión del palet con el producto terminado	0,35
Capacidad de carga	0,30
Total	1

En caso de que la característica del sistema sea muy elevada o sobredimensionada, la interpolación se hace teniendo en cuenta que las calificaciones más altas corresponden a los valores cercanos al requisito, y las calificaciones más bajas corresponden a los valores más alejados del requisito.

Puede ser que la característica de volumen de estibado de los sistemas enunciados en el Cuadro 7 cumplan con el requisito, pero no necesariamente cumplen con la característica de Dimensiones del palet con el producto terminado, como en el caso de los sistemas manipuladores DNC. S.A. (RMS1), ITEKS y SOCO SYSTEM.

Cuadro 7. Sistemas manipuladores comerciales

Fabricante y su arquitectura	Velocidad ciclos / min	Dimensión del palet con el producto terminado en m	Volumen de Estibado m <sup>3</sup>	Capacidad de carga kg
Requisitos	22,22	1,5 x 1,2 x 1,44	2,592	15
DNC. S.A. (RMS1) Cartesiano	7	1,2 x 1,2 x 1,9	2,736	40
KUKA (KR180-2 PA) Esférico	16,6	1,2 x 0,8 x 2,5	2,4	50
MITSUBISHI (RV-2SDB) Esférico	36	*	*	3
ITEKS Paletizado por capas	8	1,2 x 1,2 x 2,1	3,024	30
COMARME (PC AR 200) Cartesiano	10	2 x 1,2 x 2,2	5,28	25
SOCO SYSTEM Cartesiano	10	1,2 x 1,2 x 2,7	3,888	30
ABB (IRB 760) ** Esférico	25	1,5 x 1,2 x 1,44	15,55	60

El color amarillo representa los requisitos de paletización de la ILC, el color rojo indica que este sistema no cumple con el requisito de paletización de la ILC y el verde indica que si cumple con este requisito.

\* Este robot no se utiliza para operaciones de paletizado que requieren un gran espacio de trabajo, sus dimensiones le permiten integrarse en células de trabajo con espacio confinado, ya que presenta ciclo *Pick and Place* de 25 mm x 300 mm x 25 mm y el requisito estipulado para el desarrollo de este diseño es de mínimo 100 mm x 1254,5 mm x 582,5 mm.

\*\* Este sistema manipulador cuenta con un amplio espacio de trabajo, el cual, brinda la posibilidad de acomodar 6 palets en torno a él, cuyo volumen de estibado para estos 6 palets es de 15,55m<sup>3</sup>; lo que indica que supera ampliamente el requisito establecido para la dimensión del palet con el producto terminado.

El formato de la matriz de decisión fue tomado de R. L. Norton (Norton, 2006), el cual se utiliza en este proyecto para definir la síntesis de tipo, ver Cuadro 8. El valor ubicado en la esquina superior izquierda de las celdas rojas y verdes corresponde a la calificación según cumplimiento con el requisito, y el valor ubicado en la esquina inferior derecha de estas mismas celdas corresponde a la multiplicación entre esta calificación y el factor de ponderación, finalmente se suma el resultado de esta multiplicación entre las celdas correspondientes a un fabricante y dicha suma se pone en la columna de evaluación, la cual indica de manera cuantitativa el cumplimiento de cada sistema con los requisitos.

Cuadro 8. Matriz de decisión para síntesis de tipo

Fabricante Y su arquitectura	Velocidad ciclos / min	Volumen de Estibado m <sup>3</sup>	Capacidad de carga kg	EVALUACIÓN
Requisitos	22,22	2,592	15	
Factor de ponderación	0,35	0,35	0,3	1
DNC. S.A. (RMS1) Cartesiano	1 0,35	5* 1,75	5 1,5	3,6
KUKA (KR180-2 PA) Esférico	7 2,45	1 0,35	3 0,9	3,7
MITSUBISHI (RV-2SDB) Esférico	1 0,35	1 0,35	1 0,3	1
ITEKS Paletizado por capas	2 0,7	5* 1,75	7 2,1	4,55
COMARME (PC AR 200) Cartesiano	3 1,05	9 3,15	8 2,4	6,6
SOCO SYSTEM Cartesiano	3 1,05	5* 1,75	7 2,1	4,9
ABB (IRB 760) Esférico	8 2,8	1 0,35	1 0,3	3,45

El color amarillo representa los requisitos de paletización de la ILC, el color rojo indica que este sistema no cumple con el requisito de paletización de la ILC y el verde indica que si cumple con este requisito.

\*Esta casilla al igual que en los sistemas ITEKS y SOCO SYSTEM es roja, puesto que, a pesar de cumplir con el requisito de Volumen de Estibado, no cumple con el requisito de Dimensión del palet con el producto terminado en m, correspondiente al Cuadro 7.



Según la evaluación obtenida de la matriz de decisión representada en el Cuadro 8, se encuentra que ninguno de estos sistemas comerciales cumple con todos los requisitos establecidos para implementar en el Diseño Cinemático de un Sistema Paletizador de Producto Terminado de la Industria Licorera de Caldas.

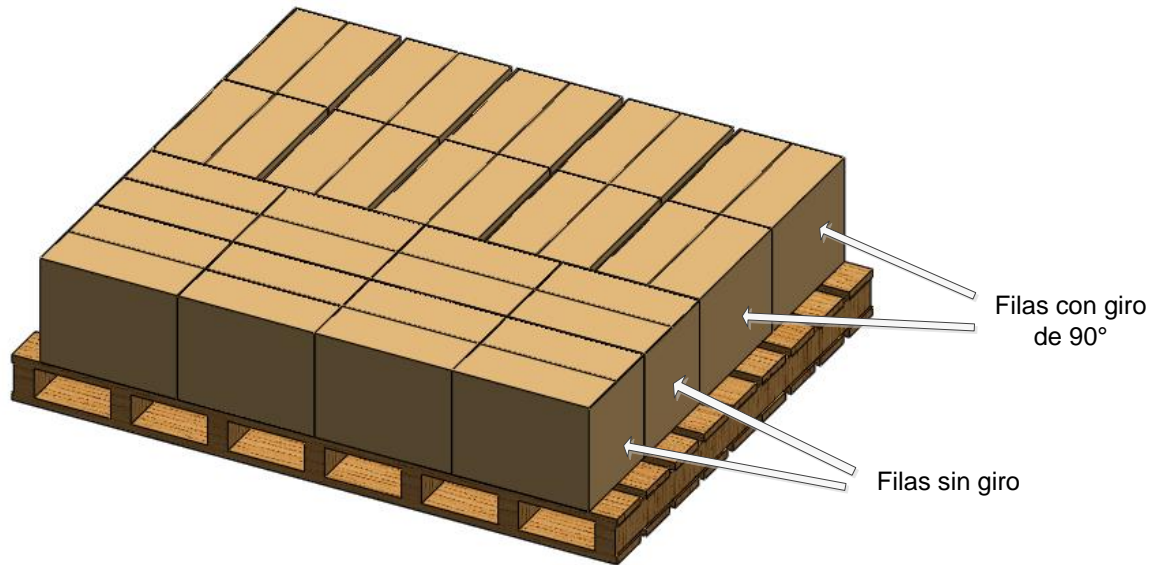
El índice numérico correspondiente a la Velocidad en ciclos por minuto es muy elevado comparándolo con los sistemas comerciales, puesto que, cuando cumple con el índice, como lo hacen los fabricantes MITSUBISHI y ABB, las características de estos sistemas se salen de las proporciones requeridas, ya sea por exceso (ABB) o por defecto (MITSUBISHI), véanse Cuadro 7 y Cuadro 8.

Teniendo en cuenta que el sistema paletizador debe presentar 4GDL, entonces, se pretende alistar de a cinco y de a cuatro cajas en el transportador con la orientación requerida para que luego sean trasladadas y ubicadas en la estiba; para el alistamiento de las cajas en el transportador se implementan 2 GDL y los otros 2 GDL se utilizan para el sistema que traslada las cajas hacia la estiba, véase Figura 14.

Entonces se opta por bajar la velocidad sin que repercuta en el índice de tiempo de estibado ó tiempo de conformado de una estiba, esto se logra trasladando más de una caja desde el sistema transportador hasta su ubicación en la estiba, pero como no todas las cajas presentan igual direccionamiento, se debe realizar una operación de orientación en el sistema transportador para su posterior ubicación en la estiba.

Cada nivel de la estiba está compuesto por 18 cajas, acomodadas en cuatro filas, de las cuales, dos las conforman cuatro cajas cada una, para conformar estas dos filas no es necesario girar las cajas, puesto que tienen la misma orientación que presentan en el transportador, y las otras dos filas se conforman de cinco cajas cada una, pero presentan un giro de 90° con respecto a su orientación en el transportador, véanse Figura 9 , Figura 13 y Figura 14.

Figura 14. Orientación de las cajas en la estiba



Las posiciones que deben presentar las cajas al final del transportador ó final de línea está representada en las Figura 15 y Figura 16; la Figura 15 muestra una fila sin giro compuesta por cuatro cajas, y la Figura 16 ilustra una fila con cinco cajas girada 90°.

Figura 15. Fila de cuatro cajas sin giro sobre el plano horizontal en el transportador

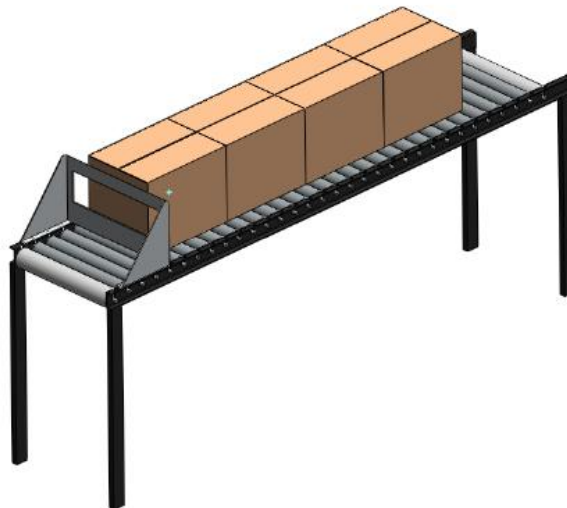
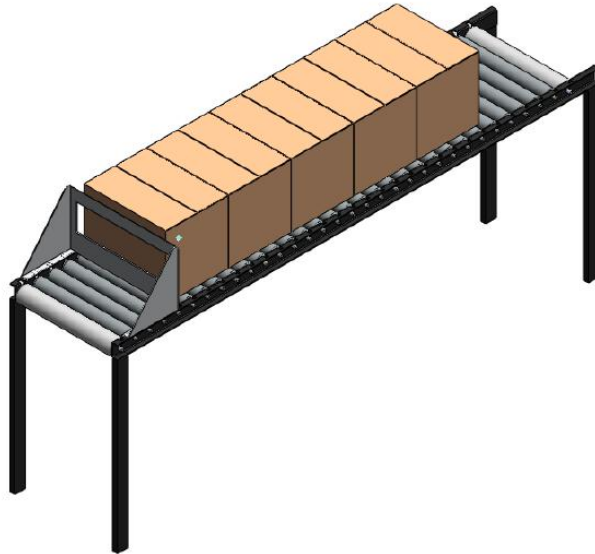


Figura 16. Fila de cinco cajas giradas 90° sobre el plano horizontal en el transportador



El posicionamiento de las cajas representadas en la Figura 15 es logrado simplemente conservando la dirección que traen las cajas desde la línea de producción, es decir, en las filas compuestas por cuatro cajas sin giro (véanse Figura 14 y Figura 15) no presenta intervención alguna para lograr su orientación, entonces, el sistema de giro debe permitir el paso de estas 8 cajas para su estibado; caso que no es igual en las siguientes 10 cajas, puesto que las cajas que hacen parte de las otras dos filas están giradas 90° (véase Figura 14)

### **2.2.1 Selección del sistema mecánico de giro.**

El sistema mecánico de giro es el encargado de orientar las cajas en el transportador para alistarlas y luego ser posicionadas en la estiba por el sistema de traslado.

Para generar esta rotación en las cajas se plantean las siguientes dos opciones con base en la experiencia del diseñador y en aplicaciones industriales:

#### **2.2.1.1 Sistema mecánico de giro por descarrilador.**

Este sistema consiste en dividir el trayecto de las cajas en dos rutas, el descarrilador es el encargado de seleccionar la ruta, así: cuando pasan las primeras 10 cajas, este las debe dirigir por la ruta 1 (ver Figura 17 y Figura 18) de modo que al final de la línea estén posicionadas con el giro de 90°; inmediatamente pasa la caja número 10, el descarrilador debe girar para dirigir las

siguientes 8 cajas por la ruta 2 de tal manera que conserven el mismo sentido con el que vienen de la línea de producción (ver Figura 17 y Figura 19).

Figura 17. Sistema mecánico de giro por descarrilador.

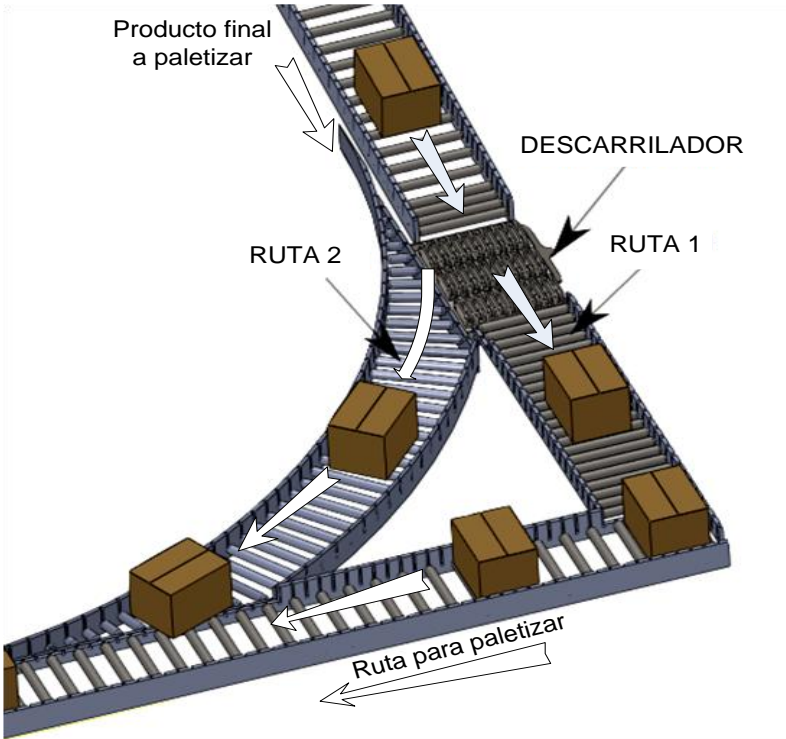


Figura 18. Descarrilador alineado con la ruta 1 (Giro de 90°)

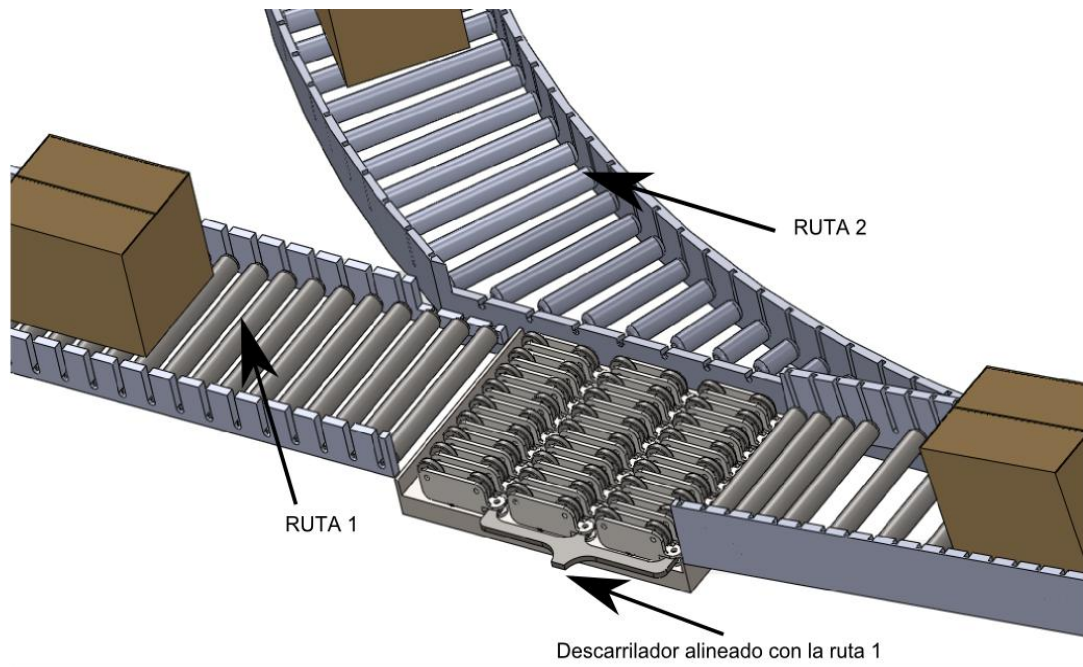
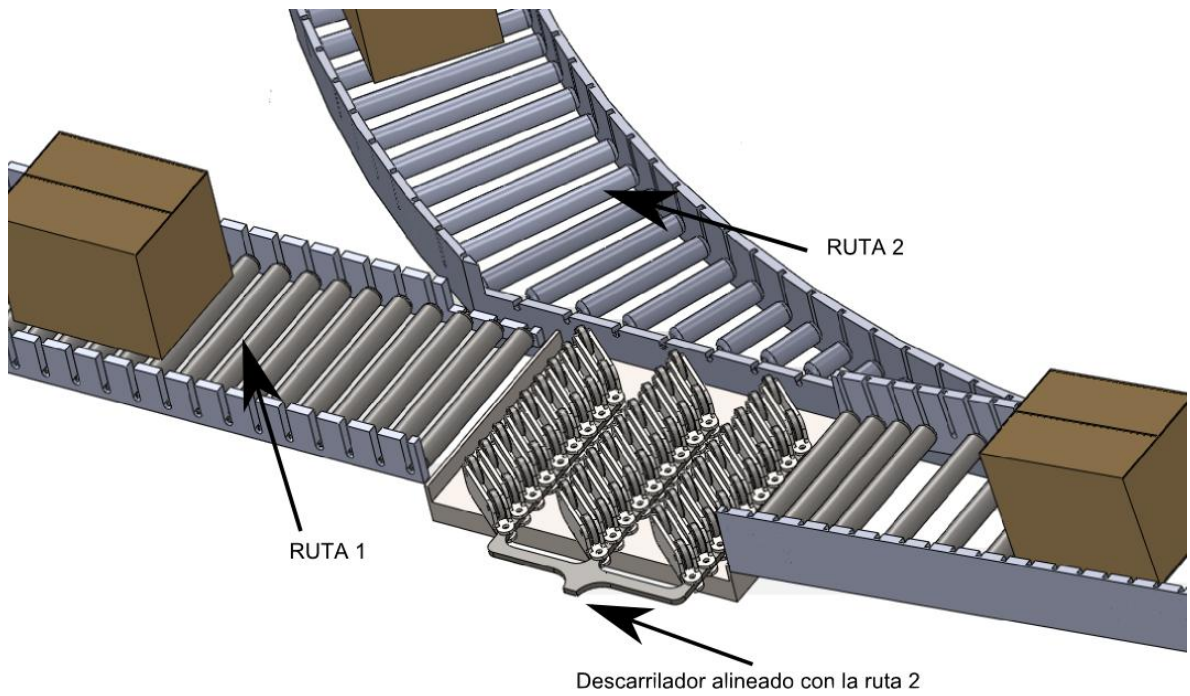


Figura 19. Descarrilador alineado con la ruta 2 (Sin giro)



### 2.2.1.2 Sistema mecánico de elevación y giro.

Este sistema consiste en un mecanismo que permite el paso de las cajas que no requieran giro, y las que se deben girar se posicionan encima de éste para que el mecanismo ascienda junto con la caja, luego gire 90° para después descender y ubicar la caja en la banda motorizada, ver Figura 20, Figura 21 y Figura 22.

Figura 20. Sistema mecánico de elevación y giro

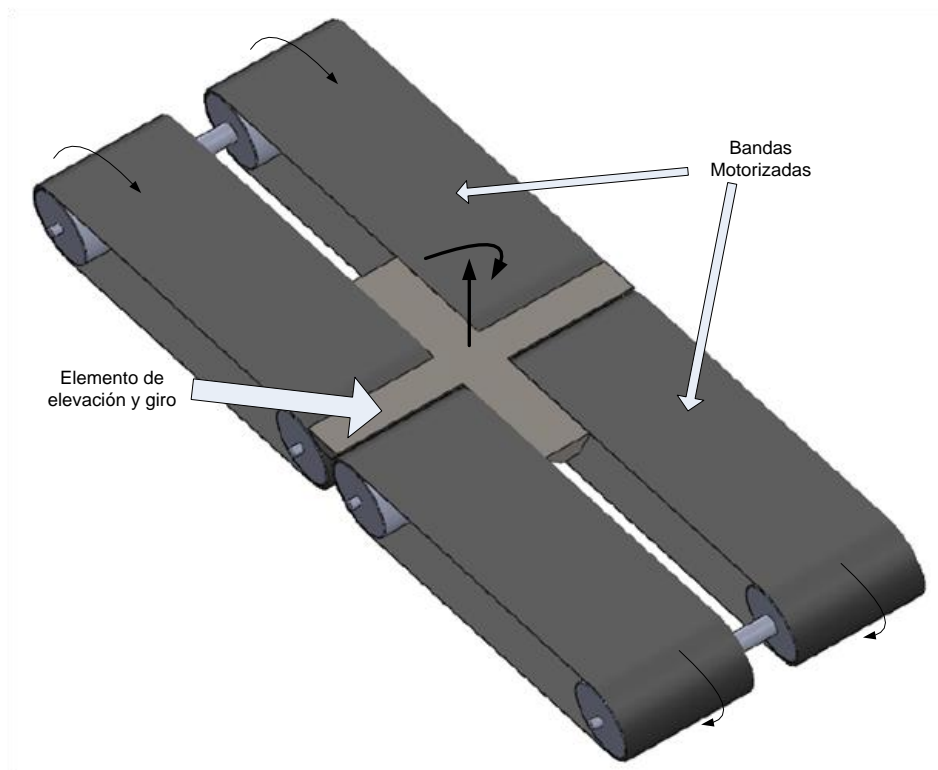


Figura 21. Sistema mecánico de elevación y giro sin actuar

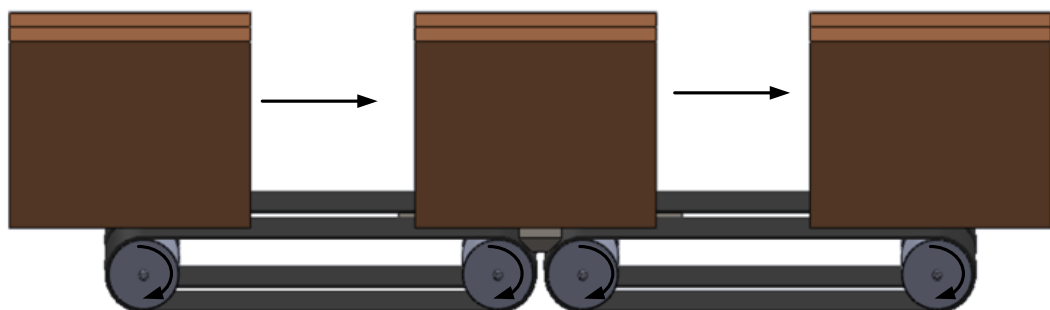
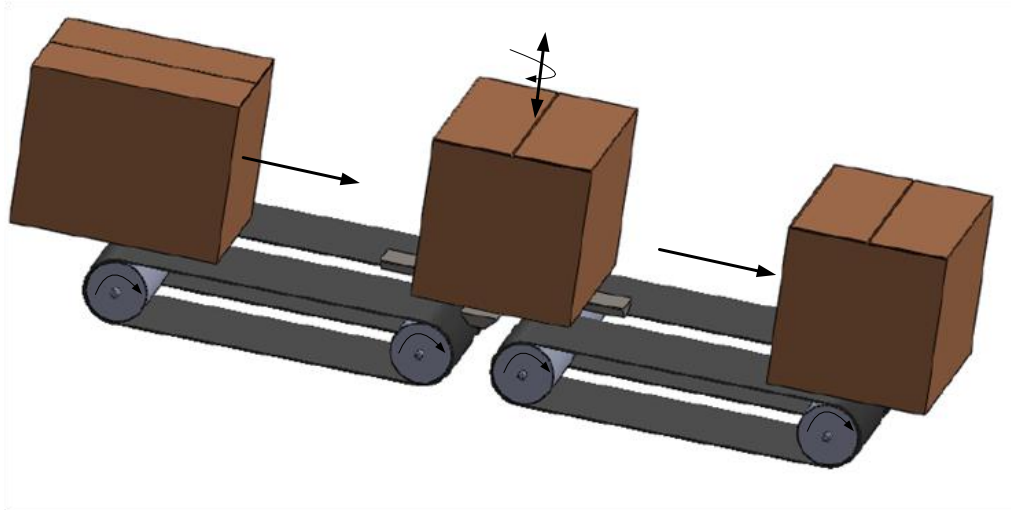


Figura 22. Sistema mecánico de elevación y giro actuado



Con la finalidad de escoger entre las dos opciones descritas en la sección 2.2.1 para girar la caja en el sistema transportador, se aplica la matriz de decisión. En el Cuadro 9 se presentan los criterios de evaluación.

Cuadro 9. Criterios de evaluación para seleccionar el sistema mecánico de giro

CRITERIO DE EVALUACIÓN	SISTEMA MECÁNICO DE GIRO	CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO	
		VELOCIDAD	A*
	B**	Alta	Debe ejecutar un movimiento lineal y otro rotacional 10 veces cada 18 cajas
CANTIDAD DE ACTUADORES	A	1	Presenta dos posiciones que pueden ser generadas con un actuador lineal, ver Figura 17, Figura 18 y Figura 19.
	B	2	Presenta un movimiento lineal seguido de un movimiento rotacional, ver Figura 20 y Figura 22
ESTABILIDAD DE LA CAJA	A	Alta	El sistema mecánico por descarrilador está distribuido por toda la superficie inferior de la caja
	B	Baja	El sistema mecánico de elevación y giro hace contacto en un 40% de la superficie inferior de la caja
FRECUENCIA DE MANTENIMIENTO	A	Baja	Con relación a la cantidad de operaciones, a su frecuencia y al sistema mecánico de giro B, la frecuencia de mantenimiento es baja
	B	Alta	Con relación a la cantidad de operaciones, a su frecuencia y al sistema mecánico de giro A, la frecuencia de mantenimiento es alta

\* Sistema mecánico por descarrilador.

\*\* Sistema mecánico de elevación y giro.

Con base en el Cuadro 9 se realiza la matriz de decisión (Cuadro 10),

Cuadro 10. Matriz de decisión para el sistema de giro

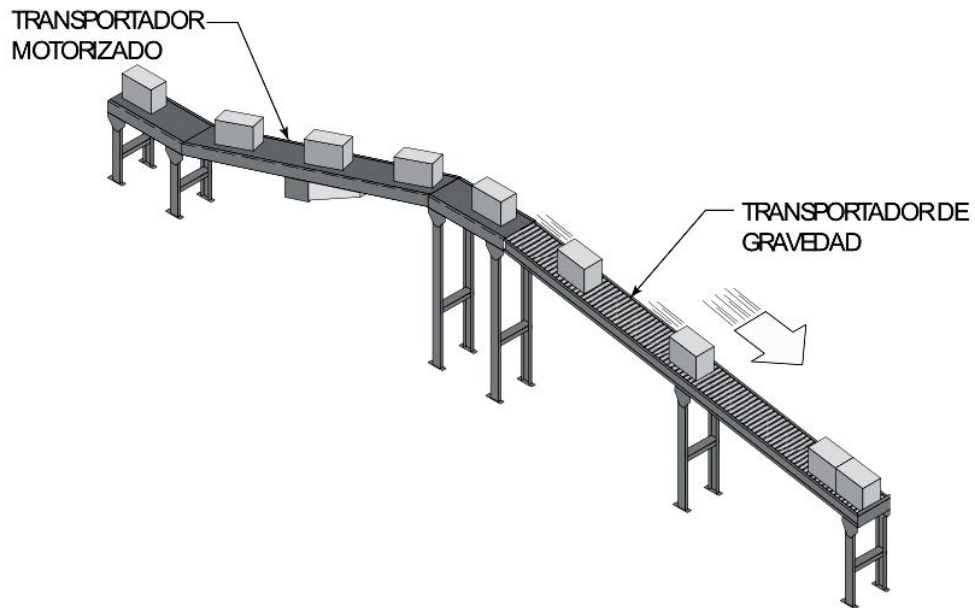
	Velocidad	Cantidad de actuadores	Estabilidad de la caja	Frecuencia de mantenimiento	EVALUACIÓN
Factor de ponderación	0,2	0,3	0,3	0,2	1
SISTEMA MECÁNICO POR DESCARRILADOR	10 2	10 3	10 3	10 2	10
SISTEMA MECÁNICO DE ELEVACIÓN Y GIRO	5 1	5 1,5	5 1,5	5 1	5



Al analizar los criterios de evaluación para seleccionar el sistema mecánico de giro (Cuadro 9) muestra claramente que el sistema mecánico por descarrilador posee mejores características que las del sistema mecánico de elevación y giro, esto lo ratifica la matriz de decisión (Cuadro 10), en la cual sobresale el sistema mecánico por descarrilador.

Los transportadores que se utilizan para enviar las cajas a la bodega de producto terminado de la ILC se denominan transportadores por gravedad, según el Manual Básico de Entrenamiento de Hytrol Conveyer Company (Hytrol Conveyer Company, Inc., 2008) los transportadores de gravedad pueden ser instalados horizontalmente o en declinación, ver Figura 23.

Figura 23. Transportador



Tomado de (Hytrol Conveyer Company, Inc., 2008).

El grado de declinación necesario para el transportador de gravedad depende de varios factores:

1. El tipo de transportador: de rodillos o de rodachines.
2. El tipo de lubricación de los rodamientos: grasa o aceite.
3. El peso del paquete.
4. La calidad o firmeza de la base del paquete.

En el Cuadro 11 se muestra el grado de declinación que requiere un transportador de gravedad.

Cuadro 11. Grado de declinación para transportador de gravedad

ARTICULO	PESO APROXIMADO (EN LIBRAS)	PENDIENTE DEL TRANSPORTADOR (PULGADAS POR 10 PIES)
BARRILES	-	5 in.
CANASTAS	-	5 in.
CAJAS, MADERA	15-25	6-1/4 in.
CAJAS, MADERA	25-50	5 in.
CAJAS, MADERA	50-100	3-3/4 in.
CAJAS, MADERA	100-250	3-1/8 in.
LADRILLOS	-	5 in.
LATAS, LECHE (LLENAS)	-	5 in.
LATAS, LECHE (VACIAS)	-	6-1/4 in.
CAJAS DE CARTON	3-6	8-3/4 in.
CAJAS DE CARTON	6-12	7-1/2 in.
CAJAS DE CARTON	12-25	6-1/4 in.
CAJAS DE CARTON	25-30	5 in.
PALETAS	-	5 in - 6-1/4 in.
TAMBORES	150-300	2-1/2 in. - 3-3/4 in.
MADERA	-	5 in.
BANDEJAS, TOTES	-	2-1/2 in. - 5 in.

Tomado de (Hytrol Conveyer Company, Inc., 2008).

Las caja de cartón de producto terminado de la ILC tienen una masa de aproximadamente 15 kg, entonces según el Cuadro 11, la pendiente que debe tener el transportador de gravedad es de 12,7 cm (5 pulgadas) cada 304,8 cm (10 pies), correspondiente a un rango de masa aproximado de 11,34 kg – 13,61 kg (25 lb – 30 lb).

### 2.2.2 Selección del sistema mecánico de traslado.

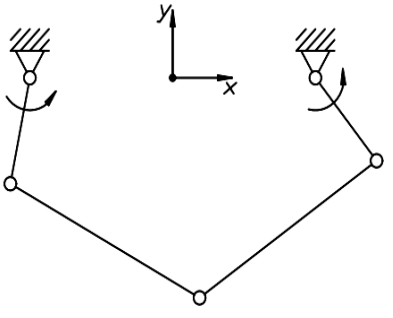
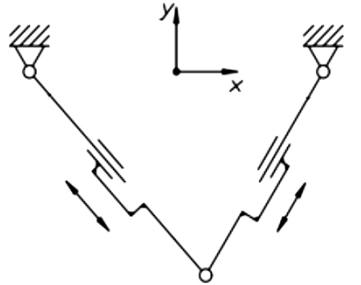
El sistema mecánico de traslado es el encargado de llevar las cajas desde el transportador hasta la estiba. Las cajas son trasladadas de a 4 o de a 5 (ver Figura 14), esta tarea será realizada por un sistema mecánico de 2 GDL de traslación pura. Para el sistema de traslado se implementa la coordenada  $x$  para representar los desplazamientos horizontales y la coordenada  $y$  para representar los desplazamientos verticales.

En los últimos años, los investigadores se han interesado más por los mecanismos paralelos para las aplicaciones industriales (Liu & Wang, 2006); teniendo en cuenta que la carga máxima que debe soportar el sistema mecánico durante el

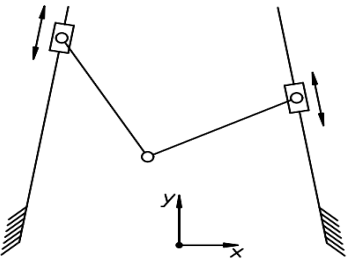
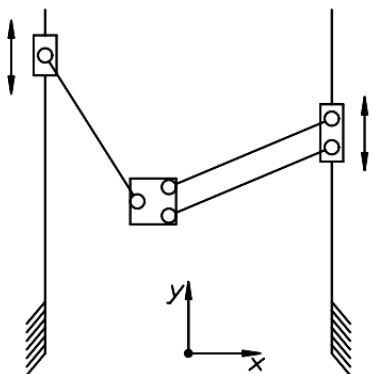
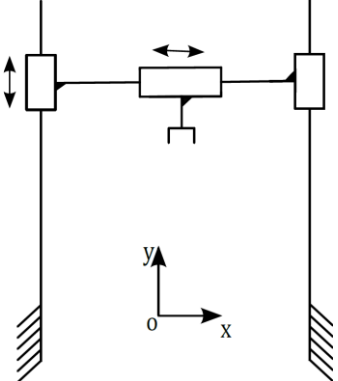
traslado es de 5 cajas equivalentes a una masa de 75 kg y a un peso de 735 N, un mecanismo paralelo será una opción conveniente ya que también presenta características como alta rigidez en todo el espacio de trabajo, tiene menor inercia y puede manipular cargas más pesadas que los mecanismos seriales (Wu, Li, & Wang, 2007), además de las ventajas descritas, este tipo de mecanismos se puede implementar en aplicaciones de alta velocidad y precisión. Sin embargo, los sistemas paralelos presentan un espacio de trabajo reducido (Zhang, Liu, & Han, 2011).

Con base en la descripción de sistemas mecánicos paralelos, se decide realizar el análisis de la operación del traslado de cajas por medio de una estructura paralela, partiendo de un conjunto de opciones (ver Cuadro 12) de donde se selecciona la más adecuada para realizar dicha tarea. Como se trata de una estructura de 2 GDL, no se requiere de una búsqueda intensiva.

Cuadro 12. Estructuras paralelas de 2 GDL

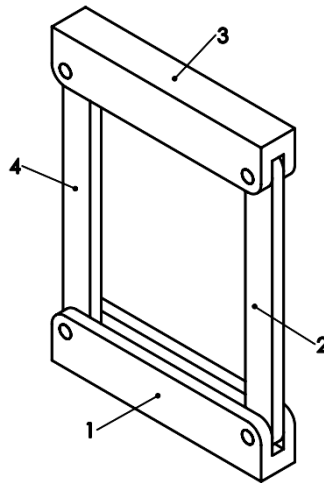
TIPO DE MECANISMO	TRASLACIÓN PURA	DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO	CONFIGURACIÓN CINEMÁTICA
2- <u>RRR</u>	NO	Mecanismo paralelo planar de 5 barras con 2 GDL; formado por 4 eslabones y la base, enlazados por 5 articulaciones de rotación (5R); este mecanismo es analizado por Xin-Jun Liu, Jinsong Wang y G. Pritschow (Liu, Wang, & Pritschow, 2006) donde se desarrolla la cinemática, singularidades y espacio de trabajo; Xin-Jun Liu, Jinsong Wang, Hao-Jun Zheng (Liu, Wang, & Zheng, 2006) realizan un diseño óptimo.	
2- <u>RPR</u>	NO	Mecanismo paralelo de 2 GDL, en el cual el efector final está conectado a la base por medio de dos actuadores lineales; estudiado por Yun-Joo Nam y Myeong-Kwan Park (Nam & Park, 2006), donde realiza el análisis cinemático y un diseño óptimo del espacio de trabajo. Sergiu-Dan Stan, Vistrian Maties y Radu Balan realizan un Diseño Óptimo de mecanismos paralelos de 2 GDL. (Stan, Mătieș, & Bălan).	

Cuadro 12. (Continuación)

<p><b>2-<u>PRR</u></b></p>	<p>NO</p>	<p>Mecanismo paralelo actuado por dos juntas prismáticas deslizantes. En el estudio realizado por Xin-Jun Liu, Jinsong Wang, G. Pritschow (Liu, Wang, &amp; Pritschow, 2005) se desarrolló un diseño cinemático óptimo donde los actuadores son verticales, dicha estructura la estudió también Sergiu-Dan Stan, Vistrian Maties y Radu (Stan, Mătieș, &amp; Bălan).</p>	 <p>The diagram shows a parallel mechanism with two vertical actuators on the left and right. A central link connects the two actuators. A coordinate system with x and y axes is shown below the mechanism.</p>
<p><b><u>PRR(Pa)P</u></b></p>	<p>SI</p>	<p>Mecanismo paralelo con un mecanismo paralelogramo planar de cuatro barras (Pa), actuado por dos juntas prismáticas deslizantes sobre dos columnas verticales, estructura propuesta por Xin-Jun Liu y Jinsong Wang (Liu &amp; Wang, 2003), la ventaja de implementar el mecanismo paralelogramo es que proporciona una orientación fija de la plataforma móvil en todo el espacio de trabajo. Un prototipo de este mecanismo fue construido como máquina herramienta por la universidad de Tsinghua en la compañía Harbin Electric Machinery Co. de China</p>	 <p>The diagram shows a parallel mechanism with two vertical actuators on the left and right. A four-bar linkage (parallelogram) connects the two actuators. A coordinate system with x and y axes is shown below the mechanism.</p>
<p><b><u>PP</u></b></p>	<p>SI</p>	<p>Estructura tipo puente, construida sólo con pares prismáticos.</p>	 <p>The diagram shows a bridge structure with two vertical actuators on the left and right. A central platform is supported by the actuators. A coordinate system with x and y axes is shown below the mechanism.</p>

Según las estructuras paralelas de 2-GDL descritas en el Cuadro 12, la configuración  $\underline{PRR}(Pa)\underline{P}$  es una opción muy adecuada, puesto que a diferencia de las otras tres ( $2-\underline{RRR}$ ,  $2-\underline{RPR}$ ,  $2-\underline{PRR}$ ) garantiza un movimiento de traslación pura, estas dos características son aseguradas por el mecanismo paralelogramo (Pa) como el que se muestra en la Figura 24. La estructura tipo puente es sobre-restringida en algunas direcciones y demanda mayor precisión en su fabricación, también se debe garantizar el paralelismo entre las columnas.

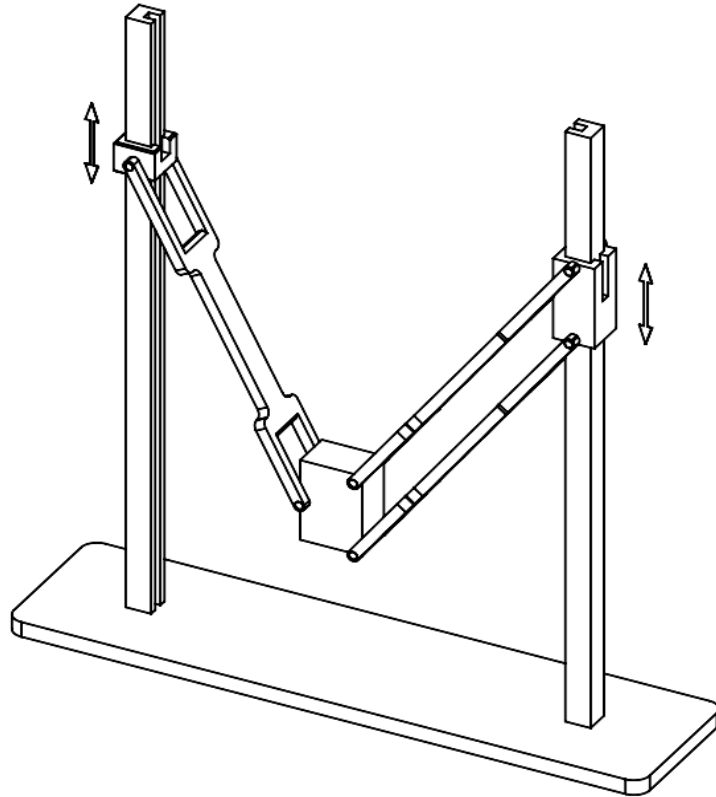
Figura 24. Mecanismo paralelogramo de 4 barras



El mecanismo paralelogramo de cuatro barras está formado por un mecanismo paralelogramo articulado compuesto por 4 eslabones unidos en sus extremos por medio de juntas de rotación, en el cual los eslabones 1 y 3 son idénticos, al igual que los eslabones 2 y 4, también los eslabones 1 y 2 tienen igual orientación con los eslabones 3 y 4 respectivamente, esta es la razón por la cual los mecanismos paralelos adoptan este tipo de eslabones, con el objetivo de que el eslabón de salida permanezca con la misma orientación del eslabón de entrada.

La Figura 25 corresponde a una estructura propuesta por Xin-Jun Liu y Jinsong Wang (Liu & Wang, 2003), con la finalidad de garantizar dos grados de libertad puramente traslacionales y aumentar su rigidez.

Figura 25. Mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura



Teniendo en cuenta que el mecanismo de traslado debe soportar una carga considerable de 75kg (735N) y que el mecanismo PRR(Pa)P como el de la Figura 25 proporciona 2 GDL de traslación pura con alta rigidez, se decide implementar dicha estructura para realizar el diseño cinemático del sistema paletizador de la ILC.

En conclusión, la síntesis de tipo queda determinada por dos sistemas, el primero es el Sistema mecánico por descarrilador que es el encargado de generar la orientación de las cajas en el transportador, y el segundo es el sistema de traslado de las cajas direccionadas por el primer sistema hacia su posición en la estiba; el mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura será el encargado de realizar dicha operación de traslado. Ver Cuadro 13.

Cuadro 13. Operaciones para el paletizado de cajas de la ILC y la síntesis de tipo

OPERACIONES PARA EL PALETIZADO DE CAJAS DE LA ILC.			
OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN	GDL	SÍNTESIS DE TIPO
1. Orientación	Orientación de las cajas en el transportador	2	Sistema mecánico por descarrilador (ver Figura 17)
2. Traslado	Traslado de las cajas desde el transportador hasta la estiba	2	Mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura <u>PRR(Pa)P</u> (ver Figura 25)

El análisis cinemático se realizará en el mecanismo paralelo de 2 GDL correspondiente a la operación de traslado, implementando la estructura PRR(Pa)P representada en la Figura 25.

Para el sistema de agarre de las cajas es posible utilizar el vacío por medio de ventosas de sujeción, las cuales se pueden utilizar para sujetar diversas clases de materiales, entre ellos el cartón. La empresa española Piab líder mundial en la Tecnología del Vacío Industrial, propone una aplicación de agarre de las cajas por medio de ventosas ver Figura 26. Sistema de agarre por medio de ventosas, ver Figura 26.

Figura 26. Sistema de agarre por medio de ventosas



Fuente: <http://www.piab.com/es/Aplicaciones/Configure-su-configuracion-de-paletizado/>

### 2.3 MODELO CINEMÁTICO DEL SISTEMA

R. L. Norton (Norton, 2006) define la cinemática como “el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas” y dice que “un objetivo fundamental de la cinemática es crear (diseñar) los movimientos deseados de las partes mecánicas y luego calcular matemáticamente la posiciones, velocidades y aceleraciones que los movimientos crearán en las partes”; de esta manera se establece una relación analítica entre los movimientos articulares y la ubicación del efector final.

Según L. W. Tsai (Tsai, 1999), el análisis cinemático de un manipulador se efectúa al resolver la cinemática directa y la cinemática inversa; el problema cinemático directo consiste en determinar la posición y orientación del efector final, conociendo los parámetros geométricos y las variables articulares del manipulador; el problema cinemático inverso se aplica para determinar el valor de las coordenadas articulares a partir de la ubicación del efector final, la cual debe ser conocida.

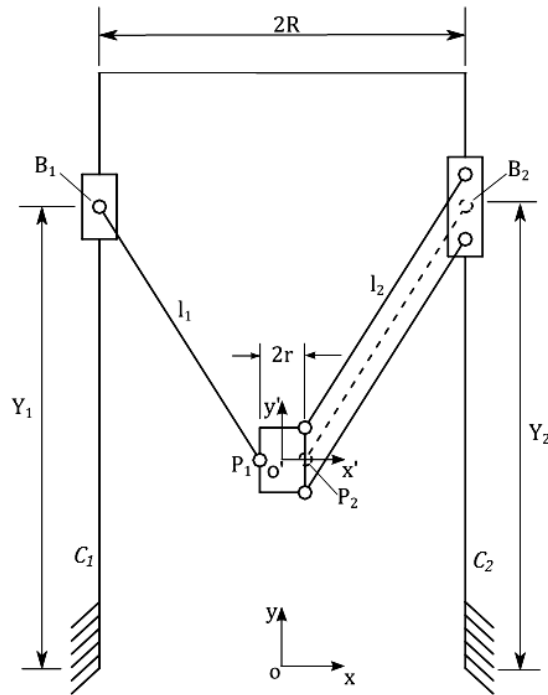
El mecanismo de traslado de cajas está compuesto por un bastidor tipo pórtico, dos deslizadores activos y una plataforma móvil, la cual está conformada por un grupo de Assur de 4 eslabones, conocido también como grupo de Assur de tercera clase, ver Figura 27.

Los deslizadores  $B_1$  y  $B_2$  son accionados independientemente sobre las columnas  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente, de manera que cada deslizador con su concerniente columna componen un grupo de estrada de 1 GDL, acoplados a la plataforma móvil por los eslabones de longitud  $l_1$  y  $l_2$ .

Teniendo en cuenta que el grupo de Assur que conforma la plataforma móvil aporta 0 GDL al sistema, entonces, los 2 GDL del mecanismo corresponden a la suma del grado de libertad que genera cada grupo de entrada.



Figura 27. Mecanismo paralelo de 2 GDL de traslación pura: Esquema cinemático



El marco de referencia fijo  $O-xy$  está ubicado en la base del manipulador en el punto medio entre las columnas  $C_1$  y  $C_2$ , el marco de referencia móvil  $O'-x'y'$  está ubicado en la plataforma móvil.  $2R$  es la distancia entre las dos columnas.  $2r$  es el ancho de la plataforma móvil.

### 2.3.1 Análisis de la cinemática inversa.

Con base en la Figura 27, la cadena cinemática compuesta por el mecanismo paralelogramo (Pa) se simplifica como un eslabón  $P_2B_2$  de longitud  $l_2$ .

$r_{P_i}$  es el vector posición de la junta  $P_i$ , y  $r_{B_i}$  es el vector posición de la junta  $B_i$ , con  $i = 1, 2$ .

Para resolver el problema de la cinemática inversa, se tiene que:

Dado:

Geometría ( $B_1, B_2, P_1, P_2, C_1, C_2, l_1, l_2, R, r$ )

La posición de marco de referencia móvil  $O'-x'y'$

Hallar:

La posición de los actuadores lineales  $Y_1$  y  $Y_2$

El vector posición del origen del marco de referencia móvil  $O'-x'y'$  con respecto al marco de referencia fijo  $O-xy$  es:

$$\mathbf{r}_{O'} = [x \ y]^T \quad (6)$$

El vector posición de las juntas  $P_1$  y  $P_2$  con respecto al marco de referencia móvil  $O'-x'y'$  está dado por:

$$\mathbf{r}'_{P_1} = [-r \ 0]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{r}'_{P_2} = [r \ 0]^T \quad (8)$$

Por lo tanto, el vector posición de  $P_i$  con respecto al marco de referencia  $O-xy$  es:

$$\mathbf{r}_{P_i} = \mathbf{r}_{O'} + \mathbf{r}'_{P_i} \quad (9)$$

Los vectores posición de las juntas  $B_1$  y  $B_2$  con respecto al marco de referencia  $O-xy$  son:

$$\mathbf{r}_{B_1} = [-R \ y_1]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_{B_2} = [R \ y_2]^T \quad (11)$$

Por consiguiente, la ecuación de restricción que involucra a las dos cadenas cinemáticas es:

$$\|\mathbf{r}_{P_i} - \mathbf{r}_{B_i}\| = l_i, \quad i = 1,2 \quad (12)$$

De la ecuación número , se desarrolla la cinemática inversa del manipulador paralelo correspondiente a las ecuaciones (13) y (14).

$$Y_1 = y \pm \sqrt{l_1^2 - (x - r + R)^2} \quad (13)$$

$$Y_2 = y \pm \sqrt{l_2^2 - (x + r - R)^2} \quad (14)$$

Pero, según la configuración establecida en la Figura 27, la solución para la cinemática inversa es:

$$Y_1 = y + \sqrt{l_1^2 - (x - r + R)^2} \quad (15)$$

$$Y_2 = y + \sqrt{l_2^2 - (x + r - R)^2} \quad (16)$$

### 2.3.2 Análisis de la cinemática directa.

Para el desarrollo del problema cinemático directo, se modifica el esquema cinemático (Figura 27) para hallar los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  (ver Figura 28); y para garantizar simetría en la estructura paralela, se debe cumplir que:

$$L = l_1 = l_2 \quad (17)$$

Para resolver el problema de la cinemática directa, se tiene que:

Dado:

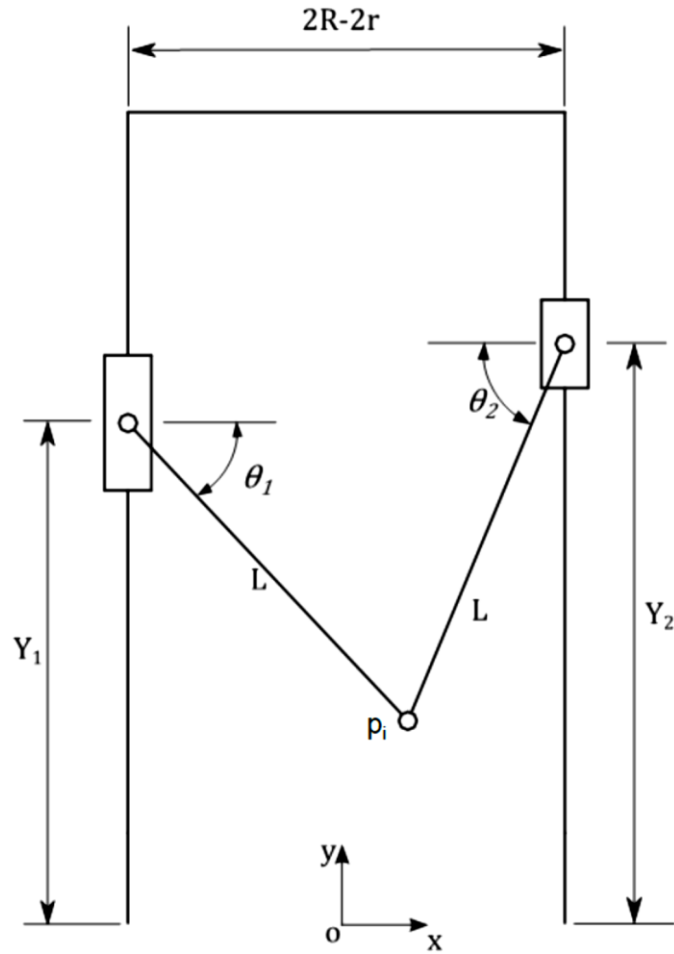
Geometría ( $B_1, B_2, P_1, P_2, C_1, C_2, l_1, l_2, R, r$ )

La posición de los actuadores lineales  $Y_1$  y  $Y_2$

Hallar:

La posición de marco de referencia móvil  $O'-x'y'$

Figura 28. Esquema cinemático modificado



De donde se tiene que:

$$S = Y_2 - Y_1 \quad (18)$$

$$T = 2R - 2r \quad (19)$$

$P_i$  representa la unión de los puntos  $P_1$  y  $P_2$  (ver Figura 27), el marco de referencia móvil  $O'-x'y'$  se encuentra en medio de estos dos puntos, entonces, si se realiza el análisis de la cinemática directa por el lado de la columna  $Y_1$  se le debe sumar  $r$  al resultado final en la coordenada  $x$  y así obtener la ubicación de la plataforma móvil ( $O'-x'y'$ ). Si el análisis de la cinemática directa se realiza por el lado de la columna  $Y_2$  se le debe restar  $r$  al resultado final.

haciendo el análisis geométrico, se obtiene:

$$L \sin \theta_1 + S = L \sin \theta_2 \quad (20)$$

$$L \cos \theta_1 + L \cos \theta_2 = T \quad (21)$$

Elevando al cuadrado y luego sumando (20) y (21), se tiene que:

$$(2LS) \sin \theta_1 + (-2LT) \cos \theta_1 = -(S^2 + T^2) \quad (22)$$

Con,

$$k_1 = 2LS$$

$$k_2 = -2LT$$

$$k_3 = -(S^2 + T^2)$$

En el texto de T. Yoshikawa (Yoshikawa, 1990) se propone una solución para una ecuación de la forma:

$$k_1 \operatorname{sen} \varphi + k_2 \operatorname{cos} \varphi = k_3 \quad (23)$$

Donde, si  $k_1^2 + k_2^2 - k_3^2 \geq 0$ , entonces la solución para  $\varphi$  es:

$$\varphi = \operatorname{atan2}(k_1, k_2) \pm \operatorname{atan2}\left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_3\right) \quad (24)$$

La función arco tangente de dos argumentos  $\operatorname{atan2}(x, y)$  calcula  $\tan^{-1}(y/x)$  pero utiliza los signos de  $y$  y  $x$  para determinar el cuadrante en el que se encuentra el ángulo resultante, el cual se da en radianes. La función  $\operatorname{atan2}$  es una función estándar de Matlab.

Entonces, aplicando (24) para determinar el ángulo  $\theta_1$ , se tiene que:

$$\theta_1 = \text{atan2}(k_1, k_2) \pm \text{atan2}\left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_3\right) \quad (25)$$

Con base en la configuración representada en la Figura 27 del esquema cinemático del manipulador paralelo  $\underline{\text{PRR}}(\text{Pa})\underline{\text{P}}$ , la ecuación (25) queda de la siguiente manera

$$\theta_1 = \text{atan2}(k_1, k_2) + \text{atan2}\left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}, k_3\right) \quad (26)$$

Para calcular  $\theta_2$ , se aplica el mismo procedimiento que se realizó para determinar  $\theta_1$ . El problema de la cinemática directa se puede resolver utilizando uno de los dos ángulos ( $\theta_1$  ó  $\theta_2$ ), con  $\theta_1$  se tiene:

$$x = -R + L\cos\theta_1 + r \quad (27)$$

$$y = Y_1 + L\sin\theta_1 \quad (28)$$

### 2.3.3 Matrices Jacobianas.

El Jacobiano de un manipulador relaciona el vector  $n$ -dimensional de coordenadas articulares  $q$  y el vector  $m$ -dimensional de coordenadas cartesianas  $x$  de la plataforma móvil, dicha relación está dada por la ecuación (29):

$$F(x, q) = 0 \quad (29)$$

Diferenciando la ecuación (29) respecto al tiempo, se obtiene la relación entre las velocidades de entrada y las velocidades de salida del manipulador, representadas en la ecuación (30)

$$J_x \dot{x} = J_q \dot{q} \quad (30)$$

Donde

$$J_x = \frac{\partial F}{\partial x} \quad y \quad J_q = -\frac{\partial F}{\partial q} \quad (31)$$

La matriz Jacobiana del manipulador paralelo, está definida por la ecuación (32):

$$\dot{q} = J\dot{x} \quad (32)$$

Donde

$$J = J_q^{-1}J_x \quad (33)$$

Con base en las ecuaciones (15) y (16), correspondientes a la cinemática inversa del manipulador paralelo  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$  y aplicando (30) y (31), se determinan las matrices Jacobianas inversa ( $J_q$ ) y directa ( $J_x$ ) representadas por la ecuaciones (34) y (35) respectivamente.

$$J_x = \begin{bmatrix} -(x - r + R) & y - Y1 \\ -(x + r - R) & y - Y2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$J_q = \begin{bmatrix} y - Y1 & 0 \\ 0 & y - Y2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Aplicando (33) para determinar la matriz Jacobiana ( $J$ ) del manipulador paralelo  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$ , se tiene:

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{R - r + x}{y - Y1} & 1 \\ -\frac{r - R + x}{y - Y2} & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

#### 2.3.4 Análisis de singularidad.

Una importante limitación en los manipuladores paralelos es la presencia de configuraciones singulares (Tsai, 1999), las cuales están relacionadas con la

matriz Jacobiana de un manipulador, es decir, existe una configuración singular cuando el determinante de la matriz jacobiana es igual a cero.

Una limitación de los robots paralelos con relación a las singularidades, es la posibilidad de que se genere una configuración de singularidad en el interior del espacio de trabajo, donde el mecanismo pierde su capacidad de control y se degrada su rigidez.

La singularidad de la cinemática inversa ocurre cuando  $\det(J_q) = 0$  y  $\det(J_x) \neq 0$ , es decir,  $y = y_1$  o  $y = y_2$ , esta singularidad se presenta en el manipulador PRR(Pa)P cuando el eslabón de longitud  $l_1$  es paralelo al eslabón de longitud  $l_2$ .

La singularidad de la cinemática directa ocurre cuando  $\det(J_x) = 0$  y  $\det(J_q) \neq 0$ , es decir,  $R + x = r$  o  $r + x = R$ , esta singularidad se presenta cuando alguno de los 2 eslabones de longitud  $l_1$  o  $l_2$  sea paralelo al eje  $x$  (Gosselin & Angeles, 1990).

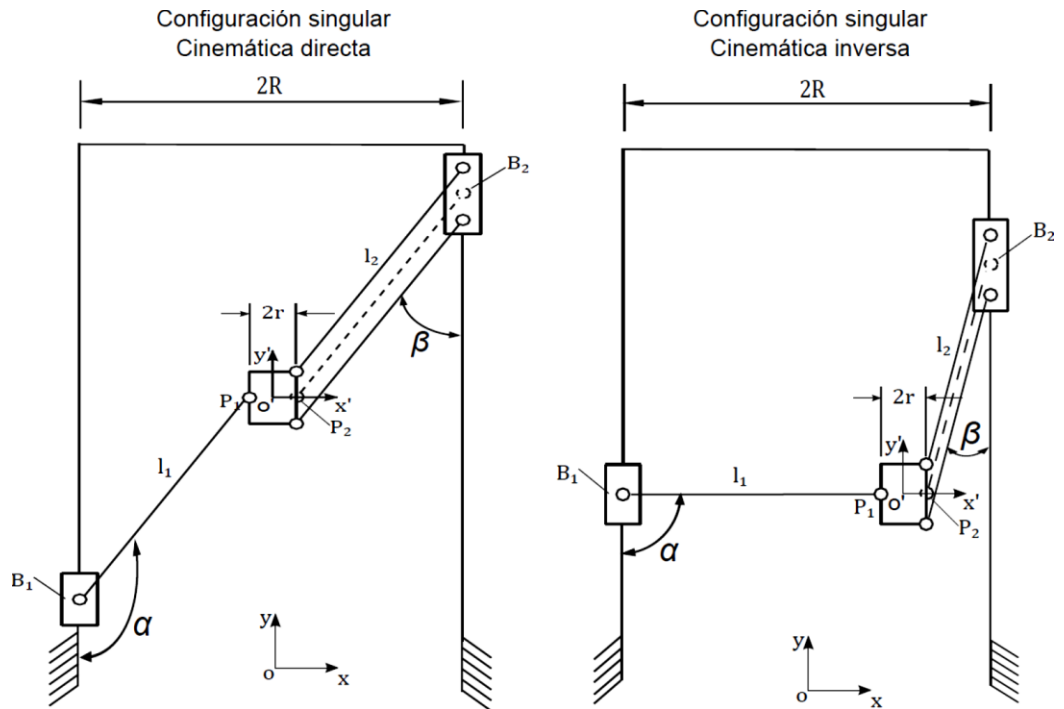
Estos dos tipos de singularidades no se pueden presentar al mismo tiempo en esta estructura, puesto que, los eslabones de longitud  $l_1$  y  $l_2$  no pueden estar simultáneamente paralelos al eje  $x$ , ver Figura 29.

Para evitar las posibles configuraciones singulares en el manipulador paralelo 2 DOF (PRR(Pa)P), se debe asegurar que  $\alpha$  y  $\beta$  sean menores que  $90^\circ$ , ver Figura 29, Figura 31 y Figura 32. Con esta condición se establece que:

1. Los deslizadores  $B_1$  y  $B_2$  permanecen siempre por encima del nivel de la plataforma móvil.
2. El manipulador no puede adoptar una configuración en la que los eslabones de longitudes  $l_1$  y  $l_2$  llegasen a ser paralelos.



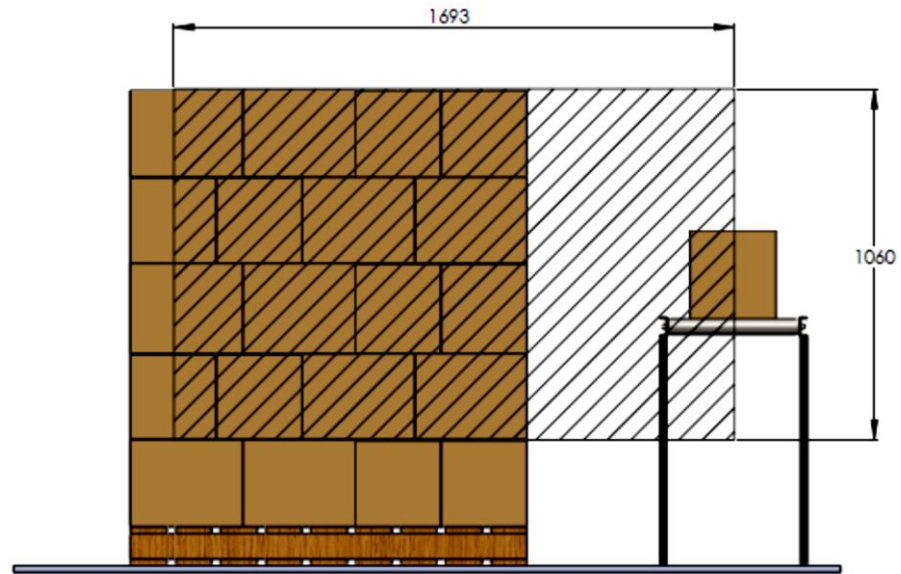
Figura 29. Configuraciones singulares del manipulador paralelo de 2 GDL  $\underline{PRR(Pa)P}$



## 2.4 SÍNTESIS DIMENSIONAL

El desarrollo de la síntesis dimensional, se hace con base en el área de trabajo del manipulador paralelo 2 DOF ( $\underline{PRR(Pa)P}$ ), la cual es la requerida para el paletizado de producto terminado de la ILC, (ver Figura 1 y Figura 30).

Figura 30. Área de trabajo para el sistema de paletizado de la ILC



Dimensiones en milímetros.

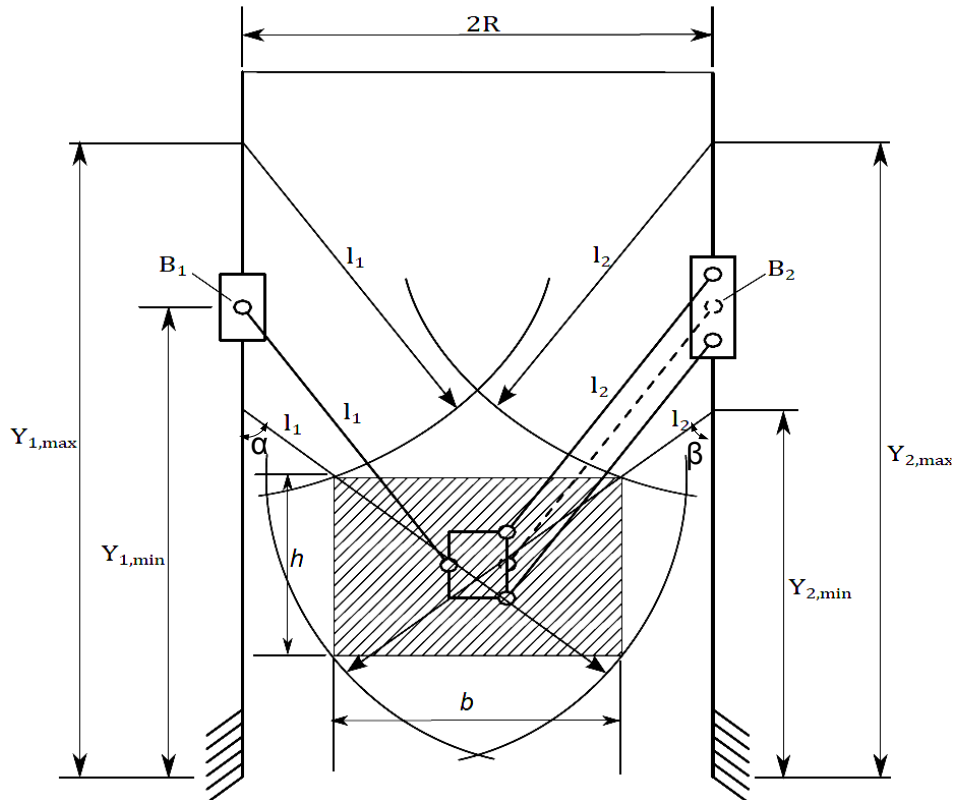
El espacio de trabajo alcanzado por la plataforma móvil del manipulador paralelo planar 2 DOF ( $\underline{PRR}(\underline{Pa})\underline{P}$ ), está definido por la intersección de las dos cadenas cinemáticas obtenidas del análisis de la cinemática inversa en las ecuaciones (15) y (16), de dichas ecuaciones se tiene que:

$$(x - r + R)^2 + (y - Y_1)^2 = l_1^2 \quad (37)$$

$$(x + r - R)^2 + (y - Y_2)^2 = l_2^2 \quad (38)$$

Entonces, el espacio de trabajo del sistema paletizador es un rectángulo, el cual está representado en la Figura 31.

Figura 31. Espacio de trabajo del manipulador paralelo planar 2 DOF (PRR(Pa)P)



#### 2.4.1 Diseño óptimo basado en el espacio de trabajo ( $W_t$ ).

En esta sección se determinan los parámetros dimensionales a partir del espacio de trabajo dado, ver Figura 30 y Figura 31, en donde, el rectángulo correspondiente al  $W_t$  tiene las siguientes dimensiones:

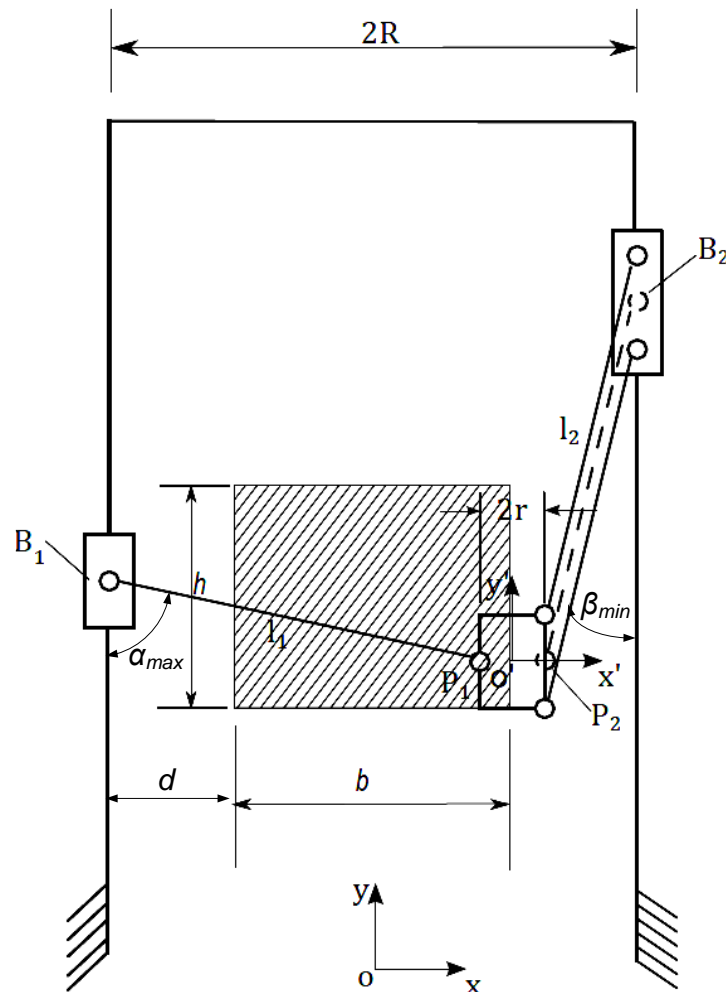
$$b = 1\ 693\text{mm}$$

$$h = 1\ 060\text{mm}$$

El parámetro  $r$  depende de la dimensión que tiene la plataforma móvil con base en la carga que se manipula. En el caso del sistema de paletizado de producto terminado de la ILC, se toma la dimensión más larga de la caja:

$$2r = 340\ \text{mm}, \text{ por lo que } r = 170\ \text{mm}$$

Figura 32. Diseño óptimo del manipulador paralelo planar 2 DOF (PRR(Pa)P)



Cuando el sistema paletizador alcanza el límite inferior derecho de  $W_t$  (ver Figura 32), se obtiene que:

$$\sin \alpha_{max} = \frac{d + b - r}{l_1} \quad (39)$$

$$\sin \beta_{min} = \frac{d - r}{l_2} \quad (40)$$

Donde  $d$  es la distancia desde la columna del actuador lineal hasta el límite izquierdo del  $W_t$ , y  $l_1=l_2$  por simetría, entonces:

$$d = \frac{r \sin \alpha_{max} + (b - r) \sin \beta_{min}}{\sin \alpha_{max} - \sin \beta_{min}} \quad (41)$$

$$R = \frac{b}{2} + d \quad (42)$$

El recorrido que deben hacer los deslizadores  $B_1$  y  $B_2$ , cuando la plataforma móvil del manipulador  $\underline{PRR(Pa)P}$  se traslada por el límite inferior del  $W_t$  a lo largo del eje  $x$ , sea de izquierda a derecha o viceversa, se puede determinar por la ecuación (43):

$$Y_B = \sqrt{l^2 - (R - \frac{b}{2} - r)^2} - \sqrt{l^2 - (R + \frac{b}{2} - r)^2} \quad (43)$$

El recorrido más largo que desarrollan los deslizadores  $B_1$  y  $B_2$ , es cuando la plataforma móvil se traslada de extremo a extremo del  $W_t$  ( $b$ ) a lo largo del eje  $x$ , dicho recorrido es  $Y_B$ , más el recorrido de los deslizadores cuando la plataforma móvil se traslada verticalmente sobre el  $W_t$  ( $h$ ), entonces, el recorrido total generado por los actuadores lineales  $B_1$  y  $B_2$  es  $Y_{BT}$ , y se obtiene de la ecuación (44)

$$Y_{BT} = Y_B + h = |Y_{i,max} - Y_{i,min}| \quad (44)$$

Dados  $r$ ,  $b$  y  $h$  de  $W_t$ , se pueden determinar la dimensión de las demás variables del sistema ( $R$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  y  $Y_{BT}$ ), pero dichas dimensiones están definidas sin tener en cuenta la destreza y la rigidez del manipulador  $\underline{PRR(Pa)P}$ . En la sección 2.4.1.1 se desarrolla una optimización dimensional de los eslabones de longitudes  $l_1$  y  $l_2$  y el recorrido de los deslizadores  $Y_{BT}$ .

#### 2.4.1.1 Función objetivo.

El número de condición de la matriz Jacobiana ha sido utilizado como índice de desempeño local para evaluar velocidad, precisión y rigidez, registrando las características entre las variables de las articulaciones y la plataforma móvil (Wu, Chen, Li, & Wang, 2013). El número de condición está definido como

$$1 \leq k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \leq \infty \quad (45)$$

Donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  son los valores singulares mínimo y máximo de la matriz Jacobiana correspondiente a una posición determinada del manipulador. El número de condición de una matriz expresa la sensibilidad de la solución de un sistema matricial a los errores de los datos conocidos y/o de la misma matriz.

Para determinar los valores singulares  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , se realizó un programa en el Matlab (ver Anexo A), en el que se hace una discretización del espacio de trabajo  $W_t$  en una malla uniforme, ver Figura 33, con la finalidad de calcular la matriz Jacobiana para cada uno de estos puntos y extraer de ésta los valores singulares con la función “svd” (*Singular value decomposition*). En el Anexo B se representa la función de la cinemática inversa.

Cuando el número de condición alcanza su mínimo valor ( $k=1$ ), se dice que la matriz jacobiana es isotrópica (Moreno, Saltaren, Carrera, Puglisi, & Aracil, 2012), donde el manipulador desarrolla una destreza cinemática superior y sin configuraciones singulares.

Como el número de condición  $k$  varía según la configuración del manipulador, se aplica un índice de desempeño global  $\bar{\eta}$  como medida de rendimiento del manipulador paralelo PRR(Pa)P en el diseño óptimo (Wu, Li, & Wang, 2007) (Wu, Chen, Li, & Wang, 2013).

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{W_t} k dW_t}{\int_{W_t} dW_t} \quad (46)$$

T. Huang en (Huang, Li, Li, Derek G., & Clement M., 2004), propone un índice de rendimiento global y exhaustivo  $\eta$  como función objetivo para el diseño óptimo

$$\eta = \sqrt{\bar{\eta}^2 + (w_n \tilde{\eta})^2} \quad (47)$$

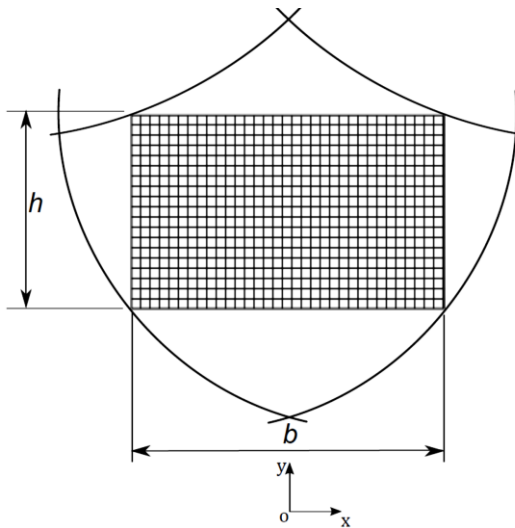
Donde  $\tilde{\eta}$  representa el valor mínimo y máximo de  $k$  en el  $W_t$

$$\tilde{\eta} = \frac{\max(k)}{\min(k)} \quad (48)$$

El término  $w_n$  es el factor de peso que tiene la relación del índice global ( $\bar{\eta}$ ) con el índice local ( $\tilde{\eta}$ )

Debido a la dificultad para obtener una solución para la integral de la ecuación (46), se realiza una división del  $W_t$ , mediante la función estándar de matlab "meshgrid", en una matriz de puntos o malla (ver Figura 33), se evalúa la suma del número de condición para cada punto del  $W_t$  y luego se divide esta suma entre el número de puntos en que se ha discretizado el  $W_t$ , de esta forma T. Huang (Huang, Li, Li, Derek G., & Clement M., 2004) expresa el índice de desempeño global  $\bar{\eta}$  en la ecuación (49).

Figura 33. División del espacio de trabajo en una malla



$$\bar{\eta} = \frac{1}{M * N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N k_{mn} \quad (49)$$

Donde

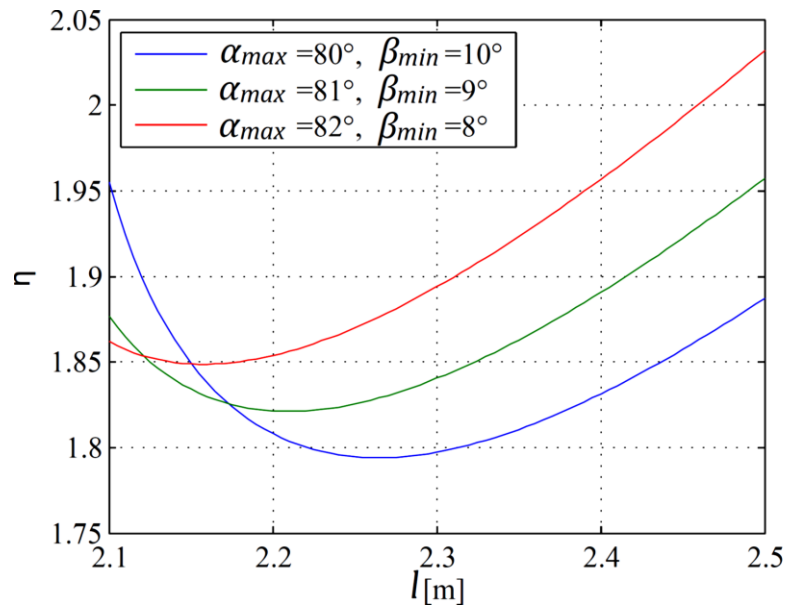
$M$  es el número de nodos en que se ha dividido el largo del espacio de trabajo.

$N$  es el número de nodos en que se ha dividido la altura del espacio de trabajo

Se desarrolla un programa en Matlab (ver Anexo A) para realizar la minimización del índice de rendimiento global y exhaustivo  $\eta$  del manipulador  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$  con respecto al eslabón de longitud  $l_i$  ( $i = 1, 2$ ).

En la Figura 34 se muestra el resultado de la minimización de  $\eta$ , con  $w_n = 0,1$  para 3 valores diferentes de  $\alpha_{max}$  y  $\beta_{min}$ . Se tiene que con  $\alpha_{max} = 80^\circ$ ,  $\beta_{min} = 10^\circ$  y cuando  $\eta$  está en su punto mínimo ( $\eta = 1,79$ ), el valor óptimo para la longitud del eslabón  $l$  es de 2,265 m.

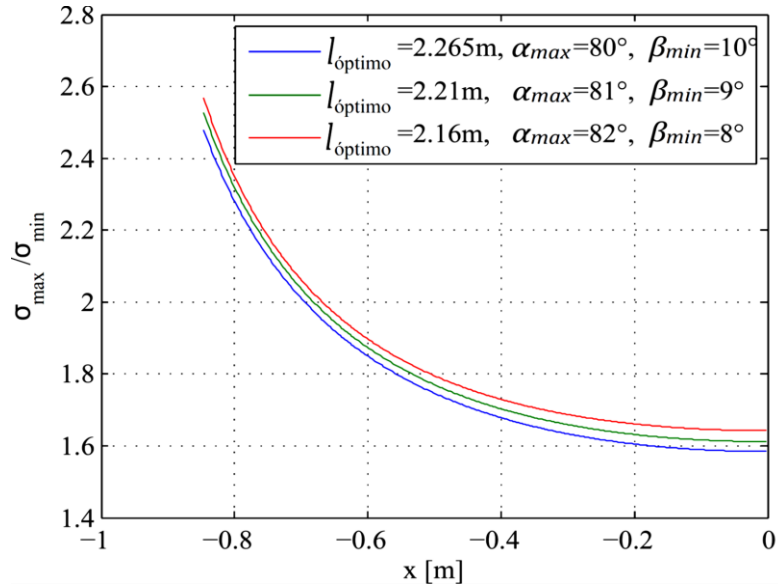
Figura 34. Minimización de  $\eta$  para diferentes valores de  $l$



Entonces, se entiende que si  $\alpha_{max}$  llegase a  $90^\circ$  o  $\beta_{min}$  a  $0^\circ$ , el manipulador  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$  estaría en una configuración singular, de manera que se debe asignar un límite para  $\alpha_{max} < 90^\circ$  y otro para  $\beta_{min} > 0^\circ$ . En la Figura 35 se representa el número de condición que arroja el diseño óptimo con base en los diferentes valores de  $\alpha_{max}$  y  $\beta_{min}$ .



Figura 35. Número de condición en relación con el parámetro  $l$  óptimo



Por simetría sólo se presenta la mitad del espacio de trabajo.

Para garantizar que el manipulador paralelo PRR(Pa)P se mantenga alejado de una posible configuración singular, se establece que  $\alpha_{\text{max}} = 80^\circ$ ; y con un  $\beta_{\text{min}} = 10^\circ$  se asegura que cuando las cajas estén sujetas en la plataforma móvil del manipulador, este no encuentre interferencia alguna con las columnas o actuadores lineales.

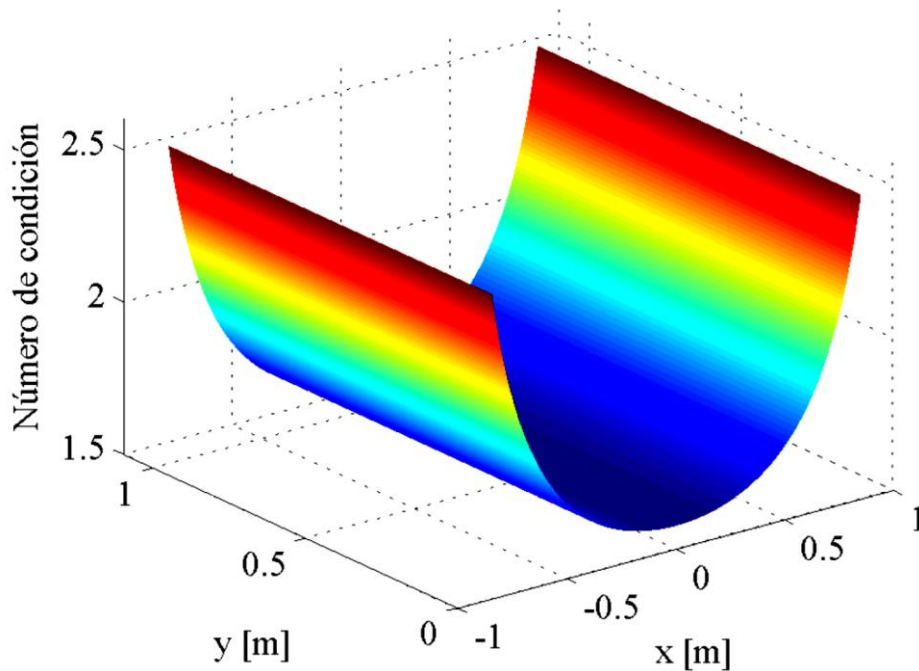
Así, con  $\alpha_{\text{max}} = 80^\circ$  y  $\beta_{\text{min}} = 10^\circ$ , se tiene que  $l = 2,265 \text{ m}$  como parámetro optimizado en la síntesis dimensional del manipulador paralelo de 2 DOF, a partir de este valor se determina el recorrido total de los actuadores lineales  $Y_{BT}$  con (44), el parámetro  $R$  se establece con (42). La longitud de  $l$  se puede obtener geoméricamente con (39) o (40). En el Cuadro 14 se muestra la síntesis dimensional de los parámetros del manipulador paralelo 2 DOF a partir del espacio de trabajo ( $W_i$ ) del proceso de paletizado de producto terminado de la ILC.

Cuadro 14. Síntesis dimensional a partir análisis geométrico y síntesis dimensional a partir de la optimización del manipulador 2 DOF (PRR(Pa)P)

Datos $W_t$ ( $b=1\ 693\ m$ y $h=1\ 060\ m$ ), $\alpha_{max} = 80^\circ$ , $\beta_{min} = 10^\circ$ y $r=170\ mm$ , determinar $R$ , $l$ y $Y_{BT}$		
Parámetro	Síntesis dimensional (m)	
	Geoméricamente	Optimización
$R$	1,379	1,379
$l = l_1 = l_2$	2,087	2,26
$Y_{BT}$	2,75	2,34

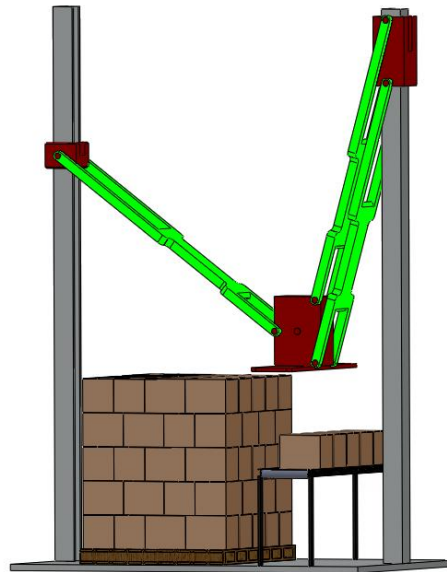
La Figura 36 representa el número de condición del manipulador paralelo diseñado para la paletización del producto terminado de la ILC, en función del espacio de trabajo.

Figura 36. Número de condición del manipulador paralelo de 2 DOF PRR(Pa)P como función del espacio de trabajo  $W_t$



Entonces, la Figura 37 representa una solución óptima en un conjunto de soluciones posibles para el sistema paletizador de producto terminado de la ILC.

Figura 37. Diseño óptimo del mecanismo paletizador del producto terminado de la ILC

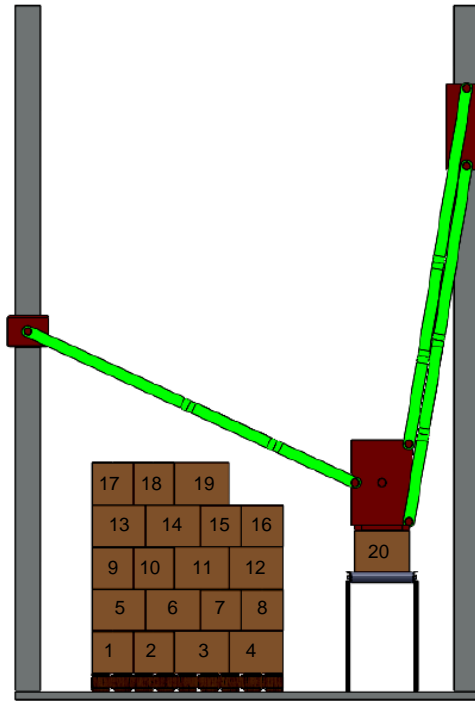


## 2.5 VALIDACIÓN DE ÍNDICES

En esta sección se confrontan los índices numéricos correspondientes al proceso de paletizado de la ILC, determinados en la sección 2.1, con el diseño del sistema paletizador propuesto (PRR(Pa)P).

Para realizar la validación de índices, se desarrolla una simulación del sistema paletizador en el software SolidWorks, mediante el análisis de movimiento basado en eventos, donde cada evento corresponde al traslado de las filas de cajas desde el transportador hasta su posición en la estiba, la cual está conformada por 20 filas, ver Figura 38.

Figura 38. Numeración de la filas en la estiba para la simulación



La simulación del sistema paletizador se realiza con base en una animación secuencial, la cual consiste en la programación de los movimientos que debe realizar el mecanismo para trasladar las cajas desde la fila número 1 hasta la fila número 20.

Se debe determinar la trayectoria a seguir por el mecanismo paletizador para poder realizar la simulación, entonces, se establecen unos recorridos respetando el espacio de trabajo  $W_t$  (1 693 mm x 1 060 mm). Como no es objetivo de este trabajo la optimización de trayectorias, los recorridos planteados se consideran una solución viable más no óptima. A continuación se presentan tres opciones para realizar este diseño.

A. Gasparetto y V. Zanotto (Gasparetto & Zanotto, 2007), proponen una nueva técnica de optimización de trayectorias para robots manipuladores, basada en la minimización de una función objetivo en la que se considera el tiempo de ejecución total y el *jerk*, que es la relación de cambio de la aceleración, con el fin de obtener una trayectoria suficientemente suave.

En (Liu, Lai, & Wu, 2013), se realiza una la planeación de la trayectoria, generada en un tiempo óptimo y con una relación de cambio de aceleración suave, por medio de una combinación de la interpolación segmentaria o *spline* aplicada en el espacio de trabajo y la interpolación segmentaria cúbica o *B-spline* aplicada en el espacio articular.

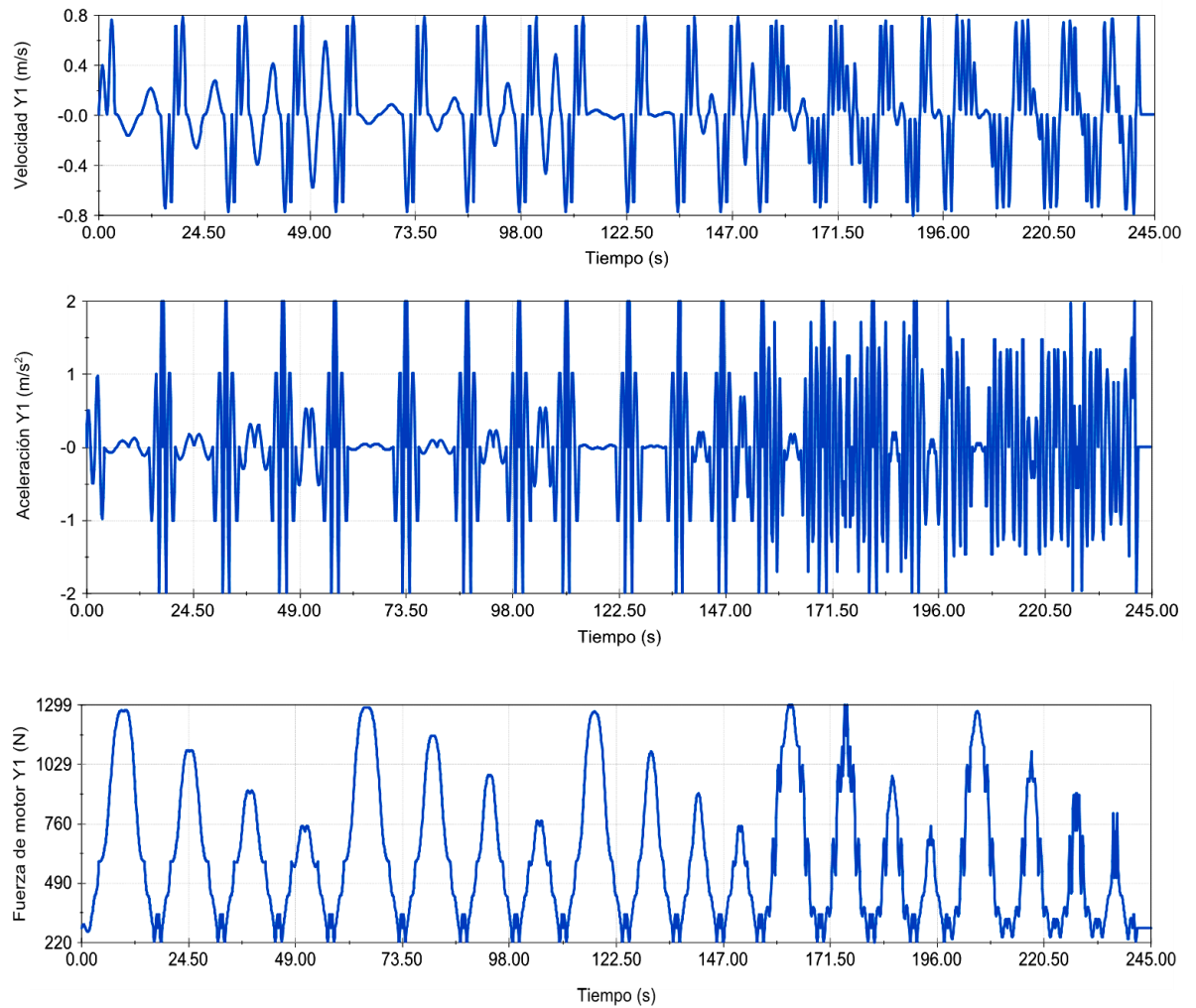
L. Biagiotti y C. Melchiorri (Biagiotti & Melchiorri, 2009), en su libro “*Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*” tratan los problemas relacionados con la planificación de trayectorias en el espacio articular, con especial referencia a los actuadores eléctricos para máquinas automáticas, también se consideran las trayectorias definidas en el espacio operativo y se discuten las técnicas de interpolación y la aproximación para la planificación de movimientos en el espacio 3D.

Con la trayectoria definida y el índice de “tiempo de conformado de una estiba” igual a 4,05 min (245 s), se determinan la velocidad y la aceleración que deben presentar los actuadores lineales como mínimo para cumplir con el tiempo estipulado.

En la simulación también se tiene en cuenta la masa de las cajas (75 kg) y la aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) para obtener la fuerza que debe desarrollar el sistema paletizador PRR(Pa)P. Aunque este trabajo no lo presenta, se podría desarrollar mediante un análisis paramétrico, por ejemplo basado en el método de los desplazamientos virtuales, ver (Kolovski, Evgrafov, Semenov, & Slusch, 2000), capítulo 4.

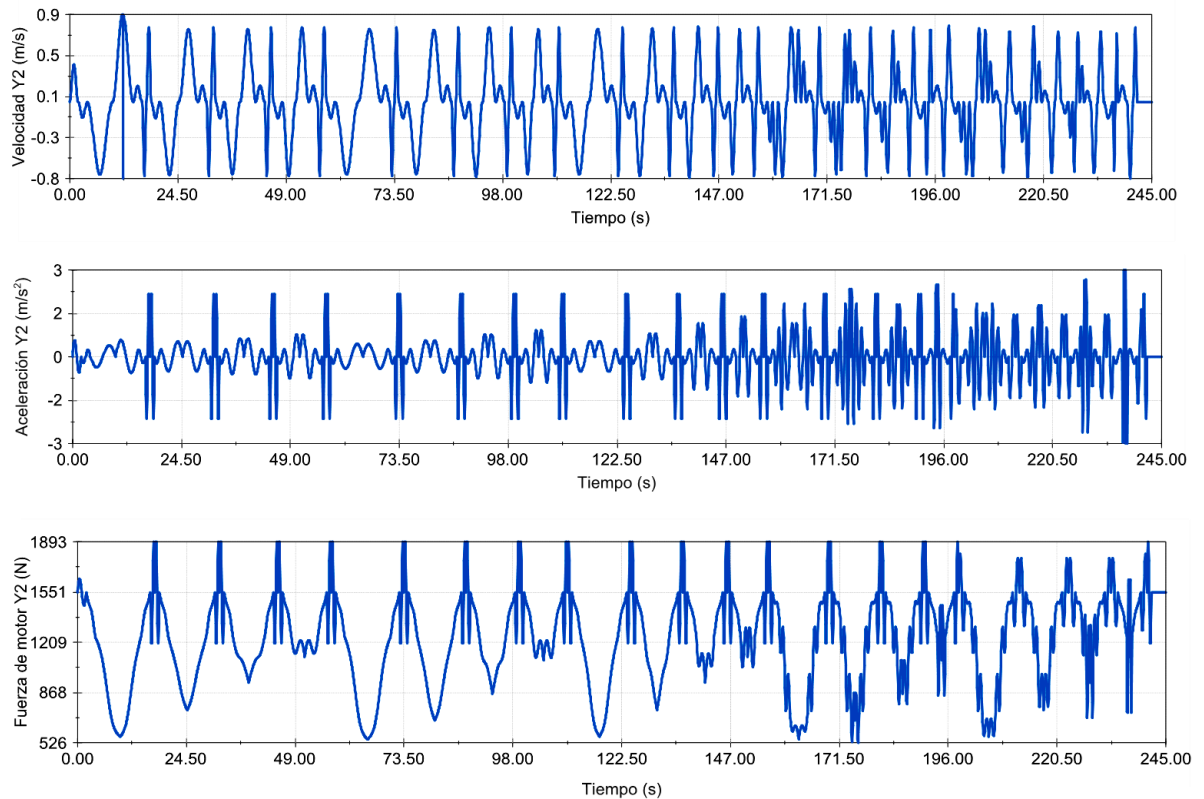
La Figura 39 indica que el actuador lineal Y1 debe ser capaz de desarrollar una velocidad de 0,8 m/s, una aceleración de  $2 \text{ m/s}^2$  y una fuerza igual a 1 299 N.

Figura 39. Velocidad, aceleración y fuerza del actuador lineal Y1



La Figura 40 indica que el actuador lineal Y2 debe ser capaz de desarrollar una velocidad de 0,9 m/s, una aceleración de 3 m/s<sup>2</sup> y una fuerza igual a 1 893 N. La diferencia en la fuerza máxima entre los actuadores se explica por la asimetría del sistema: la estiba no está centrada en el espacio de trabajo.

Figura 40. Velocidad, aceleración y fuerza del actuador lineal Y2



Con estos datos es posible seleccionar un actuador lineal que cumpla con dichas requisitos, como por ejemplo el que presenta la empresa FESTO (FESTO, 2013), en su línea de actuadores electromecánicos, el EGC-BS-KF es un actuador con husillo sin fin y guías de bolas circulantes y tiene las siguientes características:

Velocidades de hasta	2 m/s.
Aceleración máxima de	20 m/s <sup>2</sup> .
Precisión de repetición de	± 0,003 mm.
Carreras de hasta	3 000 mm.
Fuerza	3 000 N.

Este actuador tiene la posibilidad de ser accionado por un servomotor o un motor paso a paso, en la Figura 41 se presenta el actuador con husillo sin fin y guías de bolas circulantes FESTO EGC-BS-KF.

Figura 41. Actuador con husillo sin fin y guías de bolas circulantes



Tomado de (FESTO, 2013).

Entonces, se puede decir que el sistema paletizador propuesto  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$ , contando con las limitaciones del estudio, cumple con los índices establecidos, así: en la simulación se planeó la trayectoria dentro del índice de “volumen de trabajo igual a  $2,6\text{m}^3$ ” para que el sistema lograra trasladar las 90 cajas a una estiba en el tiempo requerido (245 s).

El índice de velocidad igual a  $1,21\text{ m/s}$ , se refiere a la velocidad que debe desarrollar el sistema para trasladar las cajas de a una por una, pero con el sistema propuesto  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$  para el traslado de 4 o 5 cajas a la vez se logra disminuir la velocidad respetando el índice de “tiempo de conformado de una estiba” igual a 245 segundos.

El índice de “22,22 ciclos por minuto”, indica la frecuencia que debe desarrollar el sistema paletizador, en el caso en que el traslado de las cajas desde el transportador hasta la estiba se realice de a una caja a la vez, el objetivo de realizar el trabajo con dicha frecuencia es el de dar cumplimiento al índice de “tiempo de conformado de una estiba” igual a 245 segundos, índice que también se logra con el sistema paletizador propuesto  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$  que traslada varias cajas al mismo tiempo.

En el proceso de traducir los deseos del usuario final en índices numéricos, véase sección 2.1, se determina que el sistema paletizador debe ser de 4 GDL, donde 3 GDL correspondan al traslado de cada caja hasta su ubicación en la estiba y 1 GDL para su orientación, pero se encuentra que el sistema paletizador debe realizar su trabajo con una velocidad elevada para poder cumplir con el índice de tiempo requerido.



Entonces, para disminuir la velocidad de trabajo, se decide trasladar de a cinco y de a cuatro cajas desde el transportador hasta su ubicación en la estiba, para esto se utiliza 1 GDL para dar la orientación a las cajas en el transportador por medio del sistema descarrilador, véase sección 2.2.1, 1 GDL para posicionar las cajas al final del transportador y los otros 2 GDL se utilizan para el sistema de traslado de cajas (Manipulador paralelo de 2 GDL  $\underline{P}RR(Pa)\underline{P}$ ) desde el transportador hasta la estiba.

El resultado final de la simulación del sistema paletizador de producto terminado de la Industria Licorera de Caldas, es que se logra apilar 90 cajas de producto terminado que conforman una estiba en el tiempo requerido, de esta forma se da cumplimiento a los índices numéricos

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

El resultado obtenido de la aplicación de la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5693-1 que trata sobre levantamiento y transporte manual de cargas, según el Cuadro 4, indica que las condiciones de paletizado manual de la ILC están dadas para levantamientos de cargas con una masa promedio de 5 kg, mucho más livianas que las que se manipulan actualmente que son de aproximadamente 15 kg. Esto se traduce en un riesgo ergonómico alto.

Teniendo el problema identificado, en la sección 1.4.1, se estableció una metodología de diseño de manipuladores adecuada a las necesidades del medio local, basada en la revisión literaria (Norton, 2006), (Merlet & Daney, 2008), (Merlet, 2006) y (Siciliano & Khatib, 2008), la cual está conformada por los siguientes cinco pasos:

Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos.

Síntesis de tipo.

Desarrollo del modelo cinemático del sistema.

Síntesis dimensional.

Validación de los índices.

Se identificaron y cuantificaron los requerimientos de la ILC, con base en los datos tomados de la producción y el sitio de trabajo, para expresarlos en los índices numéricos (ver Cuadro 6) que establecieron las pautas para realizar el diseño cinemático del sistema paletizador de cajas para la ILC, los cuales son:

Cantidad de estibas	1
Grados de libertad	4
Cajas por estiba	90
Volumen de trabajo	2,6 m <sup>3</sup>
Tiempo de conformado de una estiba	4,05 min
Velocidad	1,21 m/s
Ciclos por minuto	22,22

Se realizó una investigación sobre 7 tipos de manipuladores comerciales (ver Cuadro 15), y no se encontró uno que cumpla con los requerimientos de la ILC, razón por la que se decidió implementar un mecanismo que traslade las cajas en

grupos de cuatro o de cinco según su ubicación en la estiba (ver Figura 15, Figura 16 y Figura 7), esto con el objetivo de disminuir la velocidad del manipulador sin que repercuta en el índice de tiempo de conformado de una estiba (4,05 min), ver sección 2.2.

Cuadro 15. Manipuladores comerciales

FABRICANTE	TIPO DE ESTRUCTURA
DNC. S.A. (RMS1)	Cartesiano
KUKA (KR180-2 PA)	Esférico
MITSUBISHI (RV-2SDB)	Esférico
ITEKS	Paletizado por capas
COMARME (PC AR 200)	Cartesiano
SOCO SYSTEM	Cartesiano
ABB (IRB 760)	Esférico

Para poder trasladar las cajas por filas, como lo indica la Figura 38, es necesario que las cajas que conforman las filas 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 19 y 20 estén giradas 90° en el plano horizontal, para esto, se presentaron dos opciones de mecanismos de giro de las cajas en el transportador (sistema mecánico por descarrilador y sistema mecánico de elevación y giro), (ver sección 2.2.1), y según los criterios de evaluación (velocidad, cantidad de actuadores, estabilidad de la caja y frecuencia de mantenimiento) y el resultado de la matriz de decisión (ver Cuadro 10) se eligió el sistema mecánico de giro por descarrilador (ver Figura 17).

En la elección del sistema de traslado de cajas desde el transportador hasta la estiba, sabiendo que la carga máxima que debe soportar el sistema mecánico durante el traslado es de 5 cajas equivalentes a una masa de 75 kg y a un peso de 735 N (véase sección 2.2.2) se decidió implementar un mecanismo de cadena cinemática paralela de 2 GDL por sus ventajas sobre los mecanismos de cadena cinemática serial, tales como: capacidad de carga, alta rigidez, alta velocidad y precisión. De una revisión literaria se escogió el mecanismo paralelo  $\underline{PRR(Pa)}\underline{P}$ , que brinda una traslación pura con alta rigidez (ver Cuadro 12).

Entonces, el índice numérico de 4 GDL determinado en la primera etapa de la metodología de diseño (Traducir los deseos del usuario final en índices numéricos), está representado en la segunda etapa de la metodología (síntesis de tipo) de la siguiente manera: 1 GDL para dar la orientación a las cajas en el

transportador por medio del sistema descarrilador, 1 GDL para posicionar las cajas al final del transportador y los otros 2 GDL se utilizan para el sistema de traslado.

Se efectuó el análisis cinemático del manipulador  $\underline{PRR(Pa)P}$ , mediante el método geométrico (véase sección 2.3) correspondiente al paso 3 de la propuesta metodológica (Desarrollo del modelo cinemático del sistema), donde se obtuvo una expresión analítica del movimiento, por medio de las ecuaciones (15) y (16) para la cinemática inversa y por medio de las ecuaciones (27) y (28) para la cinemática directa.

Una configuración singular en el interior del espacio de trabajo del manipulador paralelo  $\underline{PRR(Pa)P}$ , produciría una pérdida de su capacidad de control y degradación de su rigidez, este problema se analizó en la sección 2.3.4 y se encontró que:

La singularidad de la cinemática inversa ocurre cuando en (34)  $R + x = r$  o  $r + x = R$ , es decir, cuando alguno de los dos eslabones de longitud  $l_1$  o  $l_2$  sea paralelo al eje  $x$ .

La singularidad de la cinemática directa ocurre cuando en  $y = Y1$  o  $y = Y2$ , es decir, cuando el eslabón de longitud  $l_1$  es paralelo al eslabón de longitud  $l_2$ . En la Figura 29 se pueden apreciar las posibles configuraciones singulares del manipulador paralelo de 2 GDL ( $\underline{PRR(Pa)P}$ ).

Para evitar las configuraciones de singularidad en el manipulador paralelo 2 DOF ( $\underline{PRR(Pa)P}$ ), se estableció que los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  sean menores que  $90^\circ$ , ver Figura 29, Figura 31 y Figura 32. Con esta condición se garantizó que los deslizadores  $B_1$  y  $B_2$  permanezcan siempre por encima del nivel de la plataforma móvil y que el manipulador no obtenga una configuración en la que los eslabones de longitudes  $l_1$  y  $l_2$  llegasen a ser paralelos.

Se desarrollaron dos síntesis dimensionales, correspondiente al cuarto paso de la metodología propuesta, una geoméricamente y en la otra se hizo un diseño óptimo donde se propuso un índice de rendimiento global y exhaustivo  $\eta$  representado en (47) como función objetivo para minimización (véase sección 2.4)

La síntesis dimensional se realizó con base en el espacio de trabajo  $W_t$ , (ver Figura 30 y Figura 31), formado por un área rectangular de 1 693 mm x 1 060 mm.

Al realizar la minimización de la función objetivo  $\eta$  (ver Figura 34 y Figura 35), se tomó  $\alpha_{max} = 80^\circ$  y  $\beta_{min} = 10^\circ$  para garantizar que el sistema no llegue a una configuración singular ( $\alpha_{max} < 90^\circ$  y  $\beta_{min} > 0^\circ$ ), cuando  $\eta$  está en su punto mínimo ( $\eta=1,9$ ), el valor óptimo para la longitud del eslabón  $l$  es de 2,265 m.

En el Cuadro 14 se muestra la síntesis dimensional a partir análisis geométrico y síntesis dimensional a partir de la optimización del manipulador 2 DOF (PRR(Pa)P).

En la Figura 36 se puede apreciar un resultado satisfactorio al evaluar el desempeño cinemático del manipulador PRR(Pa)P, relacionando gráficamente el número de condición como función del espacio de trabajo.

Finalmente, en el quinto paso de la propuesta metodológica (Validación de los índices, véase sección 2.5) se verificó el cumplimiento de los requisitos de desempeño del sistema paletizador de producto terminado de la ILC, en las Figura 39 y Figura 40 se representan la velocidad, la aceleración y la fuerza que deben desarrollar los actuadores lineales Y1 y Y2 respectivamente, en el Cuadro 16 se muestran los valores máximos que toman los actuadores lineales en las gráficas correspondientes.

Para la simulación del proceso de paletizado del producto terminado de la ILC, se tuvo en cuenta la masa de las cajas (75 kg), la fuerza de la gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ), el espacio de trabajo  $W_t$  (área rectangular 1 693 mm x 1 060 mm), el tiempo de conformado de una estiba (245 s) y la síntesis dimensional óptima expresada en el Cuadro 14.

Cuadro 16. Resultados de la simulación del manipulador paralelo de 2 GDL PRR(Pa)P.

<b>ACTUADOR LINEAL</b>	<b>VELOCIDAD m/s</b>	<b>ACELERACIÓN m/s<sup>2</sup></b>	<b>FUERZA N</b>
Y1	0,8	2	1 299
Y2	0,9	3	1 893

Al final de la sección 2.5, se presentó un actuador lineal EGC-BS-KF con husillo sin fin de bolas recirculantes fabricado por FESTO (ver Figura 41), que satisface los resultados de la simulación del sistema paletizador de producto terminado de la ILC.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 CONCLUSIONES

Se concretó una nueva metodología de diseño, la cual se implementó para resolver el problema de paletizado de la ILC. Esta metodología consolida las propuestas de autores significativos y responde a las necesidades del medio local.

Se logró identificar y cuantificar los requerimientos que presenta la ILC en el proceso de paletizado, también se aplicó la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5693-1 que trata sobre levantamiento y transporte manual de cargas, la cual arrojó un riesgo ergonómico alto.

El proceso de paletizado de la ILC se dividió en dos etapas, la primera etapa consiste en la orientación y el posicionamiento de las cajas al final del transportador por medio de un descarrilador y la segunda etapa corresponde al traslado de las cajas desde el transportador hasta la estiba mediante un manipulador paralelo de 2 GDL de traslación pura.

Se desarrolló el modelo cinemático del manipulador paralelo de 2 GDL, donde se obtuvo una expresión analítica del movimiento por medio de la cinemática inversa y la cinemática directa.

Se desarrollaron dos alternativas de síntesis dimensional: primero, una síntesis dimensional derivada de un análisis geométrico, segundo, una síntesis dimensional óptima con la implementación de un índice de rendimiento global y exhaustivo como función objetivo para la minimización con base en el espacio de trabajo. La alternativa elegida fue la segunda.

Se realizó una simulación del manipulador paralelo de 2 GDL teniendo en cuenta la masa de las cajas, la aceleración de la gravedad y se definió una trayectoria viable, esto dio como resultado la velocidad, la aceleración y la fuerza que deben desarrollar los actuadores lineales del manipulador durante el proceso de paletizado del producto terminado de la ILC.

Finalmente se comprobó que comercialmente es posible encontrar un actuador lineal que cumpla con las características arrojadas por la simulación del manipulador paralelo PRR(Pa)P.

## 4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una planeación óptima de la trayectoria del manipulador paralelo de 2 DOF  $\underline{P}RR(Pa)\underline{P}$ , para el paletizado del producto terminado de la ILC, en la sección 2.5, se comenta sobre la metodología utilizada por (Gasparetto & Zanotto, 2007), (Liu, Lai, & Wu, 2013) y, también sobre el libro de (Biagiotti & Melchiorri, 2009) “*Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*”.

## BIBLIOGRAFÍA

Biagiotti, L., & Melchiorri, C. (2009). *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer.

Ceccarelli, M., Carbone, G., & Ottaviano, E. (2005). An Optimization Problem Approach for Designing Both Serial And Parallel Manipulators.

FESTO. (2013). Ejes accionados por husillo EGC-BS-KF, con guía de rodamiento de bolas.

Gasparetto, A., & Zanutto, V. (2007). A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators. *Mechanism and Machine Theory* , 455 - 471.

Gosselin, C., & Angeles, J. (1990). Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* , 6, 281-290.

Huang, T., Li, Z., Li, M., Derek G., C., & Clement M., G. (2004). Conceptual design and dimensional synthesis of a novel 2-DOF translational parallel robot for pick-and-place operations. *Journal of mechanical design* , 126, 449-455.

Hytrol Converyor Company, Inc. (2008). MANUAL BÁSICO DE ENTRENAMIENTO, Número 1, Formas de implementar y reconocer soluciones para problemas potenciales en aplicaciones con transportadores. *Hytrol Converyor Company, Inc. Boletín Número 609* , 8.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. (15 de 07 de 2009). Ergonomía. *Manipuklación manual parte 1: Levantamiento y Transporte* . Bogotá: ICONTEC.

Kolovski, M., Evgrafov, A., Semenov, Y., & Slousch, A. (2000). *Advanced Theory of Mechanisms and Machines*. Berlin: Springer-Verlag.

Liu, H., Lai, X., & Wu, W. (2013). Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning for robot manipulators with kinematic constraints. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 309 - 317.



Liu, X.-J., & Wang, J. (2006). A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory* , 42 (9), 1210-1224.

Liu, X.-J., & Wang, J. (2003). Some New Parallel Mechanisms Containing the Planar Four-Bar Parallelogram. *The International Journal of Robotics* , 22 (9), 717-732.

Liu, X.-J., Wang, J., & Pritschow, G. (2006). Kinematics, singularity and workspace of planar 5Rsymmetrical parallel mechanism. En *Mechanism and Machine Theory* (Vol. 41, págs. 145-169).

Liu, X.-J., Wang, J., & Pritschow, G. (2005). On the optimal kinematic design of the PRRRP 2-DoF. En ELSEVIER (Ed.), *Mechanism and Machine Theory* (págs. 1111-1130). Stuttgart, Germany.

Liu, X.-J., Wang, J., & Zheng, H.-J. (2006). Optimum design of the 5R symmetrical parallel manipulator with a surrounded and good-condition workspace. *Robotics and Autonomous Systems* , 54 (3), 221-233.

Merlet, J. P. (2006). *Parallel Robots*. Springer.

Merlet, J. P., & Daney, D. (2008). Appropriate Design of Parallel Manipulators. *Smart Devices and Machines for Advanced Manufacturing* , 1-25.

Moreno, H. A., Saltaren, R., Carrera, I., Puglisi, L., & Aracil, R. (2012). Índices de Desempeño de Robots Manipuladores: una revisión del Estado del Arte. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* , 111-122.

Nam, Y.-J., & Park, M.-K. (2006). Workspace optimization and kinematic performance evaluation of 2-DOF parallel mechanisms. (T. K. Engineers, Ed.) *JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY* , 20 (10), 1614-1625.

Norton, R. L. (2006). *Diseño de Maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.

Siciliano, B., & Khatib, O. (Edits.). (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.

Stan, S.-D., Mătieș, V., & Bălan, R. (s.f.). Optimal Design of Parallel Kinematics Machines with 2 Degrees of Freedom. *Technical University of Cluj-Napoca* .

Tsai, L.-W. (1999). *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. (Wiley-Interscience, Ed.)

Vázquez Gonzales, J. L., Cisneros Limón, R., Mendoza Vázquez, R., & Alejos Palomares, R. (2007). Análisis Cinemático de un Robot Paralelo de Estructura 6-RSS. *Científica* , 11 (2), 91-97.

Velasquez C., J. (2004). Cómo Justificar Proyectos de Automtización. *Revista de Inverstigación Industrial Data* , 7-11.

Wu, J., Chen, X., Li, T., & Wang, L. (2013). Optimal design of a 2-DOF parallel manipulator with actuation redundancy considering kinematics and natural frequency. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , 80 - 85.

Wu, J., Li, T., & Wang, L. (2007). Optimal Design of a 2-DOF Planar Parallel Manipulator. *Tsinghua Science and Technology* , 12 (3), 269-275.

[www.piab.com](http://www.piab.com). (4 de Agosto de 2013). Recuperado el 15 de Agosto de 2013, de <http://www.piab.com/es/Aplicaciones/Configure-su-configuracion-de-paletizado/>

Yoshikawa, T. (1990). *Foundations of Robotics: Analysis and Control*. Cambridge, USA: MIT Press.

Zhang, G., Liu, P., & Han, D. (2011). Optimal Kinematic Design of a 2-Dof Translational Prallel Manipulator with High Speed and Applications. En S. Jeschke, H. Liu, & D. Schilberg (Edits.), *Intelligent Robotics and Applications. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 7101, págs. 445-454). Springer Berlin / Heidelberg.

## ANEXOS

### Anexo A. Programa para la síntesis dimensional óptima del manipulador paralelo PRR(Pa)P en el espacio de trabajo.

Este programa se realizó en matlab para la discretización del espacio de trabajo en una malla uniforme, calcular la matriz Jacobiana para cada uno de estos puntos y extraer de ésta los valores singulares con la función “svd” (*Singular value decomposition*), realizar la minimización del índice de rendimiento global y exhaustivo  $\eta$  del manipulador PRR(Pa)P con respecto al eslabón de longitud  $l$  y graficar el número de condición en relación con el parámetro  $l$  óptimo.

```
clc, clear all, close all
%Valores dados por el diseño
r = 0.170; %Ancho de la caja, dimensión de la base móvil
b = 1.693; %Ancho del espacio de trabajo
h = 1.060; %Alto del espacio de trabajo
%Ángulos en las piernas, alpha = 90 y beta = 0 implica cada uno
%singularidad
alphamaxdeg = [80 81 82];
alphamax = alphamaxdeg*(pi/180);
betamindeg = [10 9 8];
betamin = betamindeg*(pi/180);
%Parámetro geométrico del espacio de trabajo
d = (r.*sin(alphamax) + (b - r).*sin(betamin))./(sin(alphamax) - sin(betamin));
%1/2 de la distancia entre las guías de los actuadores
R = (b/2) + d;
%Parámetros para la simulación
paso_L = 0.005;
vec_L = 2.1:paso_L:2.5;
vec_eta = zeros(size(vec_L));
%por simetría solo la mitad del espacio
x = -b/2:paso_L/2:0;
%El número de condición resulta independiente de la altura para un espacio
rectangular
y = 0;
%Malla
[X,Y] = meshgrid(x,y);
%Parámetros para el ciclo for
[NF,NC] = size(X);
%Inicia variable numero de condición global de T. Huang
NCond = zeros(NF,NC);
Vec_eta = zeros(length(alphamax),length(vec_L));
for C4 = 1:length(alphamax)
    eta_minimo = realmax;
    for C3 = 1:length(vec_L)
        L = vec_L(C3);
        %Cinematica inversa
        [S1,S2] = Inverse_kinematics(X,Y,L,R(C4),r,1,1);
        for C1 = 1:NF
            for C2 = 1:NC
                %Jacobiano
                J = buildJ(X(C1,C2),Y(C1,C2),r,R(C4),S1(C1,C2),S2(C1,C2));
```

```

        %Descomposición en valores singulares
        VS = svd(J);
        NCond(C1,C2) = VS(1)/VS(2);
    end
end
eta_barra = 1/(NF*NC)*sum(sum(NCond));
eta_mono = max(max(NCond))/min(min(NCond));
w1 = 0.1; % Factor de peso entre global y local
eta = (eta_barra^2+(w1*eta_mono)^2)^.5;
vec_eta(C3)=eta;
if eta < eta_minimo
    eta_minimo = eta;
    NCond_optim(C4,:) = NCond;
    Lmin(C4) = L;
end
end
Vec_eta(C4,:) = vec_eta;
end

%Exportacion de datos a paraview (mapa de colores del número de condición)
exportar = 0;
if exportar == 1
    Nfilas = size(X,1)*size(X,2);
    Xpara = reshape(X,Nfilas,1);
    Ypara = reshape(Y,Nfilas,1);
    XY = [Xpara,Ypara];
    NCondPara = reshape(NCond,Nfilas,1);
    File2Paraview('Ncond_Paraview',XY,NCondPara);
end

%Propiedades figuras
tipoFuente = 'times new roman'; %font
tamanoFuente = 12; %fontsize
tamanoPapel = [12 9]; %papersize
posicionPapel = [0 0 tamanoPapel]; %paperposition

figure(1)
plot(vec_L,Vec_eta(1,:),vec_L,Vec_eta(2,:),vec_L,Vec_eta(3,:))
set(gca,'fontname',tipoFuente,'fontsize',tamanoFuente)
set(gcf,'paperunits','centimeters','papersize',tamanoPapel,...
'paperposition',posicionPapel)
xlabel('L [m]')
ylabel('\eta')
legend1 = strcat('\alpha_{max} =',num2str(alphamaxdeg(1)),', \beta_{min}
=',num2str(betamindeg(1)));
legend2 = strcat('\alpha_{max} =',num2str(alphamaxdeg(2)),', \beta_{min}
=',num2str(betamindeg(2)));
legend3 = strcat('\alpha_{max} =',num2str(alphamaxdeg(3)),', \beta_{min}
=',num2str(betamindeg(3)));
legend(legend1,legend2,legend3,'location','best')
title({'Minimización de eta para diferentes valores de L'})
grid
print -djpeg -r200 'Minimizacion.jpg'
print -dpdf -r200 'Minimizacion.pdf'

figure(2)
plot(x,NCond_optim(1,:),x,NCond_optim(2,:),x,NCond_optim(3,:))
set(gca,'fontname',tipoFuente,'fontsize',tamanoFuente)
set(gcf,'paperunits','centimeters','papersize',tamanoPapel,...
'paperposition',posicionPapel)
xlabel('x [m]')
ylabel('\sigma_{max}/\sigma_{min}')

```

```
legend1 = strcat('L_{optimo} =', num2str(Lmin(1)), ', \alpha_{max}
= ', num2str(alphamaxdeg(1)), ', \beta_{min} = ', num2str(betamindeg(1)));
legend2 = strcat('L_{optimo} =', num2str(Lmin(2)), ', \alpha_{max}
= ', num2str(alphamaxdeg(2)), ', \beta_{min} = ', num2str(betamindeg(2)));
legend3 = strcat('L_{optimo} =', num2str(Lmin(3)), ', \alpha_{max}
= ', num2str(alphamaxdeg(3)), ', \beta_{min} = ', num2str(betamindeg(3)));
legend(legend1, legend2, legend3)
title({'Número de condición en relación con el parámetro L óptimo'})
grid
print -djpeg -r200 'Numero_Cond_optim.jpg'
print -dpdf -r200 'Numero_Cond_optim.pdf'
```

## Anexo B. Función de la cinemática inversa

```
function [y1 y2] = Inverse_kinematics(x,y,L,R,r,mu1,mu2)

%Inverse_kinematics Inverse kinematics of a 2 DOF parallel manipulator
%Inputs
%x,    position on the x axis of TCP
%y,    position on the y axis of TCP
%l1,   long of limb 1
%l2,   long of limb 2
%r,    distance between the end of the limb and the CTP
%R,    2R = vertical distance between the sliders
%mu1,  left limb assembly parameter (mu1 = 1, mu1 = -1)
%mu2,  righth limb assembly parameter (mu2 = 1, mu2 = -1)
%Outputs
%y1,   distance y1 on left slider
%y2,   distance y2 on righth slider

if nargin~=7
    disp('incompleto')
    y1 = [];
    y2 = [];
    return
end
if ((mu1 == 1) || (mu1 == -1)) && ((mu2 == 1) || (mu2 == -1))

    y1 = y + mu1.*(L^2 - (x-r+R).^2).^0.5;
    y2 = y + mu2.*(L^2 - (x+r-R).^2).^0.5;

else
    y1 = [];
    y2 = [];
    return
end
```