

"PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MANIPULADOR CARTESIANO"

Alex Francisco Mena Rivas

**UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE INGENIERIA
BOGOTÁ D.C.
2010**

"PROPUESTA DE DISEÑO DE UN MANIPULADOR CARTESIANO"

Alex Francisco Mena Rivas

**Proyecto de Grado para optar por el título de
Ingeniero de Producción**

Asesor:

DIEGO ADOLFO RODRIGUEZ

Ingeniero Electrónico, M. Sc.

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERIA

BOGOTÁ D.C.

2010

Nota Aceptación

Ing. Diego Adolfo Rodríguez Cantor
Director

Ing. Gerardo Duque Gutiérrez
Jurado 1

Ing. Alexander García Pérez
Jurado 2

Bogotá D.C. Noviembre de 2010

AGRADECIMIENTOS

**Hoy doy testimonio del enorme privilegio de
contar siempre con lo más selecto ypreciado
de la creación de Dios para la formación de mi
carácter y una vida espiritual, personal, académica
y profesional plena**

**A mis padres, hermanos, amigos,
Compañeros, docentes y a todos
aquellos que con sus vidas y
enseñanzas han hecho posible
construir esto mil gracias.**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	9
OBJETIVOS	10
1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	11
1.1. ANTECEDENTES	11
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	14
2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE	15
2.1. ESTADO DEL ARTE	15
2.2. MARCO TEÓRICO	16
2.2.1. Celdas Manufactura, Automatización y Flexibilidad	16
2.2.2. Manipuladores robóticos industriales	20
2.2.2.1. Definición	20
2.2.2.2. Constitución física de los Robots	21
2.2.2.3. Articulaciones y eslabones	21
2.2.2.4. Espacio de trabajo de un Robot	24
2.2.3. Sistemas de actuación de un Robot	24
2.2.4. Sistemas de control de los Robots	27
2.2.5. Actuador Final (Gripper, End Of Arm Tooling Or End Effector)	28
2.2.5.1. Pinzas	28
2.2.5.2. Herramientas	30
2.2.6. Sensores	30
2.2.7. Cinemática y dinámica del manipulador	31
2.2.7.1. Cinemática	33
2.2.7.2. Dinámica	35
2.2.8. Representación	36
2.2.9. Características generales manipuladores cartesianos	37
2.2.10. Tipos de robots cartesianos	39
2.2.11. Manipulación de materiales	40

2.2.12.	Aplicaciones De Los Robots Industriales	43
2.3.	GENERALIDADES CELDA DE MANUFACTURA	45
2.3.1.	Componentes de la celda	45
2.3.2.	Sistema Auxiliares para el funcionamiento de la celda	46
3.	PROPUESTA DISEÑO	48
3.1.	GENERALIDADES DEL DISEÑO DEL MANIPULADOR	49
3.1.1.	Presupuesto	51
3.1.2.	Cronograma	52
3.2.	POSIBLES APLICACIONES DEL MANIPULADOR	54
3.2.1.	Ensamblado	54
3.2.2.	Apilamiento	55
3.2.3.	Producción	56
3.2.3.1.	Metodología en el aula	58
3.2.3.2.	Integración con otras áreas	58
4.	DISEÑO MECÁNICO	60
4.1.	GENERALIDADES DEL DISEÑO MECÁNICO DEL MANIPULADOR	
	CARTESIANO	60
4.1.1.	Vínculos o eslabones	61
4.1.2.	Articulaciones	61
4.1.3.	Selección de Materiales	63
4.2.	ESQUEMA DE ACCIONAMIENTO	64
4.3.	TRANSMISIÓN DE POTENCIA	65
4.3.1.	Selección de la correa	66
4.3.2.	Torque	68
4.3.3.	Sistema de poleas	69
4.3.3.1.	Numero de dientes y tamaño de las poleas	70
4.3.4.	Eficiencia del sistema	71
4.3.5.	Selección rodamientos ubicados en las guías x, y	71
4.3.6.	Selección de la potencia del motor	72
4.4.	MODELO MATEMÁTICO	73

4.4.1.	Modelo Cinemático	73
4.4.2.	Simulación del modelo cinemático	75
5.	DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL	80
5.1.	GENERALIDADES SISTEMA DE CONTROL	81
5.2.	ACTUADORES	82
5.3.	SENSORES	83
5.4.	TARJETA CONTROLADORA	83
5.5.	HERRAMIENTA FINAL	84
6.	DISEÑO INFORMÁTICO	87
6.1.	SOFTWARE DE SIMULACIÓN	88
7.	OTRAS CONSIDERACIONES	90
7.1.	SEGURIDAD Y SISTEMAS DE EMERGENCIA	90
7.2.	FACTIBILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	90
CONCLUSIONES		93
RECOMENDACIONES		95
BIBLIOGRAFIA		96
ANEXOS		99

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Diagrama general proceso diseño.....	16
Figura 2: Esquema General celda de manufactura flexible.....	18
Figura 3: Configuraciones comunes en un robot.	23
Figura 4: Volumen de Trabajo de configuraciones comunes	24
Figura 5: Manipulador cartesiano tipo (L) con dos grados de libertad.....	38
Figura 6: Esquema General de Celda Manufactura Flexible.....	47
Figura 7: Diagrama de bloques general del Diseño del Sistema	48
Figura 8: Imagen paletizado y apilamiento	56
Figura 9: Esquema mecánico manipulador	60
Figura 10: Espacio de trabajo del manipulador	62
Figura 11: parámetros calculo sección transversal	67
Figura 12: Diagrama de vínculos manipulador cartesiano	74
Figura 13: Parámetros D-H, Matriz movimiento	75
Figura 14: Simulación modelo cinemático.....	76
Figura 15: Matriz parámetros D-H.....	76
Figura 16: Asignación de bases y home en matlab.....	77
Figura 17: Simulación del modelo matemático en Matlab	78
Figura 18: Diagrama Bloque Sistema Control.....	81

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Análisis Costos MO vs MQ	42
Tabla 2: Propiedades Mecánicas de Materiales	63
Tabla 3: Tamaños estándar de poleas.....	70
Tabla 4: Capacidades Rodamiento	72
Tabla 5: Costos generales implementación de la Propuesta	91

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 1: Relación potencia No. dientes polea menor correa tipo L.....	99
ANEXO 2: Costos propuesta económica de implementación.....	101
ANEXO 3: Matriz modelo cinemático parámetros D-H.....	102
ANEXO 4: Cronograma de actividades e hitos del proyecto.....	103
ANEXO 5: cronograma de actividades del proyecto	104

INTRODUCCION

Las grandes industrias de hoy con el ánimo de ser más competitivas y poder seguir vigentes en un mercado cada vez más flexible y cambiante y educado, han decidido en lo que a producción se refiere, organizar de forma automática la mayoría de sus procesos de producción en celdas flexibles de manufactura.

El presente proyecto va dirigido a la realización de una propuesta de diseño de un manipulador cartesiano como punto de inicio para la implementación de una celda flexible de manufactura que se planea construir en el laboratorio de producción de la universidad EAN.

Se pretende mostrar que una vez estudiadas las diferentes configuraciones y características de manipuladores robóticos industriales, una de las mejores opciones para dar inicio a una celda de este tipo es comenzar con el diseño del prototipo de un manipulador con un modelo cinemático simple y sencillo, de fácil adaptación a la celda flexible; con el que se puedan analizar variables específicas, fácil de manipular, capaz de realizar tareas poco complejas, de bajos costos de manera tal que su aplicación en el aula sea dinámica y sencilla con posibilidades de realizar varios diseños.

El desarrollo del proyecto está comprendido por una etapa: el diseño de la estructura mecánica del robot manipulador.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Sentar las bases para la creación e implementación de una celda de manufactura flexible en la Universidad EAN como herramienta para el aprendizaje, desarrollo e investigación de tecnologías avanzadas de producción, así como para la mejora de procesos haciendo especial énfasis en la automatización, a través del diseño de un prototipo de manipulador educativo de bajo costo que pueda ser integrado a la Celda de Manufactura Flexible en fase de diseño, del Laboratorio de Producción de la Universidad EAN.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Indagar por las características de los manipuladores cartesianos en el ambiente industrial y definir la configuración más apropiada al igual que las posibles aplicaciones para el manipulador.
2. Definir las generalidades del diseño del manipulador de acuerdo con las características establecidas.
3. Proponer la estructura general del diseño mecánico del manipulador.
4. Plantear un esquema básico para el sistema de control del manipulador cartesiano.

1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Con el desarrollo del presente proyecto se buscar dar solución a una situación poco satisfactoria, que se contextualiza a continuación.

1.1. ANTECEDENTES

Una de las áreas más importantes dentro del campo de acción de la ingeniería de producción es el estudio y mejora continua de los procesos de producción, debido a que estos contribuyen de forma significativa al desarrollo de la ventaja competitiva de una empresa, a que esta pueda tener bajos costos de producción, productos de calidad, generando a su vez mayores valores agregados para el cliente así como márgenes de utilidad más rentables para la empresa.

Por mucho tiempo se creyó que las mejoras en los procesos de producción estaban sujetas tanto a intensivos estudios de estos como a grandes cambios en la tecnología involucrada, en especial la automatización de la mayor parte de los procesos. Sin embargo, sistemas de producción como el desarrollado por Taichi Ohno [1] en Toyota y filosofías como la Lean Manufacturing entre otros, han llevado a comprender que todo esto es de limitada utilidad si no van acompañados de toda una revolución cultural además de la adopción de todo un grupo de herramientas agrupadas bajo el concepto de kaizen: Mejora Continua. La eficiencia así como los beneficios en costos e imagen alcanzados por estos sistemas han llevado a las empresas de hoy a implementarlos en sus plantas de producción y a las instituciones educativas a preparar a sus estudiantes para el diseño, manejo e implementación de estos Sistemas, con la utilización de herramientas tecnológicas como las Celdas Flexibles de Manufactura.

Esta al igual que la mayoría de las tecnologías de producción implica la automatización de procesos y la utilización de sistemas avanzados de control y de transporte como manipuladores, bandas transportadoras, montacargas, puentegrúas, polipastos, maquinas de control numérico, entre otros. También estas tecnologías sirven de base para la evolución hacia los Sistema Avanzados de Producción como son Manufactura con diseño Asistido por Computador (CAD/CAM) y Manufactura Integrada por Computador (CIM). Estos son los sistemas que tienen implementadas en sus plantas de producción empresas como Alpina, Colcerámica, Nacional de Chocolates, Smurfit, Kimberly Clear, Bavaria, Acerías paz del río, OI-Peldar, Incauca, Manuelita, y en general las empresas grandes o medianas comúnmente conocidas como empresas de manufactura de categoría mundial.

Al parecer en otras instituciones educativas esta necesidad, de acercar a los estudiantes de carreras como ingeniería industrial, administrativa o de producción, a herramientas avanzadas de control para el estudio y mejora de procesos, ha sido satisfecha con el diseño e implementación o creación de una unidad modular de Manufactura Integrada por Computador (CIM) o en casos menos complejos por una **Celda Flexible de Manufactura (FMS)**, muchas de estas instituciones gracias a los recursos que poseen han comprado todos los componentes de sus celdas, y solo han requerido de su ensamble para iniciar los procesos de investigación y desarrollo; en otras en las que apenas están empezando los programas antes mencionados o no se cuenta con todos los recursos financieros pero si académicos necesarios para la compra de estos equipos se han visto la opción de construirlos, generalmente con materiales mas asequibles y para un uso más pedagógico e investigativo que comercial.

En la actualidad la mayoría de las empresas de Categoría mundial *hacia las cuales está dirigida la carrera de ingeniera de Producción en la Universidad EAN*, tienen implementadas en sus plantas de producción Sistemas Avanzados de Producción, todos ellos eficiente y eficazmente adaptados gracias a las competencias obtenidas y

desarrolladas por las personas a cargo del área producción. Estas mismas competencias se han visto mejor desarrolladas en estudiantes de instituciones con Laboratorios CIM, o Celdas de Manufacturas Flexible [1]. A nivel Colombia, entre las universidades que tienen implementados Laboratorios CIM o celdas de Manufactura flexible se encuentran las universidades EAFIT y de Antioquia en Medellín; Andes, Javeriana, Nacional, Santander en Bogotá; Universidad del Valle en Cali, la Universidad de Pamplona en Santander entre otras, en algunas de ellas como en la Javeriana los Andes y la Militar los componentes de las Celdas han sido comprados en su totalidad, en algunas otras, como la Nacional, EAFIT, incluso el SENA, se han construido algunas partes y las otras se han comprado.

Todo esto ha ocurrido a pasos graduales, se ha llevado un proceso largo, complejo y satisfactorio fruto del esfuerzo conjunto e interdisciplinario de muchas áreas; sin embargo, todo ha nacido de identificar que el campo de la automatización tanto para empresas como para instituciones es un área en pleno desarrollo y con mucho potencial. En la mayoría de estos lugares el proceso ha iniciado con la construcción de un ***manipulador***, de ahí el interés en iniciar este proyecto con la seguridad de que servirá para sentar la bases para la creación e implementación del Laboratorio de Producción en la Universidad EAN y dentro de él la implementación de una Celda de manufactura como herramienta tecnológica educativa que permita responder a la exigencias del mercado de manufacturera actual y estar a la altura de las más reconocidas universidades del país.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Es posible diseñar el prototipo de una herramienta avanzada de control para el estudio de procesos industriales con fines académicos que sea sencilla, fácil de manipular y que acerque a los estudiantes de la carrera de ingeniería de producción de la universidad EAN a la simulación y automatización como herramientas para el diseño y mejora de procesos.

Con la realización de este proyecto se pretende sentar las bases para la futura implementación de toda una unidad o centro de simulación y automatización de procesos de manufactura que permita a los estudiantes entender de una forma real, clara y sencilla el funcionamiento de un proceso de producción, y que a la vez se puedan formular mejoras y conclusiones respecto a este. De esta manera los estudiantes lograrán entender la importancia que representa el manejo y conocimiento de la tecnología no solo como parte de su formación integral sino por lo indispensable que se ha vuelto para las medianas y grandes empresas, que hoy independientemente de su tipo, tamaño o estrategia están continuamente mejorando sus procesos, investigando y desarrollando nuevas formas de ofrecer valor a sus clientes y de ser más competitivas en todos los aspectos posibles en especial en lo que a producción se refiere ya que de esta manera se tiene la posibilidad de ofrecer a sus clientes productos cada vez mejores, en tiempo más cortos y personalizados.

2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

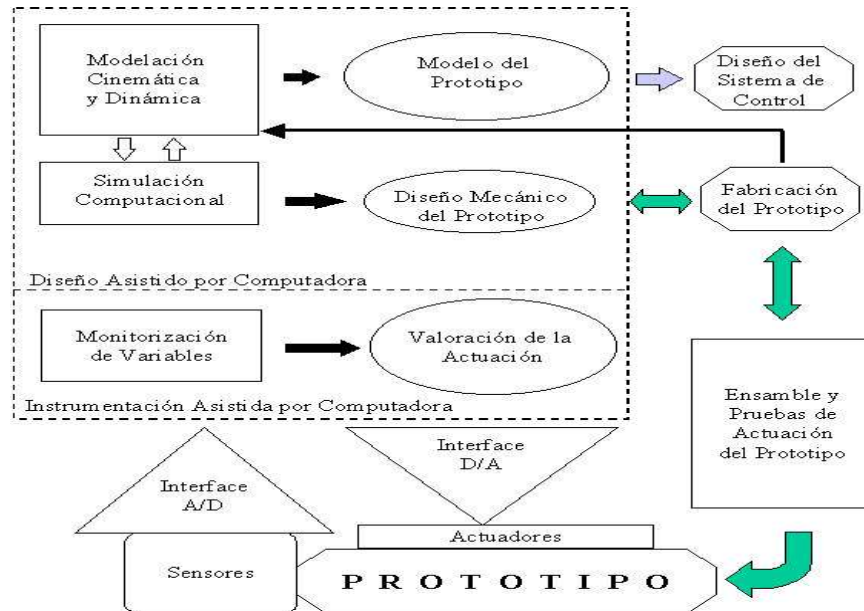
A continuación se referencia la situación actual de algunas instituciones en materia de implementación de celdas de manufacturas como herramienta generadora de conocimiento práctico e innovador para estudiantes de áreas afines a la Ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica, mecatrónica y de Producción.

2.1. ESTADO DEL ARTE

Los avances tecnológicos desarrollados por el hombre aún no le permiten construir un robot realmente inteligente. Sin embargo, una de las finalidades de la construcción de robots hoy, es su intervención en los procesos de manufactura. Estos robots, que son analogías de la anatomía humana, son los encargados de realizar trabajos repetitivos en las cadenas de proceso de fabricación. Con los robots, el técnico puede librarse de la rutina y el riesgo que sus labores comportan, con lo que la empresa gana rapidez, calidad y precisión. [2]

Han sido estos beneficios y muchos más los que han convencido a los grandes industriales de incluir en sus plantas de producción brazos manipuladores, así como con todo el sistema avanzado de producción a los que estos suelen acompañar cuyos componentes incluyen: bandas transportadoras, maquinas CNC, entre otros. Algunos conocedores del tema han llamado a esto el “boom” de los Sistemas Integrados de Información de Producción, fenómeno que no solo ha afectado a las grandes y medianas industrias sino también a la educación formal; es así como en Colombia instituciones reconocidas de educación superior para no solo han diseñado cátedras relacionadas con la automatización y la implementación de sistema avanzados de producción sino que también han abierto espacio en sus laboratorios para celdas de manufactura flexible en las cuales se puede evidenciar de forma real

Figura 1: Diagrama general proceso diseño.



Fuente: [6]

lo que significa el uso de estas tecnologías y conceptos para programas como ingeniería Industrial, de Producción y afines. Esta tendencia se ve reflejada desde hace un tiempo en los trabajos de grado e investigaciones hechas por algunas de estas universidades, entre ellas la Universidad Javeriana, Andes, Nueva Granada, Pamplona Universidad Nacional, EAFIT, de Antioquia y Sena. [4] y [5]

2.2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo del presente proyecto se enmarca dentro de los siguientes conceptos:

2.2.1. Celdas Manufactura, Automatización y Flexibilidad

Debido a que el diseño del manipulador se realiza como base para la creación y/o implementación de una Celda de Manufactura Flexible (FMS) para el laboratorio de

Producción de la universidad EAN, se hace necesario mencionar antes que nada que es una FMS y algunos conceptos como lo son Flexibilidad, sistemas de control y de diseño, estos permitirán dar una introducción teórica al proyecto.

Según Garzón [5], la manufactura flexible es una: *"Filosofía de la producción que se basa en el control efectivo del flujo de materiales a través de una red de estaciones de trabajo muy versátiles y que es compatible con diferentes grados de automatización"*, este concepto parte del uso de la automatización como una herramienta de optimización tecnológica, de reducción de costos, tiempos y fallos que permite el aumento considerable de la eficiencia, así como de la calidad del sistema de producción.

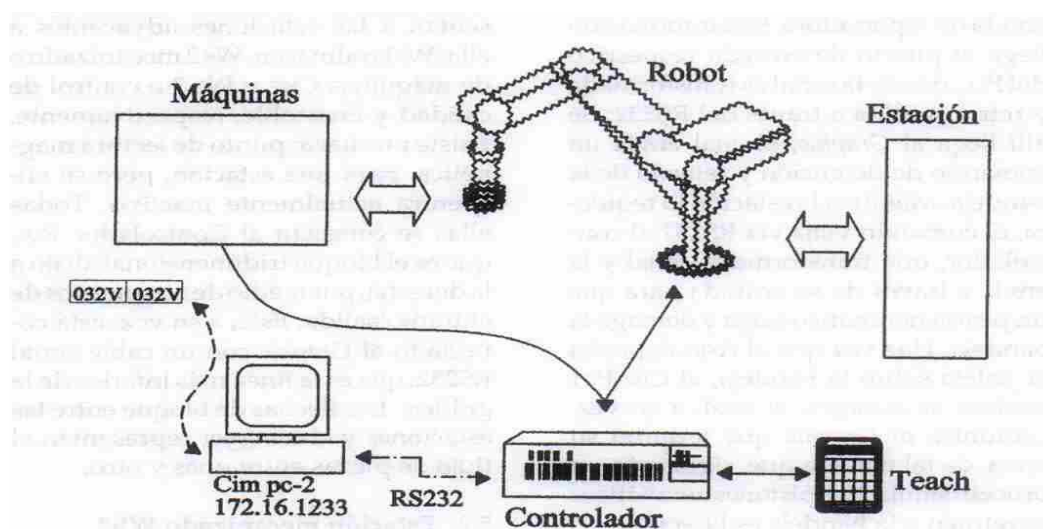
Garzón [5], define Computer Integrated Manufacturing (CIM) como: *"un sistema complejo, de múltiples capas diseñado con el propósito de minimizar los gastos y crear riqueza en todos los aspectos"*, que no solo integra los procesos o elementos de producción sino también áreas como materiales, compras, diseño, calidad, distribución, logística, ventas entre otras, que hacen posible un control más eficiente de la producción.

Los sistemas avanzados de control de manufactura pueden considerarse como sistemas computarizados que manejan información técnica para aplicaciones de control de herramientas o procesos. La función básica de un sistema de control computarizado es el monitoreo de parámetros de proceso, para generar por medio de la comparación entre el desempeño y los límites de control señales de control que corrijan o mejoren la condición actual. Los beneficios que trae el uso de sistemas avanzados de producción pueden ser significativos particularmente cuando la complejidad del proceso es alta, estos pueden incluir: incrementos en la producción al hacerla más rápida, eficiente y eficaz, mejoras en la calidad, reducción del trabajo indirecto, reducción de los costos de materiales, menores pérdidas, fallas o

desperdicios y menores costos de consumo al hacer procesos más estandarizados, mas controlados, más eficaces.

Adicionalmente el concepto de sistemas avanzados de producción permite entender que tanto las celdas de manufactura, como el manipulador son en esencia sistemas de control que permiten que la producción se realice de una manera más precisa, exacta, estándar, menos riesgosa y mas económica, independientemente de las estructuras, mecanismos o dispositivos que se utilicen.

Figura 2: Esquema General celda de manufactura flexible



Fuente: [6]

Por otro lado la flexibilidad se puede entender como la capacidad de un sistema para adaptarse a los cambios del ambiente ya sea interno o externo. Particularmente en producción, la flexibilidad puede clasificarse en dos grandes categorías: flexibilidad de proceso y herramientas y flexibilidad de materiales. La primera comprende la posibilidad de realizar más de una operación sobre una parte de un tipo determinado, capacidad para ejecutar operaciones en partes de diferentes tipos y la

facilidad para el cambio de un producto a otro en un tiempo corto. La segunda se refiere a la posibilidad de utilizar diferentes tipos y clases materiales para fabricar un producto. Ambas están fuertemente relacionadas con maquinas multifuncionales, de cambios rápidos y la automatización.

La flexibilidad permite complementar el concepto de control, para obtener de ello la eficiencia, la excelencia y la rentabilidad que finalmente persigue cualquier empresa; en un mundo como el de hoy en el que todo cambia tan rápidamente, es vital que las industrias puedan ser flexibles, sin perder el equilibrio y control de sus actividades y relaciones pero sobre todo de su capacidad, pues será esta la que finalmente pondrá límites a su desarrollo y crecimiento.

Entendidos los conceptos de control y flexibilidad como factores críticos e importantes en el desarrollo y perfeccionamiento de la manufactura se puede proceder a tratar sobre un tema en el que se articulan estos dos conceptos y que da paso al verdadero tema del proyecto, la Automatización, Groover [7] la define como la tecnología que aplica la mecánica, la electrónica y los sistemas computacionales tanto a la operación como al control de la producción. Esta incluye toda clase de equipo automático para la ejecución de actividades físicas de producción y los sistemas computarizados de organización y procesamiento de información como la planeación, recolección de datos, toma de decisiones, programación, maquinado, inspección etc. En general puede ser fija, programable o flexible.

La automatización en producción es una forma eficiente de hacer casi todo más preciso, más confiable, menos costoso y más fácil tanto para las maquinas como para los humanos, dentro de sus formas esta la automatización programable siendo los brazos manipuladores, en algunas ocasiones conocidos como robots industriales, una de sus mejores expresiones y de hecho la más utilizada en las grandes empresas de todo el mundo.

Hasta hace poco en la industria se utilizaban sistemas de automatización dura, integraciones de maquinas y equipos capaces de realizar labores repetitivas con calidad, a bajos costos, pero diseñadas para entornos, funciones o áreas específicas, hoy la rapidez con la que cambia el mercado ha hecho necesario estos sistemas, así como las diferentes tecnologías que intervienen en los sistemas de producción sean más flexibles, capaces de adaptarse a entornos donde se requiere mayor cantidad de funciones, con igual o mayor rapidez, calidad, control y economía. [8]

Por mucho tiempo la automatización así como los sistemas y tecnologías de producción que la integran han sido una de las mejores formas de reducir costos, mejorando a la vez la flexibilidad y capacidad de la industria, entre más flexible pueda ser una maquina, menos costosos y más variados suelen ser los productos; esto ha hecho que cada más muchos más sectores, entre ellos el industrial y el educativo, unan esfuerzos por mejorar los conocimientos en estas áreas e incluso desarrollar unos nuevos.

2.2.2. Manipuladores robóticos industriales

Uno de los elementos presente en las celda de manufactura como medio de transporte o manipulación de materiales, productos o mercancías son los manipuladores robóticos industriales, estructuras programables capaces de cumplir con un alto grado de precisión tareas que pueden resultar desgastantes o peligrosas para los seres humanos.

2.2.2.1. Definición

Un robot es una maquina diseñada para hacer tareas generales que puede ser programada, en casos tienen una estructura similar a la de miembros humanos como lo pueden ser los brazos, la muñeca etc. Estas estructuras, que juntas forman

un sistema, también cuentan con la habilidad de poder comunicarse con otros miembros o maquinas, responder a impulsos sensitivos bajo la dependencia de un centro de control donde se reciben, almacenan y procesan datos para finalmente ofrecer una respuesta apropiada o una retroalimentación. [8]

Es precisamente debido a su parecido con los humanos que los robots resultan ser cada vez más atractivos para el sector industrial, pues pueden desempeñar gran variedad de funciones a partir de la misma estructura con solo unos pequeños cambios, entre las muchas operaciones que estos pueden desarrollar se cuentan procesos de pintura, carga/descarga, transporte y transferencia de material, soldadura, ensamble, etc.

2.2.2.2. Constitución física de los robots

Gran parte de los robots desarrollados son esencia análogas funcionales de la fisiología humana debe resaltarse que en los robots las articulaciones o juntas que lo componen así como el tamaño de estas, la forma en que están unidas juegan un papel importante en el tipo de funciones a desarrollar, así como en la flexibilidad, calidad y precisión de los movimientos del manipulador.

2.2.2.3. Articulaciones y eslabones

En el cuerpo humano una articulación cumple con la función de unir dos partes y permitir el movimiento en esa área, en los robots industriales encontramos que hay articulaciones entre cada una de sus partes que cumplen la misma función, dando incluso origen al concepto de Grado de Libertad de movimiento, término que hace referencia a la posibilidad de realizar un movimiento en una dirección, con una fuerza y una velocidad [8] con un miembro o articulación, estos grados de libertad permiten clasificar los robots y se cuentan a partir de la base que generalmente los sostiene.

Las articulaciones de los robots al igual que las del cuerpo humano no todas tienen la misma forma ni el mismo rango de acción. Según la teoría el movimiento puede ser descrito a partir de dos conceptos la posición y la orientación, esto da lugar por lo tanto a dos tipos de articulaciones para describir el movimiento, las articulaciones de traslación y las de rotación, las primeras ubican el movimiento en el espacio por coordenadas cartesianas lineales y las segunda por medio de ángulos.

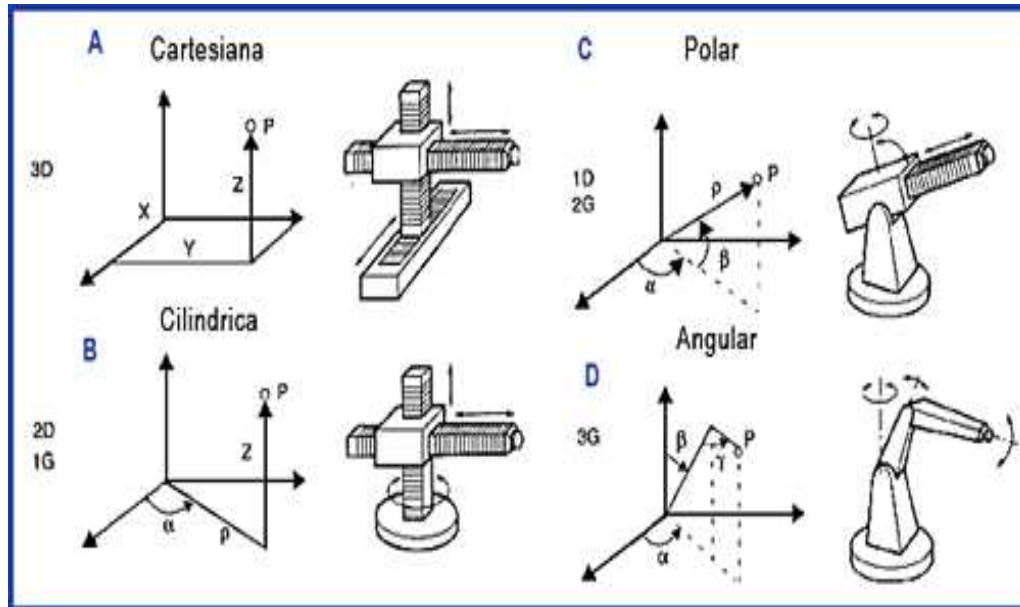
En el movimiento traslacional la distancia que puede alcanzar la articulación esta algo limitada por la longitud de la misma y el peso total que esta puede llegar a soportar sin entorpecer el funcionamiento de todo el robot, igualmente las articulaciones rotacionales dependiendo de su estructura pueden llegar desde unos pocos grados hasta una vuelta completa.

Entre las configuraciones industriales más comunes se pueden encontrar:

Configuración cartesiana: lleva tres articulaciones prismáticas (3D o PPP), se emplea en el transporte de cargas voluminosas, su control de posición es relativamente sencillo ya que las variables del vector de posición toman los valores de las coordenadas x , y , z del punto al cual se quiere llegar, presenta la desventaja de tener un volumen de trabajo pequeño y dificultad para ciertos ángulos.

Configuración Cilíndrica: El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Este robot ajusta bien a los espacios de trabajo redondos. Puede realizar dos movimientos lineales y uno rotacional, o sea, que presenta tres grados de libertad.

Figura 3: Configuraciones comunes en un robot.



Fuente: [8]

Configuración polar: Dos juntas de rotación y una prismática permiten al robot apuntar en muchas direcciones, y extender la mano en sentido radial.

Configuración angular: El robot usa al menos 3 juntas rotacionales para posicionarse. Generalmente, el volumen de trabajo es esférico. Estos tipos de robot se parecen al brazo humano, con una cintura, el hombro, el codo y la muñeca. Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es por medio de la interpolación de articulación, tanto rotacional como angular.

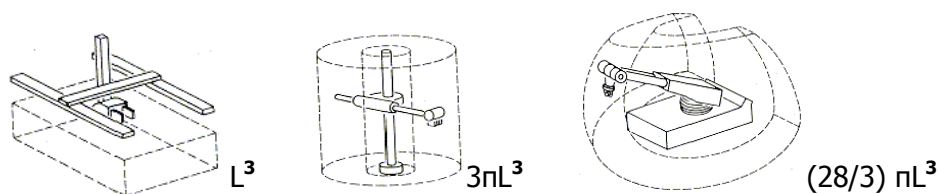
Configuración SCARA: Similar al de configuración cilíndrica, pero el radio y la rotación se obtiene por uno o dos eslabones. Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El robot

de configuración SCARA también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación). [9]

2.2.2.4. Espacio de trabajo de un robot

Una vez definidos el número de grados de libertad (articulaciones/miembro) y la configuración de estos, de acuerdo a la longitud y rango de alcance de los mismos se define una de las características más importantes en los robots: el espacio o volumen de trabajo. Este término indica el área o los límites físicos del espacio real de trabajo del robot. En la figura 4 se pueden observar los volúmenes de trabajo de las 4 configuraciones más comunes:

Figura 4: Volumen de Trabajo de configuraciones comunes



Fuente: [8]

2.2.3. Sistemas de actuación de un robot

Una de las características más importantes en un robot es su sistema de actuación, este describe la fuente principal de poder del robot, determina de qué manera se va a afrontar el problema de darle movimiento a las articulaciones del robot, en cierta medida el sistema de actuación es el que fija los límites de desempeño del robot en lo que concierne a velocidad, precisión, exactitud, repetitiva y hasta los costos.

El sistema de actuación es el encargado de transformar las señales del controlador en movimiento para las articulaciones, debido a su importancia en la selección deben considerarse factores como: el tamaño total del manipulador, el marco del lugar donde realizará sus funciones y las características de estas, así como el peso de las cargas a manejar y la velocidad con la que se necesita trabajar.

Los sistemas de actuación más utilizados son los siguientes:

Neumático: Estos son los indicados por su sencillez y costo si se desea cargar o tomar una pieza, debido a que no requiere del manejo de grandes presiones, esta clase de sistemas puede operar con finales de carrera en cada eje, restando trabajo a la programación del robot, pues solo pueden controlarse los tiempos y las secuencias de carrera, sin embargo al utilizar finales más avanzados logran una buena precisión, su principal ventaja radica en los sistemas suplementarios de compresión de aire que se necesitan pues suelen ser muy económicos y fácil de adaptar a cualquier ambiente.

Hidráulico: Gracias al gran porcentaje de transmisión y conversión de energía que presentan los fluidos que generalmente se utilizan en este tipo de aplicaciones, los robots hidráulicos son considerados como uno de los más potentes, las cargas que alcanza a levantar son de las más elevadas y desde diferentes puntos tanto desde el centro de la máquina como desde el efector final, sin embargo el costo de estos sistemas es de los más altos a consideración de las mismas capacidades para sistemas como el neumático y el eléctrico, la mayor parte del costo del equipo es debido a que se necesitan entre otras cosas una bomba de alta presión, una reserva considerable de fluido hidráulico para grandes presiones y todo un sistema de control para el paso del fluido. Pese a que en sus inicios fueron de los más populares debido a sus grandes costos hoy son pocos los sistemas hidráulicos con los que cuentan las grandes empresas en sus plantas.

Eléctrico: los avances tecnológicos en especial en el área de materiales han proporcionado un control más eficiente en los sistemas de alimentación o de poder eléctricos; éstos se han convertido en una de las mejores formas de controlar el movimiento de un robot. La precisión y exactitud que se logra con estos sistemas es excepcional, solo los sistemas de actuación hidráulicos en los que el fluido tiene ciertas características relacionadas con el grado de viscosidad ofrecen tal precisión pero aun precio más alto. Dependiendo de la forma en que se administra o controla la corriente en los actuadores de los robots eléctricos suelen subdividirse en: Motores de Corriente Directa (DC) y motores Paso a Paso (steper o step on step).

Los motores de Corriente Directa se caracterizan porque su velocidad puede ser controlada con el flujo de corriente eléctrica que es enviada a sus terminales, al aumentar el voltaje, aumenta la corriente, al igual que la velocidad. Los motores paso a paso tienen una gran precisión que radica en que para poder moverse deben ser enviados una serie de pequeños pulsos eléctricos que hacen girar el rotor del motor ciertos grados sobre un disco plano haciendo posible incluso saber la posición exacta en la que este se encuentra.

También encontramos en este grupo los servomotores, al igual que los motores paso a paso tienen un gran control posicional que esta dado por el sistema de control de lazo cerrado que acompaña al servomotor, este sistema lo que hace es que cada vez que el motor se mueve retroalimenta al sistema la posición en la que se encuentra, haciendo aun más preciso su funcionamiento. Sin duda este es uno de los mejores sistemas de control pues constantemente se conoce la posición del robot y de cada uno de sus componentes, hecho que hace más fácil verificar en que punto de la trayectoria se encuentra el elemento con relación al punto que se desee alcanzar y hasta poder corregir la trayectoria en caso de que ocurra algún problema o que este equivocada.

Un servomotor es un actuador eléctrico que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, está conformado por un motor, una caja reductora y un circuito de control.

2.2.4. Sistemas de control de los robots

El sistema de control del robot hace referencia a la forma y a la medida en la que necesitamos saber cómo se mueven los motores de cada uno de los vínculos o partes rígidas del manipulador y por tanto del robot.

Uno de los grandes problemas que plantea el desarrollo de un robot es el poder modelar su movimiento. Para poder describir el movimiento al menos el de un cuerpo rígido se necesita de: un marco de referencia, un vector de posición, y en el caso de los robots con articulaciones giratorias un vector de orientación. En un sistema de control robótico es de vital importancia lograr una alta exactitud y repetibilidad. La **exactitud** se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. Mide la distancia entre la posición especificada, y la posición real del actuador terminal del robot. Mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la capacidad del control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo.

La **repetitividad**, se refiere a la capacidad del robot de regresar al punto programado las veces que sean necesarias. Esta magnitud establece el grado de exactitud en la repetición de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

El controlador es el encargado de recibir los datos correspondientes a los ángulos de las articulaciones del robot, posteriormente envía el la señal de control a cada

motor, ya sea servo o paso a paso, esto se repite dentro de un bucle infinito, de esta forma se garantiza que el robot siempre este manteniendo su posición.

2.2.5. Actuador Final (GRIPPER, end of arm tooling or end effector)

Es el dispositivo o mecanismo que da funcionalidad real al robot, es una analogía de las manos humanas y de la gran cantidad de operaciones que estas pueden realizar, por ello existen diferentes posibilidades y tipos efectores finales, de acuerdo a sus funciones pueden clasificarse como pinzas o herramientas:

2.2.5.1. Pinzas

Se utilizan generalmente para carga o descargas objetos o piezas, para el transporte de materiales y el ensamble simple de piezas, la estructura general de la pinza dependerá del tipo de trabajo a realizar así como del peso a desplazar, la distancia recorrida o la velocidad también son variables importantes a considerar en muchos casos.

Las pinzas mecánicas parecen funcionar de la misma forma que lo hacen dos dedos de la mano al sujetar un objeto, es el primer paso en la manipulación de productos deben considerarse aspectos como la presión pues se podría estar afectando la integridad del producto manipulado, algunos de los dispositivos que pueden cumplir con esta función son:

Pinzas con vacío: utilizando un sistema neumático generador de vacío se adaptan copas de succión para levantar pequeñas cargas.

Dispositivos adherentes: esta particular forma de sujetar piezas se basa en la utilización fluidos o sustancias con fuertes propiedades adhesivas para levantar

piezas de cualquier tamaño, peso o geometría. Suelen ser algo riesgosos para algunas partes de los mecanismos. Igualmente pueden contaminar o afectar severamente los objetos con los que entran en contacto de ahí la restricción de solo utilizarlos en aplicaciones específicas.

Dispositivos magnéticos: usando las leyes de la física que afectan los cuerpos imantados se implantan en una pequeña base poderosos imanes que atraen toda clase de materiales u objetos del tipo ferroso. Últimamente gracias a los avances adelantados por la ciencia es posible manipular con imanes todo tipo de metales o materiales con estas propiedades.

Dispositivos mecánicos simples: Ganchos de sujeción en los que la inercia de un resorte u otro elemento con alta concentración de energía potencial es utilizado para sujetar sin el mayor control un elemento.

Pinzas duales: son dos pinzas en un actuador, también sirven para carga y descarga de materiales solo que se pueden tomar dos objetos a la vez en vez de uno, reduciendo algunos tiempo de producción.

Retroalimentación por sensores: la esencia de todo mecanismo es poder controlar la mayor cantidad posible de variables (peso, presión, temperatura etc.) esto es posible gracias a la utilización de pequeños sensores que detectan las características o la posición del elemento, envían una señal al controlador del sistema, este se encarga de re calcular la salida para tomar de forma precisa el producto.

2.2.5.2. Herramientas

Mecanismo o elementos utilizados para realizar algún tipo de transformación u operación en un material, que se puede encontrar en movimiento o estático considerando las aplicaciones más comunes en las cuales se utilizan robots industriales se tiene:

- Pistolas para soldadura punto a punto.
- Porta electrodos para soldadura de arco.
- Husillo de rotación para hacer ruteado, fresado, taladrado, cilindrado etc.
- Pistola de pintura por aspersión (spray)
- Herramientas de ensamble (atornilladores o desatornilladores automáticos)
- Herramienta de corte por chorro de agua

El desarrollo de operaciones con herramientas crea en el robot la necesidad de poder controlar la herramienta en cuanto a tiempo, velocidad, inicio así como el detenimiento utilizando la retroalimentación de señales entre el controlador, los sensores y la herramienta.

2.2.6. Sensores

De acuerdo al lugar en el que se empleen pueden ser internos o externos, los sensores internos ayudan a determinar la posición y la velocidad de cada una de las articulaciones del robot, La mayoría de estos sensores forman u sistema de lazo cerrado retroalimentado con el controlador del robot. Para determinar la posición se utilizan potenciómetros y encoders ópticos.

Mientras los sensores internos determinan posición y velocidad, los externos ayudan al manipulador a percibir el ambiente que lo rodea permitiéndole incluso comunicarse con otras maquinas o equipos del centro de trabajo. La complejidad de

estos sensores puede variar desde un simple interruptor de carrera que indica que una pieza ha sido posicionada hasta dispositivos que miden temperaturas, presiones, flujos, voltajes, intensidades entre otras.

Entre los sensores más comunes se pueden contrar:

Sensores táctiles: su principal misión es detectar si algún elemento u objeto ha entrado en contacto con el sensor, ya sea porque lo ha tocado o en algunos más avanzados porque se ha ejercido cierta cantidad de fuerza sobre él, en aplicaciones como las pinzas estos sensores permiten controlar la fuerza que se está aplicando al objeto. Ej: finales de carrera

Sensores de proximidad: determinan si hay un objeto cerca al sensor, si pueden precisar la distancia real a la que se encuentra el objeto reciben el nombre de sensores de rango. Ej: Inductivos

Sensores ópticos: con el apoyo de dispositivos fotométricos como las celdas fotoeléctricas perciben y registran cambios de luz, son fundamentales en los sensores de proximidad. Ej: Fotoceldas, Reflex.

Maquina de visión: mucha de la información utilizada por el cerebro para tomar decisiones y dirigirse mejor es percibida por los ojos. La vista es una parte esencial en la locomoción, el que un robot pueda entender y diferenciar imágenes abre un campo grande hacia el desarrollo de robots móviles y permite que se puedan realizar actividades de inspección y control de calidad visual.

2.2.7. Cinemática y dinámica del manipulador

La esencia de un manipulador robótico, es que este pueda moverse dentro un marco establecido con cierto grado de precisión, repetitividad, y confianza para cumplir con

la funciones para la cuales fue diseñado o adaptado; este aspecto plantea algunos pequeños problemas, uno de ellos es saber en qué lugar está el manipulador, el segundo es saber cuál es el mejor camino o trayectoria adecuada que se debe seguir para llegar al destino fijado. El primer problema es resuelto en física con ayuda de la Cinemática, el segundo con la Dinámica en la generación de trayectorias.

Adicionalmente para poder abordar los problemas antes mencionados, es preciso hablar antes de dos conceptos igual de importantes, la posición y la orientación, variables que describen de forma sencilla la ubicación o localización de un objeto en el espacio físico de acuerdo a un sistema de referencia, haciendo posible luego la identificación de sistemas coordinados sobre los cuales se efectúan operaciones de traslación o rotación que describen con mayor precisión el movimiento de un cuerpo.

En cuanto a la representación de algunos autores mencionan que esta puede asociarse a una serie sucesiva de giros de un eje desde la posición anterior, es decir al fijar "a un objeto un sistema de coordenadas rectangulares su orientación puede expresarse como una sucesión de giros alrededor de cada eje" [9]. Así cuando el objeto gira en primera instancia alrededor de un eje z en un ángulo α , luego alrededor del eje y (girado) en un ángulo β y luego alrededor del eje z (girado) en un ángulo δ , la orientación final del objeto estará dada por la secuencia de ángulos realizados en cada eje, estos ángulos se conoce mejor como ángulos de Euler (α , β , δ). Decimos entonces que para la representación total del movimiento, un robot necesitaría básicamente de seis grados de libertad si se desea llevar el actuador final a cualquier localización en el espacio de trabajo. Sin los 6 grados de libertad la combinación posiciones y orientaciones sería limitada. [8]

Uno de los parámetros más utilizados para describir y modelar los movimientos que va a seguir el manipulador es el Denavit-Hartenberg este es un método en el que se utilizan matrices de forma sistemática en base a sistemas de coordenadas ligadas

establecido en relación a cada uno de los vínculos o articulaciones del robot [10]. Si se tiene éxito al definir los sistemas de coordenadas esto será suficiente para describir el movimiento desde y hacia cualquier punto usando transformaciones básicas de traslación o rotación dependiendo del tipo de articulaciones que unen los vínculos del robot.

“Esta relación se hace por medio de transformaciones homogéneas, en donde se asocian cada uno de los sistemas coordenados de cada uno de los eslabones, a través de transformaciones, compuestas de traslaciones y giros básicos” [9]. Reduciendo el problema de la cinemática a hallar las transformaciones necesarias para pasar desde el punto de origen del sistema de referencia al extremo final del robot.

Para lograr la descripción o la modelación total del movimiento del manipulador una vez definido el sistema de coordenadas base lo que se hace es ir trasladando o rotando este sistema base transformando la matriz resultante con incógnitas desconocidas a incógnitas en términos de las ya dadas por el sistema base a esto se llama una transformación y puede ser compuesta o homogénea, en las primeras se tratan tanto las variables de la posición como las de orientación mientras que en la segunda se trata solo uno de los grupos de variables o las de posición o las de orientación.

2.2.7.1. Cinemática

La cinemática entonces puede ser definida como el estudio del movimiento tanto de forma estática como a través del tiempo sin tener en cuenta las fuerzas que lo generan [9], en este sentido la cinemática busca representar por medio de modelos o sistemas geométricos y su consecuente referenciación, la ubicación en el espacio donde se encuentra un cuerpo articulado y como este avanza de un punto a otro a través del tiempo, considerando adicionalmente en el caso de los manipuladores

robóticos entre otros aspectos, su configuración física, y la longitud o alcance de sus articulaciones.

A su vez la cinemática plantea dos asuntos el primero, "la cinemática directa ayuda hallar una matriz de transformación, que relaciona tanto la posición como la orientación de un extremo del robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo, que por lo general es la base" [9], en el caso de Denavit-Hartenberg el sistema de coordenadas es una combinación entre la notación cartesiana y la polar que hace posible que los planos se puedan referenciar entre sí, y que a la hora de derivar para hallar las velocidades y aceleraciones sea mucho más fácil y comprensible.

Al otro extremo de la cinemática directa se encuentra la cinemática inversa, mientras en la primera se utiliza un sistema de referencia con variables conocidas para establecer a qué punto específico del área de trabajo se llega, en la segunda se da un punto en el espacio al cual se quiere llegar para en base a un sistema de referencia de forma inversa descubrir los competentes iniciales que describen ese punto; considerando seriamente la configuración del manipulador, el entorno de trabajo y las restricciones presentes en ambos, "Se trata de calcular las variables de articulación para un elemento con respecto a un sistema de referencia " [10].

Resolver el problema de la cinemática inversa faculta en cierta forma a los robots para tomar decisiones, escogiendo la trayectoria que resulte más cómoda de seguir y que no implique sobrepasar las restricciones lograr esto requiere tiempo y costos, así como una gran capacidad computacional pues la búsqueda de la respuestas a las ecuaciones generadas por los modelos y las matrices tienen muchas incógnitas o deben derivarse o invertirse, eso dejando de lado que generalmente hay más de una solución para un solo problema y que el procesador debe hacer esto de forma rápida o eficiente.

2.2.7.2. Dinámica

Pero eso no es todo, se debe tener en cuenta que la cinemática estudiada atrás no considera en ningún momento los efectos que pueden tener sobre el movimiento y el control de este, el peso y el tamaño del robot al igual que cada uno de sus componentes. Este problema lo resuelve la dinámica. Ella se encarga de relacionar matemáticamente la localización del robot con sus características dimensionales (masa, longitud, inercia etc.)

Para el cálculo del modelo dinámico se asume que el robot es rígido, al considerar que los esfuerzos y cargas provocados por la estructura dimensional del robot no son lo suficientemente fuertes como para deformarlo.

Para conseguir el modelo dinámico pueden utilizarse muchos parámetros entre ellos la ley Newton-Euler, en la que se describen las relaciones basados en la ley de la conservación de la energía Newton, para la parte lineal y la ley de los ángulos de Euler para la parte rotacional. También puede utilizarse el parámetro de Lagrange

La dinámica tiene por ciencia describir la relación entre los movimientos de que sufre un cuerpo, y las fuerzas que los originan. La dinámica robótica revela la relación que existe entre los movimientos del robot, y los pares o fuerzas ejercidas por los actuadores o accionadores del robot. En el caso de articulaciones rotacionales, se producen pares de fuerzas entre los eslabones. La relación dinámica se obtiene a partir de un modelo dinámico que relaciona matemáticamente la ubicación del robot en base a la velocidad y aceleración, las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones, los parámetros de longitud, masas, inercia. Con la dinámica del robot, se pueden controlar los movimientos del mismo, de manera que el extremo realice una acción o siga una trayectoria determinada.

Como consideraciones básicas para los cálculos, se asume al robot como rígido, ya que por lo general las cargas e inercias manejadas en este prototipo no son suficientes como para originar deformaciones en los eslabones. El modelo dinámico de un robot se basa en el equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton o su equivalente para movimientos de rotación, la ley de Euler.

$$\sum T = I\omega + \omega \times (I\omega)$$

$$\sum F = mv$$

Incluso se puede obtener un modelo dinámico a partir de consideraciones del tipo energéticas, como el planteamiento Lagrangiano. El planteamiento utilizado en el presente trabajo es el de Newton-Euler, se utiliza por poseer un algoritmo recursivo con un orden de complejidad $O(n)$, lo que quiere decir que esa complejidad depende directamente del número de grados de libertad. Con este planteamiento se obtienen las fuerzas y los pares actuantes sobre un eslabón i , referidos a la base del robot. [12]

2.2.8. Representación

Finalmente si consideramos un manipulador robótico como una secuencia de articulaciones o juntas y eslabones, para representar su ubicación en el espacio, según la figura 4, se iniciaría por nombrar cada una de las articulaciones partiendo de la base y de la articulación más cerca de esta, por ello encontramos J_1, J_2 , de igual forma se procede a nombrar los eslabones o cuerpos como L_1 y L_2 siendo, L_0 el punto de inicio y de entrada para la articulación J_1 , en ese orden de ideas en un manipulador de n grados de libertad, la ubicación del actuador final estará dada por la posición y orientación del eslabón final L_n . luego de definir las articulaciones y eslabones se continua con la asignación de valores a las variables como: λ_1, λ_2 , que son las posiciones de las articulaciones con relación al eslabón de inicio. En este

punto es preciso decir que la posición y la orientación se pueden representar de muchas formas, sin embargo suelen usarse la notación polar y la notación cartesiana, en la primera se da un ángulo y la longitud del movimiento o desplazamiento, mientras en la segunda, se utilizan dos longitudes que producen un vector resultante, que describe el movimiento.

Finalmente según la figura 4 se tendría que la posición del punto (P) puede representarse como:

$$P_j = (\lambda_1, \lambda_2) \text{ o } P_j = (X, Z)$$

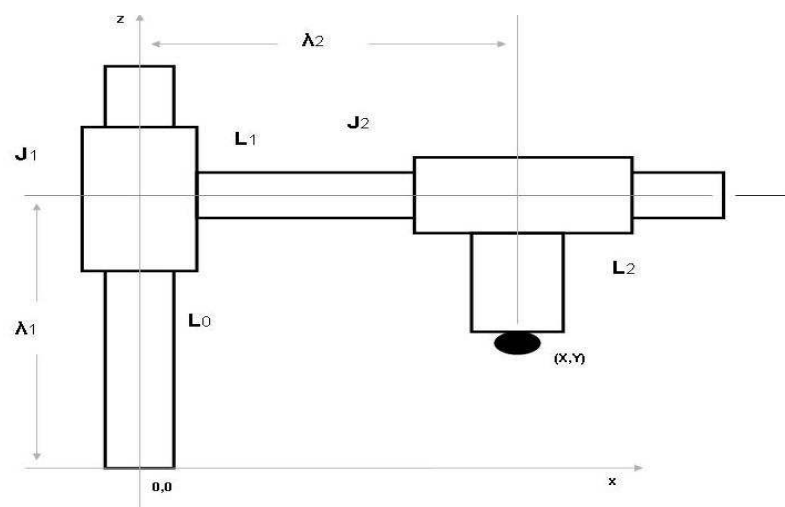
Siendo la primera la representación polar y la segunda la representación cartesiana, esto es válido para la representación del espacio en dos dimensiones, para el tridimensional se hace necesaria la utilización de 6 parámetros tres que definen la posición por coordenada en los ejes (x, y, z) y tres que definen la orientación haciendo referencia a los ángulos (α , β , δ) en los tres ejes mencionados dando lugar a los vectores de posición y orientación que describen un movimiento. Claramente estos parámetros serán válidos en manera en que estén dentro del marco o espacio del manipulador. En la figura 5 una representación de una manipulador cartesiano con dos grados de libertad.

2.2.9. Características generales Manipuladores Cartesianos

Los robots manipuladores cartesianos se han caracterizado a lo largo del desarrollo de la automatización y la robótica como máquinas rígidas, es decir de difícil o escasa movilidad una vez son instalados, ya sea por su tamaño, peso o estructura mecánica, su movimiento en dos o tres ejes le confiere un espacio de trabajo algo reducido comparados con las demás configuraciones, sin embargo esto lo hace especial para ambientes educativos en los que se necesitan hacer un primer acercamiento a lo que las tecnologías y sistemas avanzados de producción, pues

permite un cambio relativamente fácil de función, al igual que poder controlar de manera precisa variables como los tiempos de producción, de transporte, levantamiento y desplazamiento de carga, operaciones que una vez estudiadas suelen generar reducciones considerables en tiempos.

Figura 5: Manipulador cartesiano tipo (L) con dos grados de libertad



Fuente: Propia

En la industria suelen ser utilizados como apoyo en los procesos carga / descarga o alimentación de materiales o insumos, al igual que en procesos de posicionamiento de piezas, inspección de calidad. En el caso de las cargas es importante mencionar que los robots accionados hidráulicamente son capaces de levantar cargas considerables de forma muy eficiente aunque algo costosa.

Los robots cartesianos también conocidos como robots de puente transversal, son muy parecidos a una grúa, han sido catalogados como de los más simples o sencillos debido a que su modelo cinemático no implica mayores complicaciones, pues solo dispone de movimientos lineales en los que basta con fijar un sistema de coordenadas y asignar valores a cada una de los ejes para que estos se desplacen, sin que en el camino surjan muchas singularidades cinemáticas (posiciones imposibles),

básicamente porque los tres brazos de cada uno de los ejes son independientes, la mayoría de estos robots son rígidos es decir que no son tan fáciles de modernizar, ni de adaptar a centros o celdas ya establecidos, que las máquinas o equipos alrededor son dependientes de él y que una vez instalados no se suelen moverlos o trasladarlos con frecuencias entre otras cosas debido a su peso pues son bastante grande para poder cubrir una mayor área de trabajo.

Entre otras cosas se caracterizan por tener de dos a tres articulaciones prismáticas que permiten su movimiento traslacional o lineal en dos o tres ejes, tienen la gran desventaja de que los dispositivos fijos y sensores deben estar dentro de él haciendo difícil su control avanzado.

2.2.10. Tipos de Robots Cartesianos

Entre los diferentes tipos de manipuladores industriales de tipo cartesiano se pueden contar:

Posicionador lineal: Está por encima o por debajo del área de trabajo. Se desliza en dirección x/z, utiliza principalmente en el transporte de cargas en constante movimiento, de trayecto corto en dirección z.

Robot lineal: Se encuentra cerca del área de trabajo, se diseña con el fin de llevar cargas pesadas de forma rápida en trayectos cortos.

Robot portal: Esta incorporado por encima del espacio de trabajo ahorrando espacio, es diseñado para transportar cargas a grandes distancias en una planta.

Robot portal de pared: Situado junto al área de trabajo, su diseño eficiente permite el desplazamiento sobre superficies verticales.

2.2.11. Manipulación de materiales

Antes de hablar de la manipulación de materiales es importante decir la implementación de tecnologías avanzadas de producción en un proceso ya sea para la manipulación de materiales u otro fin, debe considerar seriamente que los niveles o capacidades de producción actuales en contraste con los aumentos obtenidos a partir de la implementación, no vayan a generar niveles de inventarios lo suficientemente altos como para saturar los mercados y llevar la empresa a la quiebra, eso dejando de lado que sin un buen estudio de compatibilidad o actualización tecnológica estas inversiones pueden convertirse en gasto innecesarios.

Bajo la luz de la automatización, la manipulación de materiales consiste en la evaluación, disposición y acondicionamiento tanto de las herramientas de manipulación como de transporte al igual que los demás recursos necesarios, para lograr una organización eficiente de la cadena de producción, a partir diseños de plantas coherentes con el tipo de productos, el control del flujo material y sobretodo de fuertes e intensivos estudios de tiempos y movimientos con los cuales se mejore entre otras cosas los desplazamientos o movimientos que deben hacer las persona o el producto para completar su ciclo de producción rápidamente.

En un sentido más estricto la manipulación de materiales esta basada en conceptos como la tecnología de grupos, a través de los cuales según las características físicas, de producción o manufactura y de mercado de un pieza o producto se agrupan estos mismos en familias, para su elaboración conjunta con el fin de optimizar la producción, esta optimización generalmente implica que se utilicen herramientas como manipuladores para separar, movilizar, ensamblar o acabar productos de una misma familia por líneas de producción diferentes una vez se comprueba que el proceso inicial compartido cumple con los requisitos de calidad previsto.

La manipulación de piezas o productos antes descrita, al igual que la que se da en áreas como calidad, embalaje, empaque y apilamiento normalmente requiere de mano de obra intensiva en actividades repetitivas, desgastante que con el tiempo generan en los operarios enfermedades crónicas al tiempo que reducen la productividad o la calidad. Un manipulador cartesiano puede cumplir sin mayores inconvenientes o inversiones, adicionales al mantenimiento, con este tipo de trabajo permitiendo que las personas se ocupen en otras tareas, mientras los niveles de productividad y calidad se mantienen.

En este punto es importante mencionar que si bien los manipuladores pueden lograr las ventajas mencionadas a diferencia del recurso humano no se adaptan tan fácilmente a otros ambiente de trabajo o tarea sin que haya una adición o acople de nuevos elementos con la consecuente re-programación o re-ajuste de componentes electrónicos o computacionales y su costo, a continuación un ejercicio para analizar la pertinencia de una inversión tecnológica, el planteamiento se hace sin pretender generar discusión referente al tema de las capacidades humanas vs la tecnología.

Un operario realiza un ensamble de piezas en 3min. con un procedimiento bastante eficiente, un manipulador cartesiano puede realizar el mismo ensamble en 1.85min. con el mismo procedimiento. Si se decidiera evaluar el cambio de tecnología en el proceso se tendrían se podría hacer el siguiente análisis:

Tabla 1: Análisis Costos MO vs MQ

1 ensamble O	3 min
1 ensamble M	1,85 min

Capacidad	12000 min	Turno 8hr * 25 días
-----------	-----------	---------------------

Produccion O	4000
Produccion M	6486,5

Si se evalua la inversion de la maquina o herramienta a 2 años se tendria

T	24 meses
SMVL	\$ 643.750 + sobretasa parafiscales 25%
Inversion Mq	\$ 40.250.000 + acum impuesto depreciacion + mantenimientos 15%

Total Prod O	96000
Total Prod M	155675,7

Total Costo O	\$ 643.750
Total Costo M	\$ 1.677.083

Hacer
doble clic
para
modificar

Cost x Unid O	6,71
Cost x Unid M	10,77

Fuente: Propia

Si los cálculos se realizaran con capacidad real en lugar de teórica se vería una leve disminución en el costo x unidad de la maquina frente al del operario, pero aún así la inversión no se justificaría a dos años pues se estaría produciendo a perdida con la maquina a razón de \$4.07, que se recuperarían en alrededor 3 años, si la inversión fuese a más de 3 ½ seria más rentable hacer la inversión.

A partir de un buen estudio de tiempos/movimientos y considerando algunas otras variables que pueden ser importantes en un ambiente industrial específico se puede obtener información suficiente para evaluar una inversión de este tipo determinando si es pertinente, viable, rentable.

2.2.12. Aplicaciones de los robots industriales

Los robots como herramientas de trabajo han surgido a causa de la especialización, riesgo, monotonía, precisión y dimensiones de algunas actividades, que como la medicina, la manipulación de explosivos o materiales peligrosos, la producción etc. Requieren del control **continuo** de la mayor cantidad posible de variables que afecten el proceso, este tipo de control es el que ofrecen la mayoría de los robots o manipuladores.

Los manipuladores cartesianos en particular son utilizados con mayor frecuencia en procesos industriales en los cuales el nivel de precisión en el control de las variables del proceso es bastante bajo pero igualmente importante, entre esos procesos se pueden encontrar:

Transporte y Carga de materiales en procesos físicos como fundición, extrusión, laminación etc. En estos casos debido a las altas temperaturas manejadas en el proceso es preciso un elemento que una vez la materia prima transformada sale sea llevada a una zona de enfriamiento o de tratamiento térmico posterior, para esto el manipulador utiliza un pinza a presión para tomar la pieza transportarla y volver nuevamente.

Ensamble de piezas: Uno de los mayores usos de los manipuladores cartesianos y los robots en general son las líneas de ensamble, en esta aplicación el sistema robotizado toma una de las piezas que viene sobre una banda transportadora y la ubica encima o dentro una pieza de tamaño mayor o menor, las piezas normalmente son sujetadas con pinzas neumáticas, que una vez detectan que las piezas han encajado se abren para tomar una pieza.

Control de Calidad: Productos como paneles electrónicos, integrados, tarjetas, teclados, frenos de autos, deben ser revisados uno a uno, pues de su integridad depende la vida humana, pero después de cierto tiempo cumplir con esta tarea seria desgastante para una persona existen manipuladores que toman las piezas las levantan y permiten que un láser u otro elementos de detección de posibles fallas escanee la piezas en busca de imperfecciones, y dependiendo del diagnostico enviar las rechazadas a la línea de reproceso.

Paletizado y Almacenamiento (apilado): Algunos productos para su distribución o transporte son embalados en grandes cantidades, para cubrir esos volúmenes generalmente sobre se utiliza un sistema cartesiano que unido a un eje giratorio que sube y baja mientras gira envolviendo los grandes apilamientos de productos, todas las veces que sea necesario.

El apilado podría decirse que es la aplicación por excelencia de los manipuladores cartesianos pues por su estructura pueden alcanzar grandes alturas sin riesgos de que las estibas se caigan y por su precisión en el posicionamiento permite optimizar el espacio de almacenamiento.

Corte, Soldadura y Pegado: Las cortadoras de control numérico o ruteadoras, son un claro ejemplo de un manipulador cartesiano de corte, la aplicación se basa en una mesa sobre la cual de acuerdo a una trayectoria definida se desliza el manipulador que tiene en su punto un láser u otro elemento de corte a ciertos ángulos consiguiendo sobre grandes superficies un corte de excelente calidad.

Otro de los procesos en los que comúnmente se utilizan manipuladores cartesianos es la soldadura aun más especialmente en la soldadura con electrodo o soldadura punto a punto en este caso, el manipulador lleva en su accionamiento final el porta electrodo, o la pistola de inyección para hacer la soldadura, la calidad del cordón es

bastante buena gracias a la singular precisión del manipulador en su posicionamiento.

Para el caso del pegado, los manipuladores cartesianos permiten aplicar con gran precisión casi cualquier tipo de material o pegamento sobre una superficie.

En general el manipulador para cumplir con su función utiliza una herramienta, que puede ser una pinza, una ventosa o chupa, una pistola o una herramienta específica según la actividad a desarrollar.

2.3. GENERALIDADES CELDA DE MANUFACTURA

El diseño del manipulador se ajusta al supuesto que dentro de poco tiempo la Universidad EAN tendrá habilitado para el programa de Ingeniería de Producción un moderno laboratorio en el cual estén las máquinas adquiridas por la Facultad. Entre las divisiones del nuevo laboratorio estaría la sección de Automatización. Dentro de esta última un área específica de robótica en donde estará la celda de manufactura flexible.

2.3.1. Componentes de la Celda

Considerando las adquisiciones recientes de la Universidad, sus proyecciones y promesas la celda contará con un sistema de bandas transportadoras, un rack para almacenar piezas de variados tamaños, dos máquinas de mecanizado, hardware y software especializado para el funcionamiento eficiente de la celda a nivel de cada uno de sus componentes individuales así como para el de la integración de todos.

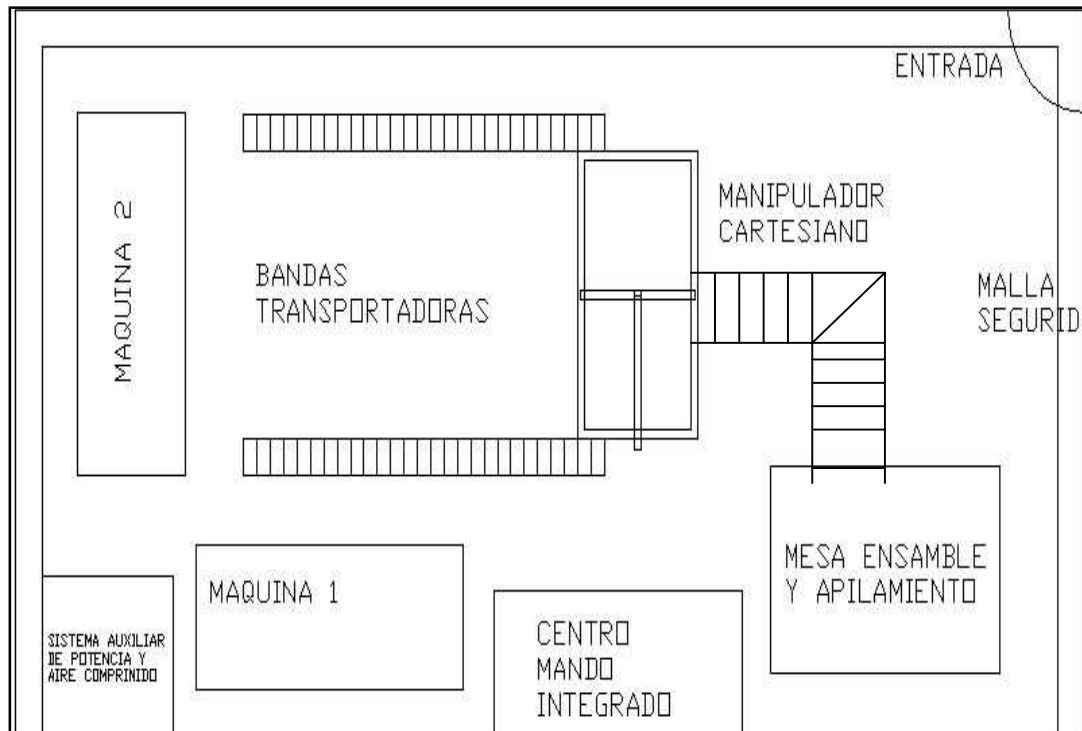
2.3.2. Sistema auxiliares para el funcionamiento de la Celda

Se espera que la celda este correctamente demarcada, acondicionada con todos los sistemas auxiliares hidráulicos, neumáticos, eléctricos, electrónicos, informáticos, de seguridad industrial, de emergencias apropiados para la implementación total de la celda. Sin estos sistemas es poco prudente iniciar cualquier actividad en la celda.

Estos sistema auxiliares incluyen aire comprimido, con el debido compresor y sistema de distribución, cuarto de maquinas, sistemas de interrupción del fluido eléctrico en varios puntos, sistema de ventilación e iluminación adecuado al ambiente educativo investigativo, sistema eléctrico, tuberías de aguas y gases, aun como parte del funcionamiento del laboratorio por seguridad industrial deben habilitarse espacios para equipos o elementos de trabajo básicos para la protección tanto para operadores como para visitantes.

En cuanto al sistema de emergencias de la celda deben estar ubicadas en una parte visibles las rutas de evacuación, los extintores. Cada una de los elementos en la celda que representen un riesgo, al igual que las zonas de transito deben estar plenamente identificadas, se espera que igualmente el sistema contra incendio no active riego de agua sino de gas contra incendio o cualquier otra sustancia que evite el daño de los equipos. A continuación en la figura 6 la representación del esquema general propuesto de la celda de manufactura de la Universidad EAN.

Figura 6: Esquema General de Celda Manufactura Flexible

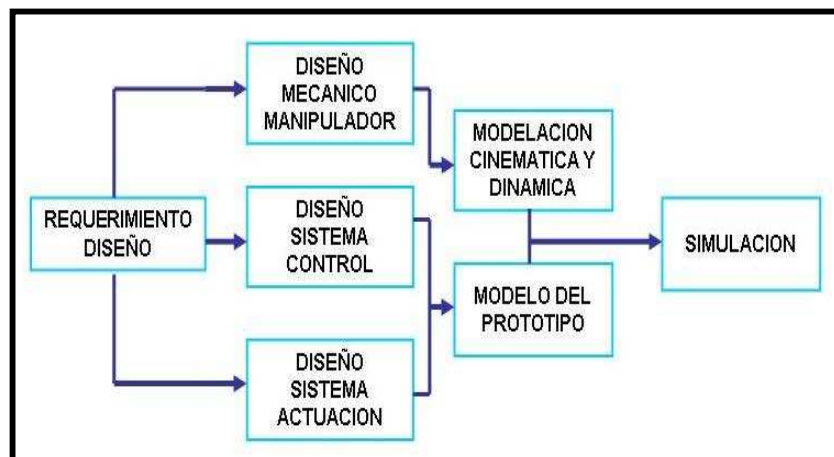


Fuente: propia

3. PROPUESTA DISEÑO

Dada la gran cantidad de conceptos que involucra este aspecto se ha decidido dividir el diseño en tres partes totalmente interrelacionadas pero diferentes como lo son el Diseño mecánico que contempla la conversión de las características físicas del manipulador en elementos mecánicos que soporten la estructura del manipulador para el cumplimiento de sus funciones, un Diseño de actuadores que serán los encargados de dar vida o movimiento al esquema mecánico desarrollado, para finalmente involucrar un Diseño del Sistema de Control tanto electrónico como informático, que se encargará de que el movimiento generado por los actuadores se distribuya de forma tal que en el esquema mecánico se regule principalmente tres variables críticas a saber la presión, el peso y la velocidad.

Figura 7: Diagrama de bloques general del Diseño del Sistema



Fuente: propia

Como se menciona anteriormente el manipulador a diseñar involucrará en su desarrollo una fase diseño mecánico, en la que se consideren aspectos como los materiales, las cargas, las velocidades a trabajar. La potencia a transmitir para el movimiento de las cargas teniendo en cuenta los fenómenos físicos que como la

inercia o la rigidez están asociados a este. Posteriormente se incluirán los aspectos relacionados con el sistema de accionamiento del manipulador así como el control del mismo, identificando claramente en este, el control computacional o informático del manipulador para garantizar su acople con la celda de manufactura de la cual hará parte.

3.1. GENERALIDADES DEL DISEÑO DEL MANIPULADOR

Analizadas las principales características de los robot manipuladores industriales en especial las asociadas a manipuladores cartesianos, las condiciones de funcionamiento inicialmente planteadas para el diseño del manipulador, algunos requerimientos técnicos tanto del manipulador como de la celda a la cual estará integrado, al igual que algunas de las necesidades de manipulación de material u objetos en procesos industriales (como el mecanizado de piezas, soldadura, fundición, inyección de plásticos, pintura, entre otros) se propone el diseño de un manipulador tipo cartesiano de aproximadamente 2m de largo x 1,5m de ancho x 1,5m de alto, de 5 grado de libertad, uno en cada eje (x, y, z) y dos en el actuador final, el cual sería multifuncional con un rápido cambio de herramienta entre una ventosa de succión y una pinza. El accionamiento estaría a cargo de motores paso a paso y un posible moto reductor para el eje z de modo que pueda levantar hasta 150gr de peso, las dos herramientas se proponen con el fin de darle mayor flexibilidad al manipulador en cuanto aplicaciones o variables de control, con estas herramientas las aplicaciones serían ensamble de piezas pequeñas y apilamiento.

Asumiendo que la celda contará con maquinas CNC las piezas mecanizadas en aceros o aluminios aleados tendrían un tamaño máximo de 10cmx5cmx10cm, un volumen aproximado de 500cm³, las pinzas propuestas se aconseja sean realizadas en aluminio de alta densidad, que permitan soportar fuertes presiones, fricciones y temperaturas, para el correcto acople o sostenimiento de las piezas tomadas, las

pinzas contarán con sellos en teflón para garantizar un mejor acople. En base al área de trabajo deseada se definirán las longitudes de cada uno de los vínculos representados en rieles sobre los cuales se guiará el robot, al menos para los ejes x, y, z. Considerando las dimensiones del área de trabajo, y que el peso de las cargas con las que se va a trabajar es relativamente pequeño se propone la utilización de un sistema actuación en general eléctrico, con la posibilidad de combinarlo con partes de un sistema neumático, para darle multifuncionalidad al manipulador.

El sistema de actuación es posible que este basado en motores paso a paso por ser los más adecuados en cuanto al manejo de fuerzas, relación energía/peso media. El momento de torsión generado por estos motores es muy acorde con el máximo alcanzado por manipuladores cartesianos de uso pedagógico, además que brindan una forma sencilla de controlar variables críticas como la velocidad, se prevé entonces la necesidad de implementar un sistema de control, en el que se utilice una unidad microprocesadora. Así como un programa de control básico escrito en un lenguaje de programación sencillo, fácil de utilizar e incluso de programar, esto entre otras cosas con el fin de garantizar la generación de trayectorias una vez esté definido el modelo cinemático y dinámico del manipulador.

Adicionalmente el accionamiento en cuanto a los ejes principales x, y, z que será por medio de motores paso a paso incluirá sensores de proximidad que detecten la posición final de la herramienta, la herramienta final será intercambiable, una copa de succión por aire comprimido, unas pinzas accionadas por aire comprimido o fuerza electromagnética, alrededor de cada una de las articulaciones del manipulador habrán sensores de proximidad, que retroalimenten la posición de los vínculos del manipulador la herramienta y la pieza, todas estas señales se controlarán mediante un modulo de control microprocesado, que en un futuro permitirá la integración con los futuros elementos de la celda bajo un software de computadora de interfaz sencilla en el que se puedan apreciar cada uno de los componentes de la celda y su estado.

3.1.1. Presupuesto

Respecto del costo de implementación del manipulador en la celda, se puede decir que en base a los costos de los principales componentes expuestos en el Anexo 3, el costo estimado del manipulador sería de \$6.000.000, eso sin considerar los sistemas auxiliares con los que previamente tendrá que contar el lugar donde se vaya a instalar o integrar el manipulador.

Se espera igualmente que sea la Universidad EAN a través de su facultad de Ingeniería en compañía con la vicerrectoría de investigación, bajo la coordinación del departamento de ciencias básicas quien aporte la totalidad de los recursos necesarios para la implementación de la celda, sin que esto signifique que los estudiantes, docentes o empresarios interesados no puedan realizar aportes voluntarios en pro de la implementación de la celda, ya sean económicos o en especie.

Tratando de ser consecuentes con la realidad económica del país se plantea iniciar una investigación seria de las necesidades de manipulación de productos en las áreas de producción, calidad, embalaje, apilado, empaque y distribución, en microempresas y PYMES, tipos de empresas que en Colombia representan cerca del 90% [17], para determinar que las posibles características mecánicas, de control entre otras que debería tener un manipulador cartesiano, con el fin de que la herramienta desarrollada este cercana a la realidad empresarial del país. En cierta forma esto implicaría que la herramienta pudiera ser comercializable y adaptable al contexto industrial de la empresa colombiana.

Los recursos solicitados en la propuesta contemplan la contratación al igual que el pago de un especialista según las necesidades diseño con formación en Diseño de sistemas de automatización, la compra o diseño a medida los diferentes

componentes mecánicos una vez sean evaluadas las diferentes opciones, los componentes electrónicos y computacionales necesarios dependiendo del alcance dimensionado para el sistema de control.

Si fuera factible, viable y rentable la posibilidad de comercializar los manipuladores para la pequeña empresa, tendría que definirse un modelo de negocio competitivo, rentable, integrador e innovador que tuviera su financiamiento en ferias de emprendimiento, Incubadoras de Universidad o Instituciones del gobierno, fondos de agremiaciones de pequeñas empresas, o fondos de incubación o ayuda como Fondoempreder.

3.1.2. Cronograma

Para el desarrollo de la propuesta al igual que para la ejecución de la misma se ha establecido un tiempo de duración aproximada de 6 meses al cabo de este tiempo se deben haber entregado todos los hitos de la propuesta. Si bien los entregables son pocos a lo largo de la propuesta (2 la propuesta de diseño y el prototipo final) son lo bastante completos como para asegurar el correcto desarrollo de la propuesta en la extensión del tiempo, cada uno de los diseño (general, de bloques, de detalle mecánico, electrónico, computacional) podría considerarse como un entregable parcial, una representación de los actividades y sus tiempos de entrega se refleja en el Anexo 4.

si adicionalmente se tiene presente que son niveles mínimos de automatización o de requerimientos técnicos y tecnológicos para la construcción se cree factible que la propuesta se pueda desarrollar en un periodo de 9 a 12 meses, de 2 a 3 meses de diseño, 3 meses de ajustes, pruebas, evaluación y aprobación de la propuesta dependiendo del alcance del diseño de detalle; 3 a 4 meses en la construcción, y un mes más en el cual se evalúen a fondo los limites reales de las variables del

manipulador, al igual que el alcance de las restricciones, antes de presentarlo en ejecución formalmente.

Si se tiene presente la recomendación hecha en el capítulo 2.3.11 de realizar una investigación para determinar que características adicionales tendría el manipulador para su acople, puesta en marcha en micros, pequeñas y medianas empresas el tiempo de terminación podría extenderse a año $\frac{1}{2}$ considerando que un poco más de la mitad del tiempo sería necesaria para el adecuado levantamiento de las características antes mencionadas.

3.2. POSIBLES APLICACIONES DEL MANIPULADOR

Los manipuladores vistos como herramientas de trabajo tienen un espectro de funciones bastante amplio, casi puede decirse que pueden adaptarse a cualquier entorno o disciplina, en el ambiente industrial en particular hay dos procesos en los que sus ventajas son realmente útiles.

3.2.1. Ensamblado

La aplicación de ensamblado consistiría en que se dispondrían en la celda de dos bandas transportadoras, una en la que se alimente el material ya sea que venga de la fuente principal o de un proceso anterior y una segunda banda en la cual el manipulador pondrían el elemento final ensamblado, para esto el manipulador recibe una señal del sistema que indica al controlador que las pinzas deben ser abiertas para tomar la pieza que se encuentra abajo, moverse según una trayectoria definida a cierto punto y presionar hasta que el sensor de proximidad o de presión indique que los elementos están acoplados, en este momento el manipulador deberá abrir nuevamente la pinzas tomar la pieza ensamblada girarla y llevarla a la zona de empaque o apilamiento y regresar por la siguiente.

El ensamblado se llevará a cabo tomando en cuenta:

- Partir de home
- La pieza a ensamblar debe tener dimensiones menores a las del cuerpo del ensamble
- La trayectoria fijada debe estar contenido el PLC o la tarjeta del controlador

Durante esta aplicación el manipulador partirá de la posición fijada como home, se posicionara en la primera posición almacenada en la trayectoria, una vez el sensor de final de carrera ubicado en el riel envíe la comprobación de la posición, se

accionara el eje z del manipulador hasta la posición 2 de la trayectoria, el sensor ubicado en la herramienta deberá indicar al controlador la cercanía con el primer objeto, validada la ubicación la pinza, se accionan el paso a paso de la pinza y el del eje z para tomar la pieza, un sensor en la pinza indica el peso, para verificar que este no vaya a generar vacío en el sensor, validado la carga el controlador da la orden de levantar la primera pieza y llevarla hasta la posición de la segunda a ensamblar presionando hasta sentir el encaje de las piezas, comprobado el encaje, el manipulador va a posición de home.

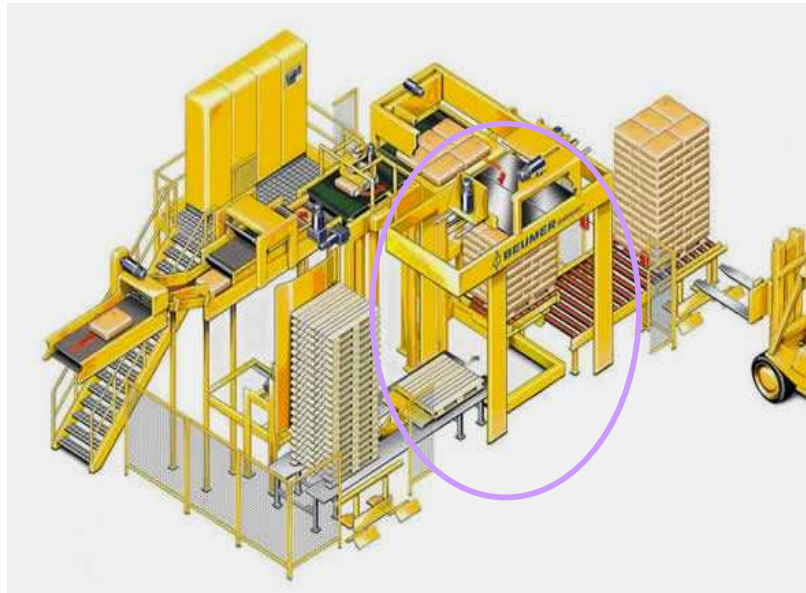
3.2.2. Apilamiento

Cerca de la zona de ensamble se dispondrá de un estante con 35 puestos y sensores ópticos de que revelen cuales puestos dentro del almacén están libres para ser utilizados, el estante se encontrara a cierta altura e inclinación (grados) el controlador tendrá almacenada en la memoria del programa de apilamiento las posiciones de cada uno de los puestos del almacén con una trayectoria a seguir a partir de la posición original de home, en la figura 8 un ejemplo de la función de apilamiento de paneles con cajas, que cumple un manipulador cartesiano antes de que sean llevadas por un montacargas.

El apilado se llevará a cabo tomando en cuenta:

- Puesto de almacenamiento definido
- Partir de home
- La pieza a apilar debe tener dimensiones acordes con el sitio de almacenamiento
- La trayectoria fijada debe estar contenida en un Subprograma del programa de apilamiento contenido en el PLC o la tarjeta del controlador.
- El programa solo inicia con la pieza sujeta en alguna posición válida.

Figura 8: Imagen paletizado y apilamiento



Fuente: [16]

El manipulador lleva la pieza hasta la posición de home, una vez allí confirma el puesto de almacenamiento, el puesto dará la trayectoria a seguir a partir del punto de home, incluyendo los ángulos o giros necesarios con la pinza para ubicar correctamente la pieza.

3.2.3. Producción

Las posiciones, tiempos, distancias, piezas o productos, con sus cantidades serán almacenadas en la memoria interna del controlador a modo de reporte para el posterior análisis de las consecuencias de incrementar o disminuir las variables designadas como críticas al principio del apartado, la optimización de estas variables y sus efectos en los tiempos y tasas de producción serán motivos de análisis por parte de los ingenieros de Producción de la Universidad EAN como parte de su

formación nuclear en diseño y mejoramiento sistema productivos y procesos automatizados.

La automatización con su consecuente relación con la mecánica, la electrónica y la computación y otras áreas, no es útil si los resultados generados no contribuyen a la resolución de un problema específico, o la satisfacción de una necesidad; en Producción esto implica que cada uno de los procesos en los que se intervenga con automatización, deben estudiarse los efectos que trae la implementación sobre la balanza oferta/demanda o sobre el direccionamiento estratégico de la empresa. El uso de tecnologías de avanzadas de producción nunca debe reducir o justificar cortes de personal o cosas parecidas, la implementación de estas tecnologías o sistemas debe venir acompañada de un Plan de re-capacitación o transferencia de personal o conocimientos a áreas donde se necesita del apoyo humano para conseguir mejores resultados para la empresa.

Frente a esto puede decirse que muchas empresas están centrando sus esfuerzos en áreas como el mercadeo, la investigación, la logística, y la venta de esa forma una vez la parte productiva evoluciona y dejar de ser ventaja comparativa, el recursos humano al cual se le debe haber mejorado su calidad de vida debe pasar a áreas de mayor contribución o preocupación para la empresa.

Otro punto que debe tenerse presente al momento de implementar una solución de automatización, es que está puede generar sobreofertas que de no ser absorbida por algún mercado puede terminar con una empresa, pues las inversiones en este tipo de tecnología suelen ser costosas y a largo plazo. De ahí que para justificar una solución de automatización realice una medición del las condiciones actuales de producción de acuerdo a ciclos y capacidad de producción, para determinar si en contraste con los cambios a obtener es viable y pertinente implementar la solución.

El análisis debe incluir las proyecciones de las nuevas capacidades o ciclos de producción según las mejoras en tiempos, recursos o materiales, la nueva carga de recursos humanos, físicos y de materias prima o investigación que se consumirán y sobre todo el plan de reubicación o reentrenamiento del personal saliente de las áreas en las que haya reducciones considerables de personal.

Es importante decir igualmente que al momento del análisis de ciclos de tiempos, el conocimiento de la estructura del proceso, sus variables de control (peso, temperatura, presión, velocidad) al igual que el conocimiento de los atributos de los productos generados por ese proceso, serán determinantes para un buen análisis y por lo tanto una buena decisión frente a la solución de automatización.

3.2.3.1. Metodología en el Aula

En ejercicios prácticos de diseño de sistemas de producción o simulación de soluciones de automatización, el manipulador cartesiano será evaluado por los estudiantes como un elemento más de la celda que apoya el movimiento de material dentro de la celda, por tanto a él estarán asociados cálculos de tiempos, de transportes y esperas por mantenimiento que afectarán en mayor o menor medida los tiempos de ciclo de la producción o la capacidad real de producción de una planta, con sus consecuencias en materia costo de oportunidad, manejo de inventarios, calidad de los productos, eficiencia en el uso de materias primas.

3.2.3.2. Integración con otras áreas

Con la creación de la celda y en particular el diseño del manipulador se pretende lograr en primera instancia una integración con la carrera de ingeniería de Sistemas como actor estratégico en el fortalecimiento de:

- La simulación de esfuerzos y cargas en materiales a través de redes neuronales o algoritmos de lógica de difusa que permitan hacer una elección más acertada del tipo de material del que deban estar fabricados algunos de los componentes más importantes del manipulador.
- Mejoramiento de la lógica de funcionamiento del manipulador en su control programable, implantando funciones de control avanzado en las que se puedan utilizar todo tipo de esquemas lógicos que controlen una mayor cantidad de variables.
- Procesamiento avanzado de todo tipo de señales aumentando al máximo la percepción sensorial del entorno productivo del manipulador y la celda.
- Implementar nuevas tecnologías de transmisión de datos, de modo tal que la respuesta del manipulador sea en tiempo real.
- Implementar tecnologías de control remoto a través de Ethernet
- Prácticas en programación con robots manipuladores,
- Diseño de controladores específicos para tareas específicas.

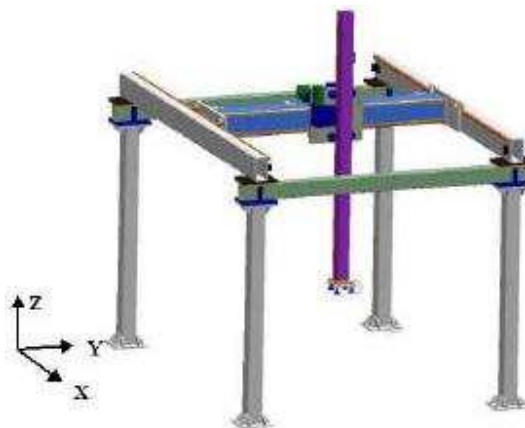
4. DISEÑO MECÁNICO

En este apartado se tratarán los criterios de selección de algunas de las principales piezas o sistemas mecánicos aplicables al desarrollo del manipulador, al igual que las características generales de la estructura mecánica de este.

4.1. GENERALIDADES DEL DISEÑO MECÁNICO DEL MANIPULADOR CARTESIANO

Se considerarán adicionalmente aspectos claves como la dimensión de la mesa de trabajo, la configuración escogida para el manipulador, las cargas y velocidades a manejar. Se plantea establecer un sistema de rieles con correas dentadas para la transmisión de potencia del manipulador, los rieles al igual que gran parte de la estructura del manipulador estarán hechos en Aluminio o en un polímero de bajo costo que satisfaga la exigencias de soporte de cargas, resistencia a la tracción, al desgaste, a sobrecargas eléctricas por corto circuitos que requiere el esqueleto o armazón del manipulador.

Figura 9: Esquema mecánico manipulador



Fuente: [9]

Configuración: En cuanto a la configuración física del manipulador se propone que la estructura sea en forma de mesa basada en la superposición de los vínculos, las 3 articulaciones prismáticas de los ejes principales más las dos articulaciones rotacionales que darán movimiento a la herramienta.

4.1.1. Vínculos o eslabones

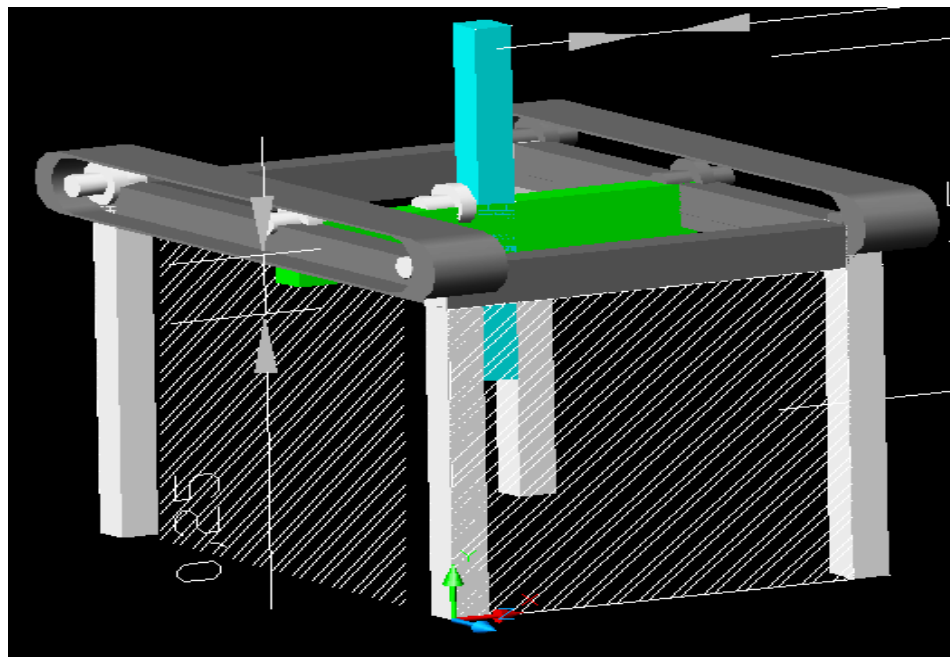
El manipulador tendrá tres vínculos principales de una longitud aproximada al área de trabajo deseada 1.6mts para el eje principal (x), 1.25mts para el eje secundario (y), el último eje (z) tendrá una longitud de 1.25mts, el diagrama finalizaría con actuador final intercambiable entre una pinza mecánica y una copa de succión a través de un portaherramientas acoplado al último vínculo. Los vínculos se guiarán por rieles cilíndricos para los ejes x, y, z, sin embargo se propone estudiar la posibilidad de cambiar para el eje z algún otro tipo de estructura que resulte más ventajosa a la hora de manejar las cargas. Los rieles cilíndricos como sistema de conducción son elegidos por la facilidad que ofrecen a nivel mecánico en el cubrimiento de distancias medias, facilidad de montaje, tanto la fricción como la rigidez son bajas, no necesitan mayor lubricación, fácil mantenimiento y bajos costos.

4.1.2. Articulaciones

El manipulador dispondrá de 3 articulaciones correspondientes a los ejes x, y, z, las cuales serán del tipo prismáticas (tipo L), más otras dos articulaciones en el elemento final que darán vida a la pinza. Los dos primeros ejes estarían superpuestos, uno de estos ejes (interno) llevará el carro sobre el cual se desplazara el último vínculo y la herramienta final. Los vínculos estarán acoplados entre sí por medio de tornillos a los ejes. Se desplazarán por medio de pequeños carros sobre los cuales correrá siguiente vínculo.

Espacio de trabajo: Como se menciona antes el volumen de trabajo del manipulador lo determina la configuración del robot, que para los manipuladores cartesianos generalmente esta dado por la relación entre el alto, el ancho y el largo de los vínculos o eslabones del manipulador, para el caso particular sería de 1,7 m de largo x 1,2m de ancho x 1,2m, las reducciones de espacio se hacen en base a que hay finales de carrera en cada vínculo.

Figura 10: Espacio de trabajo del manipulador



Fuente: Propia

Los diferentes actuadores al igual que los elementos de control también reducen en cierto porcentaje el área útil o el volumen de trabajo. Es preciso también tener en cuenta que unas pequeñas zonas son agregadas al volumen de trabajo gracias a los dos grados de libertad que posee el manipulador para el movimiento de la herramienta final.

4.1.3. Selección de Materiales

Uno de los primeros aspectos a abordar en el diseño serán los materiales, de este, la principal preocupación es la estructura superficial o esqueleto del manipulador, pues será la que soportará todo el resto del equipo y el manipulador en sí, este hecho demarca como características fundamentales que la estructura sea fuerte, resistente, medianamente ligera, resistente a impactos, que no presente mayores riesgos ante la presencia de los voltajes manejados en el sistema entre otros. De los diferentes tipos de materiales: cerámicos, metales, plásticos, compuestos, se podría considerar que los más indicados son los metales aislantes o no conductores, y livianos o plásticos resistentes a los impactos, no conductores, y que resisten cargas y altas temperaturas.

Manipuladores robóticos como los de tipo SCARA con los que cuentan la Universidad Nacional y la Javeriana también están hechos en estos materiales, Sin embargo en instituciones como el Sena y algunos institutos técnicos, las estructuras de estos manipuladores están hechos en acrílico. El siguiente cuadro muestra las características de algunos de los materiales antes mencionados.

Tabla 2: Propiedades Mecánicas de Materiales

Material	% Densidad	Conformación	Conductividad térmica	Conductividad eléctrica	Resistencia impacto
Acero carbono	210	Media	Media	Media	140
Acero al titanio	300	Alta	Baja	Media	150
Acero al cromo	250	Alta	Media	Media	126
Aluminio aleado	150	Baja	Alta	Alta	115
Acrílicos	70	Baja	Media	Baja	90

Fuente: propia

Como se puede apreciar en la tabla estos materiales poseen propiedades mecánicas muy similares, lo que lleva a asumir que la decisión de uso estará en las facilidades para conseguirlo, repararlo o comprarlo.

En ese orden de idea el material a elegir para la estructura podría ser el Aluminio aleado, que a pesar de su alta conductividad, permite la conformación de perfiles simples o complejos sin mayor dificultad, de costo asequible y con las propiedades de conductividad térmica y eléctrica acordes con las que se manejarán en la estructura del manipulador.

Material de las piezas a manipular: Normalmente las celdas de manufactura están integradas a máquinas de control numérico como tornos, fresadoras y taladros en los que se pueden mecanizar piezas de variadas y complejas formas en Aluminio o aceros de bajo contenido en carbono entre otros materiales, las piezas mecanizadas en estas máquinas tienen dimensiones aproximadas de hasta 1m, al terminar el proceso están a temperaturas medias por lo que para su manipulación es preciso esperar un tiempo pero fuera de la máquina.

4.2. ESQUEMA DE ACCIONAMIENTO

De acuerdo con la configuración física establecida para el manipulador, el posible sistema de accionamiento, al igual que aspectos como las cargas a manejar, las velocidades entre otros requerimientos para el desarrollo del diseño mecánico del manipulador y luego de definir e identificar algunas de las características principales del manipulador incluido el material base, se precisa definir la estructura básica de accionamiento del manipulador: ubicación actuadores, sistemas de reducción/transmisión, mediante el reconocimiento de los diferentes componentes mecánicos o criterios técnicos que ayudan a materializar o cumplir esos requerimientos.

Ubicación de los actuadores: Considerando que el lazo de control del manipulador será cerrado es recomendable que los accionamientos de los diferentes eslabones del manipulador no estén sobre las articulaciones sino al lado de éstas. Al ubicar los accionamientos al lado de las articulaciones se puede controlar indirectamente la precisión y velocidad del manipulador a través del sistema reducción y transmisión. La inercia que debe vencer el sistema para iniciar el movimiento de cualquier de sus vínculos es menor si el peso de los demás elementos del sistema no están sobre los vínculos.

Función de ajuste: Como elemento de ajuste para la estructura general del manipulador o esqueleto (12 perfiles) se utilizarían remaches o tornillos para asegurar los perfiles de la estructura, el tipo de tornillo estará dado en general por el espesor de los perfiles de aluminio que se utilicen para la estructura del manipulador, de ser posible han de utilizarse remaches en lugar de tornillos para sujetar la estructura.

Asumiendo que el espesor de los perfiles no será mayor a 20mm y que el peso total de la estructura no debe ser mayor a 50kg, los tornillos que podrían utilizar serían los clase SAE 4.6 cabeza hexagonal de 2.5' pulgadas. [14]

4.3. TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Para la transmisión de potencia del manipulador analizadas las ventajas y características de los principales elementos de transmisión como bandas, correas, cadenas, tornillos de potencia, engranes, etc. se propone utilizar correas dentadas que mediante poleas de eje fijo accionen los ejes x e y. En esta elección se toma en cuenta que las correas dentadas ofrecen una eficiencia general aproximada de 97% a distancias medias con cargas medias o pequeñas como las manejadas por el manipulador (longitud 80cm, peso carga 50 a 150gr), no tiene mayores costos de

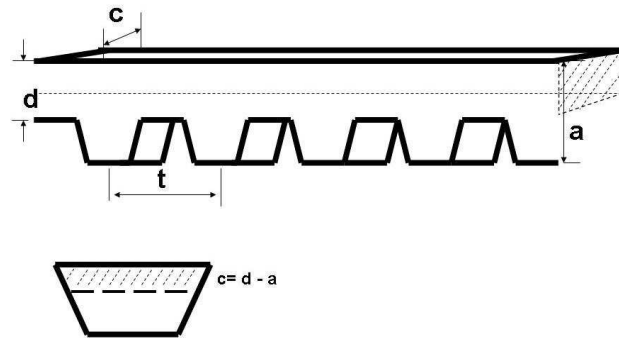
mantenimiento o lubricación, tiene riesgos bajos de deslizarse o zafarse aún en condiciones de máximo esfuerzo.

Adicionalmente, el principio de engranaje de aplicable a las correas dentadas permite que el control del movimiento sea mucho más preciso que si utilizáramos bandas u otro elemento flexible. Los engranajes limitan la distancia entre ejes. Para el eje z se recomienda en el futuro la utilización de un mecanismo diferente como tornillos de potencia o engranes sin fin corona. Lo anterior considerando que sobre este eje recae parte considerable de las cargas generadas en la manipulación de la herramienta, cargas que pueden llegar a hacer algo pesadas, sin dejar de lado que en caso de emergencia el sistema debe estar lo suficientemente liviano como para auto bloquearse para evitar daños o pérdidas del producto, accidentes en las personas presentes en el área de trabajo e incluso contra su propia estructura. [15]

4.3.1. Selección de la correa

El área transversal de la correa será quien posteriormente determine las condiciones de la transmisión, la resistencia a cargas entre otras propiedades importantes. Las correas dentadas normalmente están hechas en polímeros de alta densidad o cables de acero capaces de absorber grandes cantidades de energía. Al momento de detener o accionar un vínculo el material al igual que la longitud transversal de la correa serán determinantes. En la siguiente figura parámetros para el calculo de la sección transversal de una banda V.

Figura 11: parámetros calculo sección transversal



Fuente: [13]

Para el cálculo de la sección transversal de la correa también deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros:

- Potencia requerida en la máquina conducida (HP)
- Velocidad de la máquina motora (rpm)
- Velocidad de la máquina conducida (rpm)
- Distancia tentativa entre ejes

De los anteriores valores se estima en 1cm/sg la velocidad de salida del manipulador para tener una buena precisión, con esta velocidad se obtiene la velocidad de entrada a través de la eficiencia de la transmisión por correa dentada (97%), 1.03cm/sg.

Un parámetro adicional a los ya mencionados que se deben tener presentes antes de determinar el área transversal de la correa dentada es el factor de servicio, este término hace referencia al tiempo y las condiciones de cargas sobre la cuales trabajará la correa, para esta aplicación en particular el factor de servicio podría considerarse como extra ligero ya que el tiempo de utilización de la correa y las cargas manejadas son bajos.

Revisando la tabla de servicios se encuentra que el servicio extra ligero (XL) tiene un paso de 1/5' es decir 0.508mm, considerado los datos obtenidos, y el paso dado por el factor servicio la correa sería una tipo C con una sección transversal de 1/8', que hecha en poliamida soportaría una tensión de 60lb/pulg. o 885Nm lo cual desarrollaría un torque de 238,75 Nm

Ahora considerando las velocidades anteriormente fijadas, y el torque, las condiciones de funcionamiento y la grafica anterior, asumiendo que el motor del manipulador estaría cercano al de un limpia brisa tendríamos que la potencia del motor seria igual a:

$$HP (\tau * \omega) = 238,75 \text{ Nm} * 0.39 \text{ rad/seg.}$$

$$HP = 0.1274 \text{ HP o } 95.04 \text{ watt}$$

Donde ω es la velocidad angular en rad/seg. (1 vuelta = 360π rad)

Donde τ es el torque o la fuerza desarrollada por el motor ($F \times d$)

Para un tipo de correa C, con un ancho de paso entre 1/2 y 3/8, un espesor de 11/32, debe considerarse el diámetro de las poleas de 3.0cm, esto produciría una velocidad de salida entre 60 a 100 rev/seg., dependiendo de los elementos de sujeción que adicionalmente tenga la correa y las carga manejadas.

4.3.2. Torque

Uno de los factores clave que determinara el tamaño y tipo de las poleas, rodamientos y potencia del motor a utilizar para el movimiento del manipulador es el torque del sistema de engranaje, para este cálculo deberá tenerse presente el peso total o aproximado de la estructura, que será la fuerza radial ejercida por los elementos del sistema de engranes sobre los ejes de los rieles, dado que los ejes

tienen diferentes longitudes y soportan diferentes cargas, el torque y por lo tanto el motor para cada uno de los accionamientos de los ejes será diferentes, siendo el mayor de ellos el ubicado en el eje x, ya que este desplazará lo demás ejes. Por condiciones de diseño calculamos el torque para el eje z, con una carga promedio de 75gr a una longitud 1.00cm en 195 Nm, y una potencia de 1/5 hp, los motores de los ejes x, y soportarían respectivamente un 65 y 35% más de peso adicional por tanto la potencia de los motores al igual que el torque desarrollado serian mayores a los del eje z en esas proporciones.

4.3.3. Sistema de Poleas

Las poleas dentadas del sistema de transmisión por correas a través de las ranuras de los dientes proporcionan una mayor resistencia y eficiencia, igualmente permiten poder eliminar componentes de fuerzas residuales entre los engranes y el paso de la correa, haciendo aun más preciso el movimiento. Las ranuras en su manufactura vienen con ángulos un poco elevados, que en el caso particular evitan cumplir eficientemente cumplir las funciones antes mencionadas por lo que será necesario reducir al momento de fabricarla o comprarla, es necesario rectificar el ángulo que generalmente es de 29° alrededor de 10° o 15° , este cambio no ofrece mayores problemas, pues entre más pequeños son los ángulos más fáciles son de manufacturar las ranuras tanto de las poleas como de las correas.

Los aspectos antes mencionados en el sistema de transmisión de potencia se ven identificados y relacionados en el concepto de torque, que es la fuerza que puede ser transmitida soportando una carga de acuerdo al paso y al diámetro de las correas, más una pequeña reducción de la fricción generada por el rozamiento entre la correa y la polea, este valor conocido como coeficiente de rozamiento estará asociado a los materiales que componen la polea y la correa. Los plásticos en general tienen coeficientes de fricción bajo, sin dejar de lado que el efecto de

engranaje de la correa dentada reduce aún más la fricción generada en el mecanismo.

El concepto de fricción lleva a recordar que el manipulador debe considerar la lubricación y mantenimiento de las piezas utilizadas como un componente importante en el proceso de selección de los elementos de transmisión.

Tabla 3: Tamaños estándar de poleas

Tamaño estándar de la polea motriz, D_1	Tamaño aproximado de la polea conducida ($1.72 D_1$)	Polea estándar más cercana, D_2	Velocidad real de salida (rpm)
13.10	22.5	21.1	720
12.4	21.3	21.1	682
11.7	20.1	21.1	643
10.8	18.6	21.1	594
10.2	17.5	15.9	744
9.65	16.6	15.9	704
9.15	15.7	15.9	668
8.9	15.3	14.9	693

Fuente: [13]

4.3.3.1. Numero de Dientes y Tamaño de las poleas

Una vez determinado el ancho de la sección transversal de la correa dentada, el paso es preciso definir en qué material estará hecha la correa y las poleas, igualmente es importante establecer el número de dientes que llevarán las poleas dentadas, para el efecto de lograr una buena precisión en el posicionamiento del manipulador tanto la poliamida como los cables de acero sirven a este firme propósito, con la salvedad que los cables de acero son un poco más costosos de reponer que las correas en poliamida y estos pueden experimentar pequeñas fallas por la temperaturas generadas en el rozamiento del sistema polea-correa. De ahí que se sugiera la compra o elaboración de la correa en poliamida.

El número de dientes de la polea dentada esta en cierta forma condicionado a la potencia de los motores. En este sentido la velocidad y la precisión son inversamente proporcionales al numero de dientes de la polea, para altas velocidades y poca preciso se pueden establecer el menor número posible de dientes asociados al ancho de la sección transversal de la correa, para medias o bajas velocidades y mayor precisión, que es lo ideal, lo más recomendable es que el numero de dientes sea alto.

4.3.4. Eficiencia del sistema

Con este tipo de elementos la transmisión sobre ejes paralelos es más silenciosa, no presenta inconvenientes de rotura de la correa, ya que la correa se fabrica como una única pieza sin juntas ni uniones.

Como desventaja del sistema de transmisión por correa pueden existir pequeñas pérdidas de velocidad al momento encender la máquina, pues la correa tiende a zafarse por la inercia. Para evitar esto es necesario mantener las correas tensadas a través de rodillos tensores, que ejercen la presión necesaria para mantener las correas tensas.

4.3.5. Selección rodamientos ubicados en las guías X, Y

El desplazamiento sobre los rieles sobre los ejes del manipulador normalmente genera cargas que desgastan con mayor facilidad los elementos rodantes con el fin de minimizar este desgaste se utilizan rodamientos. Algunos de los tipos de rodamientos y sus capacidades de cargas se especifican a continuación

Tabla 4: Capacidades Rodamiento

Tipo Rodamiento	Capacidad Carga Radial	Capacidad Carga Empuje
Bola de hilera única	Buena	Aceptable
Bola de hilera doble	Excelente	Buena
Contacto angular	Buena	Excelente
Cilíndrico	Excelente	Pobre
Aguja	Excelente	Pobre

Fuente: Propia

La mayor parte de estos rodamientos resulta costoso por el material en que vienen hechos aunque realmente reducen considerablemente la fricción y el desgaste, Por su facilidad de mantenimiento, reposición, costos y frecuencia de uso, se considera una buena opción los rodamientos de bolas, pero considerando los costos se propone que los ejes sean cilíndricos de esta manera se evita el desgaste por fricción aunque sea necesaria la lubricación constante del mismo.

4.3.6. Selección de la potencia del motor

En cuanto a la funcionalidad se refiere uno de los factores más importantes a considerar es la potencia de los motores que moverán cada una de las articulaciones del manipulador, al momento de hacer esta elección es importante tener en cuenta algunos aspectos, entre ellos: las reducciones de velocidad a causa del peso de la estructura y las piezas a manipular, la cantidad de energía suficiente para iniciar o detener el movimiento, frente a este aspecto recordamos lo mencionado en apartados anteriores sobre el hecho que el motor e mayor potencia (1/2hp) estará ubicado sobre el eje x del manipulador el motor de 1/5 sobre el eje y, el motor de menor velocidad (1/8hp) lo tendrá el eje z, adicionalmente recordamos que para la herramienta final del manipulador donde se tienen ubicadas las dos articulaciones que activan la herramienta se aconseja asignar motores de potencia menor a 1/8hp con el fin de que hay una mejor precisión en el posicionamiento de la herramienta.

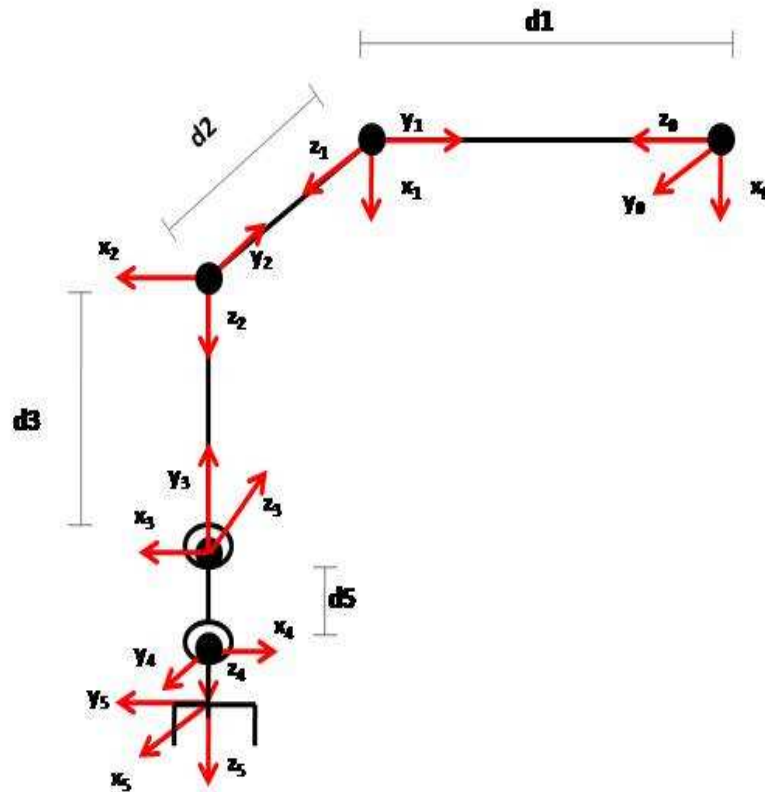
4.4. MODELO MATEMÁTICO

Dado que el movimiento del manipulador debe ser controlado para así obtener la precisión que caracteriza este tipo de herramientas se presenta a continuación el modelo cinemático del manipulador, el modelo por lo tanto será una representación en 2D de la configuración física del manipulador cartesiano. El algoritmo Denavit – Hartemnnberg a través sus parámetros (θ , d , a α) que hacen referencia a la longitud de los eslabones, las distancias y ángulos entre los eslabones, permitirá abstraer de la configuración cartesiana propuesta para el manipulador las variables que describen el movimiento físico de los eslabones que componen el manipulador para luego considerar factores como la velocidad, la fuerza entre otros elementos claves en la funcionalidad del manipulador.

4.4.1. Modelo cinemático

La cinemática revela el esquema estático del movimiento del manipulador, es decir permite un primer acercamiento al modelamiento sin considerar tiempos, ni velocidades, ni fuerzas, el primer paso para completar el modelo consiste en desarrollar el diagrama de vínculos y eslabones.

Figura 12: Diagrama de vínculos manipulador cartesiano



Fuente: Propia

Del diagrama desarrollado teniendo en cuenta el algoritmo para el nombramiento o selección de vínculos y eslabones, se obtienen los parámetros D-H, que en teoría permiten representar a partir de longitudes y ángulos el movimiento de los diferentes vínculos del manipulador. Con ellos a partir de transformaciones u operaciones de transposición de matrices se modela el movimiento estático del manipulador en una sola matriz, en la figura 13, la matriz de parámetros D-H para el manipulador cartesiano y la matriz final de movimiento del manipulador.

Figura 13: Parámetros D-H, Matriz movimiento

	θ	d	a	α	home
1	0	q_1	0	270°	d_1
2	270°	q_2	0	270°	d_2
3	0	q_3	0	270°	d_3
4	q_4	0	0	270°	180°
5	q_5	d_5	0	0	90°

$0 \cdot \cos \theta$	$270^\circ \cdot \sin \theta$	$0 \cdot 0$	$q_1 \cdot 0$
$q_1 \cdot \sin \theta$	$q_2 \cdot \cos \theta$	$q_3 \cdot 0$	$0 \cdot 0$
$0 \cdot 0$	$0 \cdot 0$	$0 \cdot 1$	$0 \cdot 0$
$270^\circ \cdot 0$	$270^\circ \cdot 0$	$270^\circ \cdot 0$	$270^\circ \cdot 1$

4.4.2. Simulación del modelo cinemático

Una vez definido el modelo cinemático del manipulador cartesiano a través del algoritmo Denavit-Hartenberg se presenta a continuación la simulación del modelo en MATLAB por medio del modulo RobotTools.

La simulación consistió en definir una referencia del plano base sobre la cual se realizarían los movimientos de las articulaciones, luego se ingresaron los valores obtenidos del desarrollo de los ejes del manipulador, para finalmente definir las matrices de movimientos. Para ello se instaló la librería robots al programa de Matlab, se creó un nuevo proyecto de simulación estática de vínculos en base a parámetros D-H, se ajustó la altura a la cual se hallaría el manipulador antes de iniciar el movimiento.

A continuación los parámetros dados

Figura 14: Simulación modelo cinemático

```
>> L{1}=link([ 3*pi/2 0 0 10 1]);
>> L{2}=link([ 3*pi/2 0 3*pi/2 10 1]);
>> L{3}=link([ 3*pi/2 0 0 10 1]);
>> L{4}=link([ 3*pi/2 0 pi 0 0]);
>> L{5}=link([ 0 0 pi/2 2 0]);
>> MR2=Robot(L)
MR2 =
noname (5 axis, PPPRR)
```

Fuente: tutor

Creación de los 5 links del manipulador y la definición de las articulaciones como tres prismáticas y 2 rotacionales, con los parámetros característicos de un manipulador cartesiano para su matriz D-H.

Valores asignados por matlab a las articulaciones según los parámetros fijados, número reales son las distancias de los vínculos en relación a la base fijada.

Figura 15: Matriz parámetros D-H

alpha	A	theta	D	R/P	
4.712389	0.000000	0.000000	10.000000	P	(std)
4.712389	0.000000	4.712389	10.000000	P	(std)
4.712389	0.000000	0.000000	10.000000	P	(std)
4.712389	0.000000	3.141593	0.000000	R	(std)
0.000000	0.000000	1.570796	2.000000	R	(std)

Fuente: Tutor

Secuencia de asignación de base del robot y posiciones de home

Figura 16: Asignación de bases y home en matlab

```
>> seqplotRob(jt2,MR2,.2)
>> jt2 = jtraj([5 -5 5 pi pi/2], [20 -35 25 3*pi/2 pi], [0:0.056:10]);
>> seqplotRob(jt2,MR2,.2)
>> seqplotRob(jt2,MR2,.2)
>> MR2.base=[0 -1 0 15;0 0 1 15; -1 0 0 15;0 0 0 1]
```

Fuente: Tutor

Elevación de la base del robot a 15 unidades por encima de la base

ans =

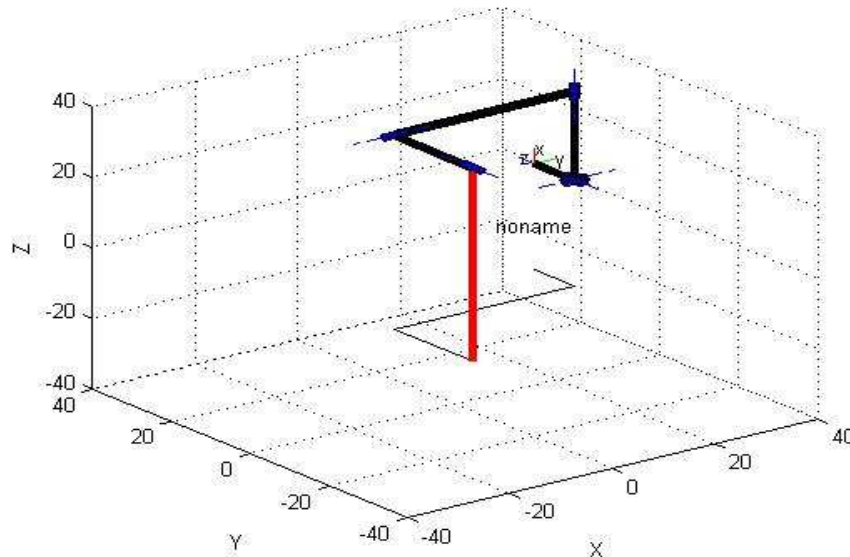
0	-1	0	15
0	0	1	15
-1	0	0	15
0	0	0	1

Revisión de la matriz resultante del cambio de la elevación

```
>> seqplotRob(jt2,MR2,.2)
```

Función generada por el tutor de la tesis para ajustar los valores iniciales de las juntas del robot definidas según los parámetros D-H fijados como base para la simulación del movimiento de los vínculos del modelo.

Figura 17: Simulación del modelo matemático en Matlab



Fuente: Tutor

En la grafica de simulación del modelo cinemático del manipulador se puede apreciar que los parámetros desarrollados a partir del algoritmo Denavit-Hartenberg para el manipulador cartesiano eran los correctos ya que las posiciones de home resultantes de la simulación ($q_4=3\pi/2$), ($q_5=\pi$) coincidieron con las desarrolladas en el modelo.

Desde el punto de vista de la simulación fue necesario elevar el manipulador del "suelo" para poder observar el movimiento completo de los vínculos, aparentemente los dos últimos vínculos, los más cercanos a la herramienta final no quedaron bien diseñados, este efecto podría deberse a que en el espacio cartesiano resulta difícil para el software simular dos vínculos superpuesto o si la distancia entre los vínculos es muy pequeña, al aumentar la distancia entre los dos links, el movimiento conjunto de los dos últimos ejes que generan la precisión del movimiento de la herramienta es más visible, lo que llevaría a considerar el tamaño de ese último vinculo en el manipulador, aunque al aumentar la distancia entre estos vínculos el movimiento de la pinza ya no sería tan preciso ni articulado.

El diseño del modelo dinámico del manipulador se excluye de la propuesta por lo que requiere tener definidos ciertos componentes, elementos o parámetros que solo son posibles obtenerlos al implementar y reajustar la propuesta.

5. DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL

Por sencillez, alcance y costos se definirá en la propuesta un sistema de control de lazo abierto, sin embargo se sugiere que al momento de la construcción del manipulador se evalúe la posibilidad de adicionar elementos de control retroalimentado para hacer más fácil la integración del manipulador con el sistema de control general de la celda.

El sistema de control entonces contemplaría inicialmente la recepción de las señales de los sensores de final de carrera ubicados a lo largo de los ejes, al igual que los sensores de posición y peso ubicados en la herramienta final.

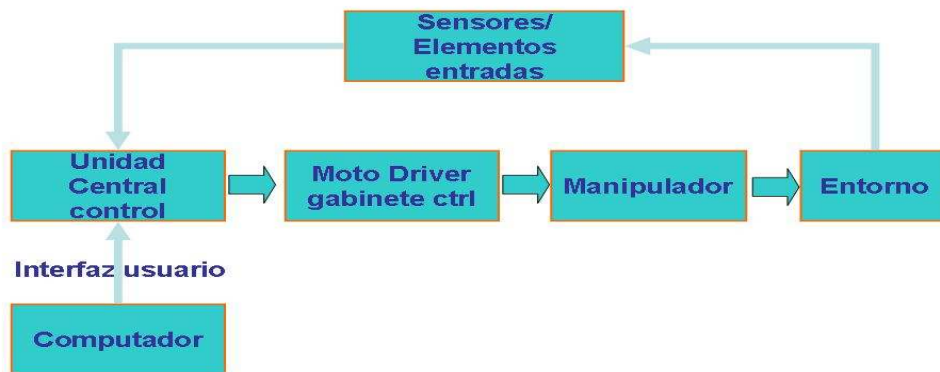
La recolección de las señales se haría a través de un puerto RS 232/USB, con el fin de acelerar un poco la velocidad de transmisión de los datos, pues vía puerto paralelo resulta sencillo pero obsoleto, estas señales serían enviadas a la unidad de control central del manipulador la cual se encargaría de verificar a través de los sensores de avance a la posición final del manipulador fijada, en caso de no alcanzar la posición o no ubicar el punto en el área de trabajo, la unidad de control regresará el manipulador a home para ser referenciado y se les entreguen nuevos valores.

Considerando que las señales de entrada deben ser interpretadas de formas diferentes y deben generar señales de salida acordes se propone el uso de módulos para el control propiamente dicho y de potencia (control de motores) del manipulador.

La unidad de control dispondrá de una memoria no volátil programable a través de la cual se pueden generar trayectorias, o referencias que permitan ubicar el manipulador o la herramienta.

El control total del manipulador estaría a cargo de una interfaz gráfica sencilla elaborada en algún lenguaje de programa sencillo, que muestre la posición actual del manipulador, y pida las variables necesarias para generar el movimiento de los actuadores a través de la conversión de los grados a pulsos con una tarjeta de control básica. No se tendrá control teach pendant. [8]

Figura 18: Diagrama Bloque Sistema Control



Fuente: Propia

5.1. GENERALIDADES SISTEMA DE CONTROL

Dado que el sistema de control propuesto es de lazo abierto, para la retroalimentación de las señales a la unidad central de control se sugiere la utilización de sensores de proximidad ubicados en la parte final de cada uno de los ejes que permitan conocer la posición de cada una de las articulaciones prismáticas o rotacionales para poder corregir la posición, adicionalmente la pinza o la herramienta final tendrá dos motores paso a paso que agregan un cuarto y un quinto grado de libertad, controlados a través de la unidad central y el módulo de potencia, también se ubicarán sensores en algunas partes claves de la celda en especial de la

banda transportadora para conocer mejor la ubicación del manipulador en la celda, en una fase posterior del proyecto debe preverse la integración a través de Puerto serial y controladores de hardware y software para unificar el sistema de control de la celda de laboratorio.

Todas estas señales deben ir por puerto RSD 232/USB a una tarjeta que se encargará de acuerdo a los parámetros fijados de emitir las señales de salida o retroalimentación más adecuadas, finalmente la posición final de salida del manipulador será registrada para utilizar como entrada en un nuevo cálculo.

5.2. ACTUADORES

Como ya se ha mencionado el movimiento del sistema estará a cargo de motores paso a paso, estos se seleccionan principalmente por su bajo costo, mantenimiento, facilidad y propiedades de control. Los actuadores estarán ubicados en cada una de las articulaciones del manipulador, la potencia en cada uno de los ejes o articulaciones será diferente considerando que las cargas a soportar no son iguales en todos los puntos.

Cada uno de los actuadores estará conectado al módulo de potencia de la unidad central de control, que será la encargada de tomar los ángulos o puntos de referencia y convertirlos en pulso que accionen los diferentes.

Los motores paso a paso son en esencia rotores con encoders incrementales que se encargan de convertir pulsos electromagnéticos en movimiento rotacional preciso a través de un conjunto de electroimanes que al recibir el pulso generan un campo magnético casi único y estandarizado, de modo tal que hayan pocas equivocaciones de ahí su fama de ser un excelente mecanismo de posicionamiento precisión, esto

sucede al activar el rotor que genera o convierte el movimiento lineal en rotacional y viceversa.

Mientras los servomotores se caracterizan por ser altamente dinámicos y ofrecer un control retroalimentado de baja inercia y grandes transmisiones los motores paso a paso son más preciso, con baja inercia pero a transmisiones medias, Para el control de estos mecanismo basta con conectar los polos que pueden ser 4 o 6 según si sea o no o bipolar, el motor no emite ninguna señal de salida sin embargo para el control del sistema se utilizaran los finales de carrera y sensores ubicados a mitad del eje que permitan conocer al controlador en que punto puede encontrarse el manipulador o el riel. Frente a la precisión de este tipo de motor se puede decir que son bastantes precisas gracias a que de hecho si se analiza la estructura del manipulador la potencia de los motores se hace más pequeña a medida que se avanza en el control.

5.3. SENSORES

Los sensores a utilizar se recomienda sean ópticos pues darán un margen de error un poco más amplio en la precisión del control, ya que cubren distancia más amplias (1cm a 5cm) con relación a las que pueden cubrir los sensores de proximidad (5 a 10mm). Para la herramienta en particular se prevé la implementación de sensores de presión que revelen el peso próximo de la carga a levantar

5.4. TARJETA CONTROLADORA

Para el primer momento considerado en el apartado anterior, el control individual del manipulador se prevé la utilización de una tarjeta controladora en la cual estén los controladores de los diferentes sensores utilizados en el sistema, al igual que los puentes de alimentación a los principales actuadores, igualmente la tarjeta permitirá

la supervisión a través del PC de la retroalimentación hecha en términos de aumento o disminución de los pasos entregados a cada uno de los motores según el movimiento realizado.

5.5. HERRAMIENTA FINAL

El elemento más importante de todo el sistema, es la herramienta final, esta será la encargada de cumplir con las funciones para la cual fue diseñado el manipulador para este caso en particular el funcionamiento de la herramienta se basa en un acople parecido al portaherramientas de un torno CNC, este sistema queda como elemento de diseño de detalle pues depende de algunos factores específicos de la construcción del manipulador y los sistemas auxiliares provisto para la celda, por el momento se dirá que se espera que el manipulador pueda contar con un acople como el mencionado para el cambio de herramienta entre una pinza electromagnética con una fuerza determinada por la fuente de alimentación eléctrica, y una ventosa que funciona por medio de aire comprimido, este diseño se deja para la fase de construcción debido a que la adaptación de los dos sistemas de accionamiento resulta compleja y fuera de alcance de los conocimientos del autor.

El control de la herramienta final como tal estaría integrado a la unidad central de control. Antes de iniciar cada tarea el sistema deberá comprobar que herramienta tiene acoplada, determinar si esta es acorde con la función a realizar o de lo contrario activar el programa de cambio de herramientas que permitirá al manipulador desacoplar la herramienta que tiene en el momento y tomar la adecuada, el sistema de acople de la herramienta debe permitir identificar si la herramienta, con su medio de accionamiento quedo bien acoplada, validada la herramienta se prosigue con la rutina del programa seleccionado.

Al momento del diseño deberán tenerse presente los sistemas de parada de emergencia convenientes a la combinación o adaptación de los dos sistemas de accionamiento de la herramienta final.

Fuerza: La fuerza del manipulador asociada al peso que puede levantar, está definida por el sistema de actuación elegido, que en la mayoría de los casos y para este en particular es eléctrico por las ventajas que en materia de precisión y repetitividad ofrece, sin dejar de lado permite que a futuro el sistema de control del manipulador se especialice más.

Alimentación: Este apartado representa una de los principales problema a resolver después de seleccionado el tipo de actuación del manipulador al igual que su sistema de control, y aun más si es eléctrico o por motores paso o servomotores, pues estos requieren de acuerdo a las funciones o necesidades, de una fuente de alimentación de corriente alterna (CA) para motores de reducción y motores paso a paso, o de corriente directa (CD) para servomotores y motores directos, igualmente debe considerar la (s) aplicación (es) del manipulador y el entorno en la cual va a trabajar. Aplicaciones como la soldadura, generalmente requieren de sistemas de alimentación portátiles, que permitan llevar el manipulador a lugares o situaciones espaciales.

Dado el carácter educativo del manipulador y el ambiente de operación del mismo que sería el laboratorio de Automatización de la Universidad al igual que las posibles aplicaciones de ensamble y carga de materiales la fuente de alimentación del manipulador sería la red eléctrica de 220V y XXX del laboratorio de la Universidad, con la posibilidad de complementar esta red con un amplificador y un rectificador de corrientes y/o voltaje, al igual que un convertor de corriente CA a CD y viceversa o un generador.

Cableado: En este punto se toma en consideración el hecho de que el sistema de actuación y el sistema de control del manipulador es eléctrico, al igual que la posible función de succión para sujetar objetos que vendría dada por un sistema de aire comprimido y su consecuente red de distribución por tuberías o mangueras.

Se necesitaría entonces del cableado básico para las conexiones eléctricas del sistema de actuación y control de manipulador y la red de distribución de aire comprimido para la herramienta del manipulador.

El tipo de cableado a utilizar para este tipo de aplicaciones esta normalizado según los voltajes y/o corrientes a utilizar en la transmisión, conversión o transporte de energía a cada uno de los mecanismos o elementos del manipulador.

6. DISEÑO INFORMÁTICO

Dentro de este apartado se distinguen dos momentos claros, el primero de ellos contemplan un software que permita el control por medio de un PC de los diferentes módulos que componen el manipulador. Este control implica poder regular las variables presentes en cada modulo así:

El módulo de control de potencia o motores debe permitir frenar o acelerar los motores en ciertos momentos, aunque por el diseño del manipulador y por condiciones de seguridad se aconseja que este control sea más del tipo mecánico que electrónico o computacional, sin que esto signifique que no se establezcan desde el software medidas de interrupción o anulación digital o electromagnética para activar el sistema de parada o emergencia del manipulador que corte el suministro de energía a los motores.

Un modulo entrada y salidas de señales a través del cual se recogen las señales enviadas por los actuadores y los diferentes sensores del manipulador. Un modulo de control programable desde el cual se evalúen las entradas y se generen las señales corregidas de vuelta. Un segundo momento contempla que para la adecuada integración del manipulador con la celda de manufactura y su uso regular en la misma se necesitará de un software que haga la conexión entre el PLC o la tarjeta controladora que se esté utilizando para el control y el PID que tenga la celda.

Para esta conexión consideramos varios factores entre ellos:

- Medio de control
- Lenguaje de Programación utilizado para la definición de trayectorias
- Trayectorias o programas creados
- Re-modelación de las variables de entorno del manipulador en el PLC o Tarjeta

6.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN

La simulación siempre ha sido una buena herramienta para comprobar supuestos o validar conocimientos de forma económica, referente al manipulador con el fin de evitar posibles pérdidas en materiales, calidad o daños a la persona encargada del proceso, al momento de utilizar el manipulador se hará una pequeña simulación del movimiento del manipulador, la cual permita reconocer si los parámetros asignados a los eslabones están dentro de los rangos del espacio de trabajo o de fuerza y precisión del manipulador, de forma tal que en caso de que los parámetros estén fuera de los rangos establecidos de control el sistema informe el riesgo de la ejecución de la secuencia. Si por el contrario los parámetros son normales preguntar si se desea ejecutar la secuencia propuesta.

El desarrollo de este sistema sin duda requerirá de las habilidades avanzadas de especialistas en la modelación y programación de software como las de los profesionales en ingeniería de sistemas de la Universidad EAN.

Adicionalmente se espera que el software de control desarrollado, estructuralmente este basado en código assambler que en un futuro no represente mayores problemas de compatibilidad con el lenguaje utilizado para el control total de la celda de manufactura.

El software igualmente debe poder presentar una interfaz dinámica, amigable al usuario final del manipulador, pues considerando que la herramienta es de tipo educativo una interfaz de entrada poco cargada, con colores suaves e imágenes representativas de las funciones o variables a controlar del lenguaje cotidianos de los estudiantes puede ser de gran ayuda.

Funcionalmente hablando el software pedirá para el movimiento del manipulador las distancias a desplazar en cada eje, al igual que los ángulos de posición de la herramienta final, en este sentido el software de simulación antes descrito, adjunto al software será de gran ayuda.

Una vez obtenidos los datos el software se comunicara con la tarjeta controladora, quien a su vez identificará a cual de los actuadores va dirigida la señal, transformando luego esta señal por medio de un convertidor en un pulso equivalente, que será enviados vía puerto RS 232/USB a los actuadores o a los motores correspondientes.

Inmediatamente los motores o actuadores sean accionados los sensores de final de carrera y de ubicación situados a lo largo de los vinculos del manipulador indicaran si el sistema quedo en una posición valida o debe ser vuelto a home para ser referenciados a ceros. Este mismo sistema que en ningún momento es de retroalimentación es el que utilizaran todas las señales que lleguen al software de control del manipulador.

En una primera fase de implementación por costos y sencillez se recomienda la configuración de control antes descrita sin embargo en un futuro por la necesidad de integrar el manipulador a la celda será necesario fortalecer el lazo de control del manipulador adaptándolo a un lazo cerrado esto entre otras cosas implicará que la red de transmisión de datos sea cambiada a Ethernet, tecnología de transmisión de datos que permite actualización o retroalimentación de datos casi en tiempo real, a partir de esta incluso se abriría la posibilidad de operar o controlar la celda vía remota, de ahí que se considere necesaria la integración de los profesionales de ingeniería de sistemas y otras áreas afines para el fortalecimiento de la propuesta y la extensión o ampliación de su alcance.

7. OTRAS CONSIDERACIONES

El desarrollo de sistemas automáticos programables trae consigo algunas características que deben ser mencionadas antes de su implementación, aspecto que no deben tratarse de forma aislada sino complementario para garantizar un buen funcionamiento de todo el sistema, entre esos aspectos se pueden contar: el sistema de seguridad y la factibilidad de la construcción.

7.1. SEGURIDAD Y SISTEMAS DE EMERGENCIA

Aunque no se contemplan dentro de alguno de los espacios creados para el diseño es preciso hablar de la conexión eléctrica del manipulador en algunos de sus puntos básicos, como lo son que el sistema o módulos de control de motores tenga entrada por un solo punto. sobre este punto deberán haber instalados varios sistemas paradas de emergencia, en el sentido de que se tiene control eléctrico, electrónico, computacional y mecánico, por tanto para cada uno de estos diferentes sistema deberá haber posibilidades de cortar el suministro eléctrico en caso de emergencia.

7.2. FACTIBILIDAD DE CONSTRUCCIÓN

Tomando en considerando los requerimientos funcionales, requerimientos técnicos y de rendimiento de los diferentes elementos que conformarían el manipulador, al igual que las diferentes opciones existentes en el mercado de compra, garantía, posibilidad de reemplazo de piezas o mantenimiento de estas entre otras características, en la tabla anexa se especifican algunos de los costos generales de la construcción del manipulador. De acuerdo con el costo total y comparando este con el costo de un manipulador educativo comercial de características básicas, se podría considerar que el manipulador es de bajo costo.

En cuanto a los costos se aclara que los valores de los conceptos contemplados en la tabla **5**, no representan ninguna configuración de equipos, herramientas o materiales en particular, son valores promedios proyectados a 2011 de lo que pueden llegar a costar los elementos dependiendo del alcance en cuanto al control, la resistencia y la funcionalidad que se le quiera dar al manipulador, pretender realizar un estudio de costos de los diferentes elementos con sus capacidades, alcances, características, restricciones, complementos, necesidades de operación o mantenimiento entre otras características implica realizar el diseño de detalle de la propuesta aspecto que no esta contemplado en el alcance de la presente propuesta por limites de tiempo.

Tabla 5: Costos generales implementación de la Propuesta

COSTO GENERALES DEL MANIPULADOR CARTESIANO			
	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Asesoría (hr)	20	\$85.000	\$1.700.000
Consultoría	10	\$85.000	\$ 850.000
PROTOTIPO			
Base Robot (Acero 1080 / Aluminio LD)	1	\$150.000	\$ 150.000
Esqueleto (Acero 1080 / Aluminio LD)	1	\$250.000	\$ 250.000
Pinza (intercambiable electromag/neumatica)	1	\$200.000	\$ 200.000
MOTORES Y ACTUADORES			
Motor paso a paso	8	\$65.000	\$ 520.000
Actuadores	4	\$25.000	\$ 100.000
EJES - TRANSMISION			
Correa	3	\$100.000	\$ 300.000
Uniones	10	\$15.000	\$ 150.000
Piñones, ejes, engranajes	24	\$35.000	\$ 840.000
INTEGRADOS Y SENSORES			
Módulos integrados (potencia, señal, control)	3	\$230.000	\$ 690.000
Sensores (final carrera, capacitivo, inductivo)	10	\$45.000	\$ 450.000
Tarjeta Controladora	1	\$350.000	\$ 350.000
CABLES			
Cableado General (mts)	100	\$5.000	\$ 500.000
Varios (uniones, insumos etc.)	2	\$150.000	\$ 300.000
TOTAL	\$7.350.000		

Fuente: Propia

Sin embargo una propuesta más económica podría obtenerse a partir de la utilización de materiales ecológicos resistentes de bajo costo, motores normalizados repotenciados de máquinas dadas de baja en empresas de manufactura, comprando componentes eléctricos desintegrados entre otras opciones, esto teniendo presente que algunos costos serán difíciles de reducir porque podrían comprometer la integridad o la funcionalidad del manipulador, los productos o las personas en contacto con el manipulador (ver tabla **anexo 4**).

Adicionalmente se sugiere que con el ánimo de conseguir costos razonables o económicos realicen las cotizaciones de los elementos o de las diferentes partes a través de organizaciones de fabricantes a través de filiales subsidiarias de proveedoras de equipos confiables, así como en catálogos especializados de bienes de capital.

CONCLUSIONES

Con la realización de la presente propuesta se logran formalizar las expectativas tanto de estudiantes como docentes a cerca de la necesidad de que la facultad de ingeniería, en particular el programa de ingeniería de producción entre sus herramientas de aprendizaje o entre sus laboratorios cuente con una celda de manufactura flexible (FMS). Las FMS a nivel educativo permiten el desarrollo de nuevas y mejores habilidades a través del uso y aplicación de tecnologías avanzadas de producción que integran diferentes componentes de la producción o áreas de una organización de forma tal se generen ventajas competitivas que mejoran la rentabilidad de la organización.

El desarrollo de la propuesta también permitió determinar algunas de las variables que intervienen en el diseño general de un manipulador cartesiano como herramienta de fácil manipulación, con un modelo cinemático o de movimiento sencillo, de fácil adaptación a la celda flexible, capaz de realizar tareas poco complejas, de bajos costos de manera tal que su aplicación en el aula sea dinámica y sencilla con posibilidades de construir varios diseños.

Se propuso un esquema general para el diseño mecánico del manipulador considerando las características de sencillez, economía y modelamiento sugeridas para el manipulador teniendo igualmente presente que su uso será educativo.

Una vez definido el esquema general del diseño mecánico del manipulador se logro proponer un sistema de control para el funcionamiento en lazo abierto del manipulador.

La propuesta desarrollada aumenta la expectativa de que desde el aula se formen profesionales asertivos, flexibles, capaces de responder a los cambios que suscita una economía globalizada, interdependiente, educada y dinámica.

Realmente sea espera que este sea el comienzo de todo un esfuerzo interdisciplinario a nivel de facultad y universitario que fortalezca las funciones de investigación de la facultad de ingeniería e incluso de la Universidad.

RECOMENDACIONES

Luego de analizar las diferentes características de los manipuladores robóticos como herramientas versátiles de trabajo capaces de adaptarse a casi cualquier ambiente industrial, entender la importancia que juegan estos sistemas como parte de la automatización de los procesos productivos en las empresas de Colombia y el mundo, se propone el diseño **ajustado** de un manipulador cartesiano de bajo costo como herramienta de apoyo para el aprendizaje y el desarrollo tecnológico e investigativo de la carrera de Ingeniería de Producción y de la facultad de ingeniería.

Considerando el alcance del proyecto de la implementación de la celda de manufactura se recomienda la validación de la presente propuesta de diseño para la construcción del primer elemento de la futura celda de manufactura de la Universidad EAN, aprovechando el desarrollo de su nuevo campus.

De seguir la metodología propuesta al final de documento para la fase de construcción se sugieren analizar a fondo la posibilidad de desarrollar un porta herramientas que permita el cambio de herramientas para darle mayor flexibilidad al manipulador.

Se aconseja tener presente al momento de revisar las instalaciones donde funcionara la celda el apartado de celda de manufacturas, sistemas auxiliares y de seguridad para el funcionamiento adecuado del manipulador y su integración futura a la celda.

En cuanto al desarrollo lógico programable del computador y la interfaz usuario maquina para el manipulador se sugiere apoyarse en los estudiantes y docentes de la carrera de ingeniería de Sistema de la Universidad EAN, para lograr un diseño eficiente.

BIBLIOGRAFIA

[1] OHNO, T. "Sistema de Producción Toyota: más allá de la producción a escala", 3ED, Editorial Gestión 2000, España 1999

[2] CHONG, M. "Robótica e inteligencia artificial". Argentina: El cid editor | Apuntes, 2009. P 5. [En línea] Recuperado 28 octubre 2009:
<http://site.ebrary.com/lib/bibliotecaeansp/Doc?id=10316298&ppg=5>

[3] ARDILLA, J., DIAZ, J., GARCIA, A. "Diseño e implementación de una celda de manufactura con el acople de PLC y manipulador RV—M1 utilizando el protocolo DDE", Revista Colombiana de Tecnología de Avanzada vol. 2 no. 10 de 2007, Facultad de Ingeniería, Universidad de Pamplona. [En línea] Recuperado 26 octubre 2009:
http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesoft/portalIG/home_18/recursos/01_general/documentos/16052008/rev_tec_avan_art3_vol2_num10.pdf

[4] FÚQUENE, C. – AGUIRRE, S – Córdoba, "Evolución de un sistema de manufactura flexible (FMS) a un sistema de manufactura integrada por computador (CIM)" Ingeniería y Universidad vol. 11 no. 1: 57-69, enero-junio de 2007 en:
<http://ingenieriayuniversidad.javeriana.edu.co/Vol11nr1SistemaManufactura.pdf>

[5] GARZÓN. C, "Sistemas de integrados de información para producción" Universidad Nacional, Bogotá Enero de 2001.

[6] VARGAS E., REYNOSO G., "Diseño de un Manipulador Industrial para Aplicaciones de Limpieza en Subestaciones Eléctricas", Cerro de las Campanas No. 14, (En Línea:) <http://www.mecatronica.net/emilio/papers/amrob01.PDF>

[7] Groover "Sistemas de Producción y Manufactura Integrada por Computador", España 2001.

[8] FU, K. "Robótica: Control, detección, visión e inteligencia", McGraw-Hill, Madrid, España: julio de 1988, p. 3.

[9] CRAIG. 2006, Robótica, Tercera Edición, Pearson Education, 2006

[10] BARRIENTOS, A. y Otros "Fundamentos de Robótica", McGraw Hill, 2ed. España 2007.

[11] PIEDRAFITA. R, "Ingeniería de la Automatización Industrial". 2ª Ed. Días de Santos, México 2001.

[12] AGUIRRE, I., ANDUEZA C., ARISMENDI, C. "Diseño e implementación de un Manipulador Robótico con tres grados de libertad para fines educativos", Universidad de Los Andes, Departamento Sistemas de Control y Automatización. Mérida, Venezuela: Febrero de 2009. [En línea] Recuperado 26 octubre 2009:
<http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=43&sessionId=27&resId=0&materialId=paper&confId=47>

[13] SHIGLEY, J., MISCHKE, C. "Diseño en ingeniería mecánica", McGraw Hill, México 2005.

[14] KALPAKJIAN, S., Y SCHMID S., "Manufactura, ingeniería y tecnología" 4 ED. Pearson Education, Mexico 2002.

[15] CHAPMAN. S., "Maquinas eléctricas" 4ta Ed

[16] <http://www.servimex.net/paletizado.html>

[17] Ministerio de Industria, comercio y Turismo de Colombia “v encuentro para la productividad y la competitividad, Colombia 2010” en línea: recuperado octubre 2010

[<http://www.mincomercio.gov.co/econtent/documentos/competitividad/politicaproductividad/TOTAL.PDF>]

Otros Documentos en línea

Departamento Nacional de Planeación “Política nacional logística”, Bogotá Octubre 2008, en línea en:

[<http://www.snc.gov.co/Es/Politica/Documents/Conpes%203547.pdf>]

Departamento Nacional de Planeación “Política nacional para la transformación productiva y la promoción de las micro, pequeñas y medianas empresas: un esfuerzo público-privado” Bogotá Agosto 2007, en línea en:

[<http://www.snc.gov.co/Es/Politica/Documents/Conpes%203484.pdf>]

Departamento Nacional de Planeación “Informe de seguimiento a la política nacional de Competitividad y productividad”, Bogotá Junio 2010, en línea en:

[<http://www.snc.gov.co/Es/Institucionalidad/Documents/Conpes/Conpes%203668%20informe%20seguimiento%20política%20de%20competitiv.pdf>]

Departamento Nacional de Planeación: “Política nacional de ciencia, tecnología e innovación” e “Importancia estratégica de los proyectos de apoyo a las micro, pequeñas y medianas empresas”, abril – noviembre 2009

[<http://www.snc.gov.co/Es/Politica/Documents/Conpes%203582.pdf>]

[<http://www.snc.gov.co/Es/Politica/Documents/Conpes%203621.pdf>]

ANEXOS

ANEXO 1: Relación potencia No. de dientes en polea menor correa tipo L

<i>Nº dientes de la polea menor</i>	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36	40	48	50
<i>Dp (cm)</i>	42'4	45'5	48'5	54'6	60'6	66'7	72'8	78'8	84'9	90'9	97'0	109'1	121'3	145'5	
100	0'02	0'03	0'03	0'03	0'04	0'05	0'05	0'06	0'06	0'06	0'06	0'07	0'08	0'10	
200	0'06	0'06	0'06	0'07	0'08	0'09	0'10	0'10	0'11	0'12	0'13	0'15	0'16	0'19	
300	0'08	0'09	0'09	0'11	0'12	0'13	0'15	0'16	0'17	0'18	0'19	0'22	0'25	0'29	
400	0'11	0'12	0'13	0'15	0'16	0'18	0'19	0'21	0'23	0'24	0'26	0'29	0'32	0'39	
500	0'14	0'15	0'16	0'18	0'20	0'22	0'24	0'26	0'28	0'30	0'32	0'37	0'41	0'48	
600	0'17	0'18	0'19	0'22	0'24	0'27	0'29	0'32	0'34	0'37	0'39	0'44	0'49	0'58	
700	0'20	0'21	0'22	0'26	0'28	0'31	0'34	0'37	0'40	0'43	0'45	0'51	0'57	0'68	
800	0'23	0'24	0'26	0'29	0'32	0'36	0'39	0'42	0'45	0'48	0'52	0'58	0'65	0'77	
900	0'26	0'27	0'29	0'33	0'37	0'40	0'44	0'47	0'51	0'55	0'58	0'65	0'73	0'88	
1000	0'28	0'30	0'32	0'37	0'41	0'45	0'49	0'53	0'57	0'61	0'65	0'73	0'80	0'96	
1100	0'31	0'33	0'36	0'40	0'44	0'49	0'53	0'58	0'63	0'67	0'71	0'80	0'88	1'05	
1200	0'34	0'37	0'39	0'44	0'48	0'53	0'58	0'63	0'68	0'73	0'77	0'87	0'96	1'14	
1300	0'37	0'39	0'42	0'47	0'52	0'58	0'63	0'68	0'73	0'78	0'84	0'94	1'03	1'23	
1400	0'40	0'42	0'45	0'51	0'57	0'62	0'68	0'73	0'79	0'84	0'90	1'00	1'11	1'31	
1500	0'43	0'45	0'48	0'55	0'61	0'67	0'73	0'78	0'84	0'90	0'96	1'07	1'18	1'39	
1600	0'45	0'48	0'52	0'58	0'65	0'71	0'77	0'84	0'90	0'96	1'02	1'14	1'26	1'78	
1700	0'48	0'51	0'55	0'62	0'69	0'75	0'82	0'89	0'95	1'02	1'08	1'21	1'33	1'56	
1800	0'51	0'54	0'58	0'65	0'73	0'80	0'87	0'94	1'00	1'07	1'14	1'27	1'40	1'54	
1900	0'54	0'57	0'61	0'69	0'77	0'84	0'91	0'98	1'06	1'13	1'20	1'33	1'47	1'71	
2000	0'57	0'61	0'65	0'72	0'80	0'88	0'96	1'03	1'11	1'18	1'25	1'40	1'53	1'78	
2100	0'60	0'64	0'68	0'76	0'84	0'93	1'01	1'08	1'16	1'24	1'31	1'46	1'60	1'86	
2200	0'63	0'67	0'71	0'80	0'88	0'97	1'05	1'13	1'21	1'29	1'37	1'52	1'66	1'92	
2300	0'65	0'70	0'74	0'83	0'92	1'01	1'09	1'17	1'26	1'34	1'43	1'58	1'73	2'00	
2400	0'68	0'72	0'77	0'87	0'96	1'05	1'14	1'22	1'31	1'40	1'48	1'64	1'79	2'05	

Continuación ANEXO 1

2800	0'79	0'84	0'90	1'00	1'11	1'21	1'31	1'41	1'51	1'60	1'60	1'85	2'01	2'25
2900	0'82	0'87	0'93	1'04	1'15	1'25	1'35	1'46	1'55	1'64	1'74	1'90	2'06	2'30
3000	0'84	0'90	0'96	1'07	1'18	1'29	1'39	1'50	1'60	1'69	1'79	1'95	2'11	2'34
3100	0'87	0'93	0'99	1'11	1'22	1'33	1'44	1'54	1'64	1'74	1'83	2'00	2'15	2'37
3200	0'90	0'96	1'02	1'14	1'25	1'37	1'48	1'59	1'69	1'79	1'88	2'05	2'19	2'40
3300	0'92	0'98	1'05	1'17	1'29	1'41	1'52	1'63	1'73	1'83	1'92	2'09	2'23	2'43
3400	0'95	1'01	1'08	1'21	1'32	1'45	1'56	1'67	1'77	1'87	1'97	2'14	2'27	2'45
3500	0'98	1'04	1'11	1'24	1'36	1'48	1'60	1'71	1'81	1'91	2'01	2'18	2'31	2'47
3600	1'00	1'07	1'14	1'27	1'39	1'52	1'64	1'75	1'86	1'95	2'05	2'21	2'34	2'48
3700	1'03	1'10	1'17	1'30	1'43	1'56	1'67	1'79	1'90	1'99	2'09	2'24	2'37	2'49
3800	1'06	1'12	1'19	1'34	1'47	1'59	1'71	1'83	1'94	2'03	2'13	2'28	2'40	2'49
4000	1'11	1'18	1'26	1'40	1'53	1'66	1'79	1'90	2'01	2'10	2'19	2'34	2'44	2'48
4200		1'24	1'31	1'46	1'60	1'73	1'86	1'97	2'08	2'17	2'26	2'39	2'47	2'45
4400		1'30	1'37	1'52	1'66	1'80	1'93	2'04	2'14	2'24	2'32	2'43	2'49	2'40
4600		1'34	1'43	1'58	1'72	1'86	1'99	2'10	2'20	2'29	2'37	2'46	2'50	2'32
4800		1'39	1'48	1'64	1'79	1'93	2'05	2'16	2'25	2'34	2'41	2'49	2'48	2'21
5000		1'44	1'54	1'69	1'84	1'98	2'11	2'23	2'31	2'38	2'44	2'49	2'46	2'08
5200		1'50	1'58	1'75	1'89	2'04	2'16	2'27	2'35	2'42	2'47	2'49	2'42	1'93
5400		1'54	1'64	1'81	1'95	2'09	2'21	2'31	2'39	2'45	2'49	2'49	2'36	1'75
5600		1'59	1'69	1'86	2'00	2'14	2'26	2'35	2'43	2'47	2'50	2'46	2'29	1'53
5800		1'64	1'74	1'90	2'05	2'19	2'30	2'39	2'45	2'49	2'50	2'42	2'21	1'28
6000		1'69	1'79	1'95	2'10	2'24	2'33	2'42	2'47	2'50	2'49	2'36	2'10	1'01

Fuente: Guía dientes sistemas de correas [14]

ANEXO 2: Costos propuesta económica de implementación

COSTO GENERALES DEL MANIPULADOR CARTESIANO			
	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
Asesoría (hr)	15	\$ 85.000	\$ 1.275.000
Consultoría	10	\$ 85.000	\$ 850.000
PROTOTIPO			
Base Robot (Composite fibra carbono/metal)	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Esqueleto (Composite fibra carbono/metal)	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Pinza (intercambiable electromec/neumatica)	1	\$ 200.000	\$ 200.000
MOTORES Y ACTUADORES			
Motor paso a paso	3	\$ 65.000	\$ 195.000
Motor paso a paso (repointecidos)	5	\$ 25.000	\$ 125.000
Actuadores	4	\$ 25.000	\$ 100.000
EJES, TRANSMISION			
Correa	3	\$ 100.000	\$ 300.000
Uniones	10	\$ 15.000	\$ 150.000
Piñones, ejes, engranajes	18	\$ 35.000	\$ 630.000
INTEGRADOS Y SENSORES			
Módulos integrados (potencia, señal, control)	3	\$ 190.000	\$ 570.000
Sensores (final carrera, capacitivo, inductivo)	8	\$ 35.000	\$ 280.000
Tarjeta Controladora	1	\$ 250.000	\$ 250.000
CABLES			
Cableado General (mts)	50	\$ 5.000	\$ 250.000
Varios (uniones, insumos etc.)	1	\$ 150.000	\$ 150.000
TOTAL		\$ 5.575.000	

Fuente: propia

[18] <http://personales.alc.upv.es/sasanca/archivos/OFERTA%20PFC.pdf>

[19] <http://hds.cx/descargas/Folleto-MCE.pdf>

[20] <http://www.deep-ing.com/proyectos.html>

ANEXO 3: Matriz modelo cinemático parámetros D-H

	Θ	d	a	α	home
1	0	q1	0	270°	d1
2	270	q2	0	270°	d2
3	0	q3	0	270°	d3
4	q4	0	0	270°	180°
5	q5	d5	0	0	90°

MATRIZ T1			
1	- sen q1	0	d1
0	cos q1	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T2			
0	- sen q2	0	0
1	cos q2	0	d2
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T3			
1	- sen q3	0	0
0	cos q3	0	0
0	0	0	d3
0	0	0	1

MATRIZ T4			
cos q4	0	0	0
sen q4	1	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T5			
cos q5	- sen d5	0	0
sen q5	cos d5	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T1 a 2			
0	- sen q1	0	0
0	cos q1 q2	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T2 a 3			
0	0	0	0
0	cos q1 q2 q3	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T3 a 4			
0	0	0	0
0	cos q1 q2 q3	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ T4 a 5			
0	0	0	0
0	cos q1 q2 q3 d5	0	0
0	0	0	0
0	0	0	1

MATRIZ RESULTANTE			
0 * 0	270 * - sen q1	0 * 0	q4 * 0
q1 * 0	q2 * cos q1 q2	q3 * 0	0 * 0
0 * 0	0 * 0	0 * 0	0 * 0
270° * 0	270° * 0	270° * 0	270° * 1

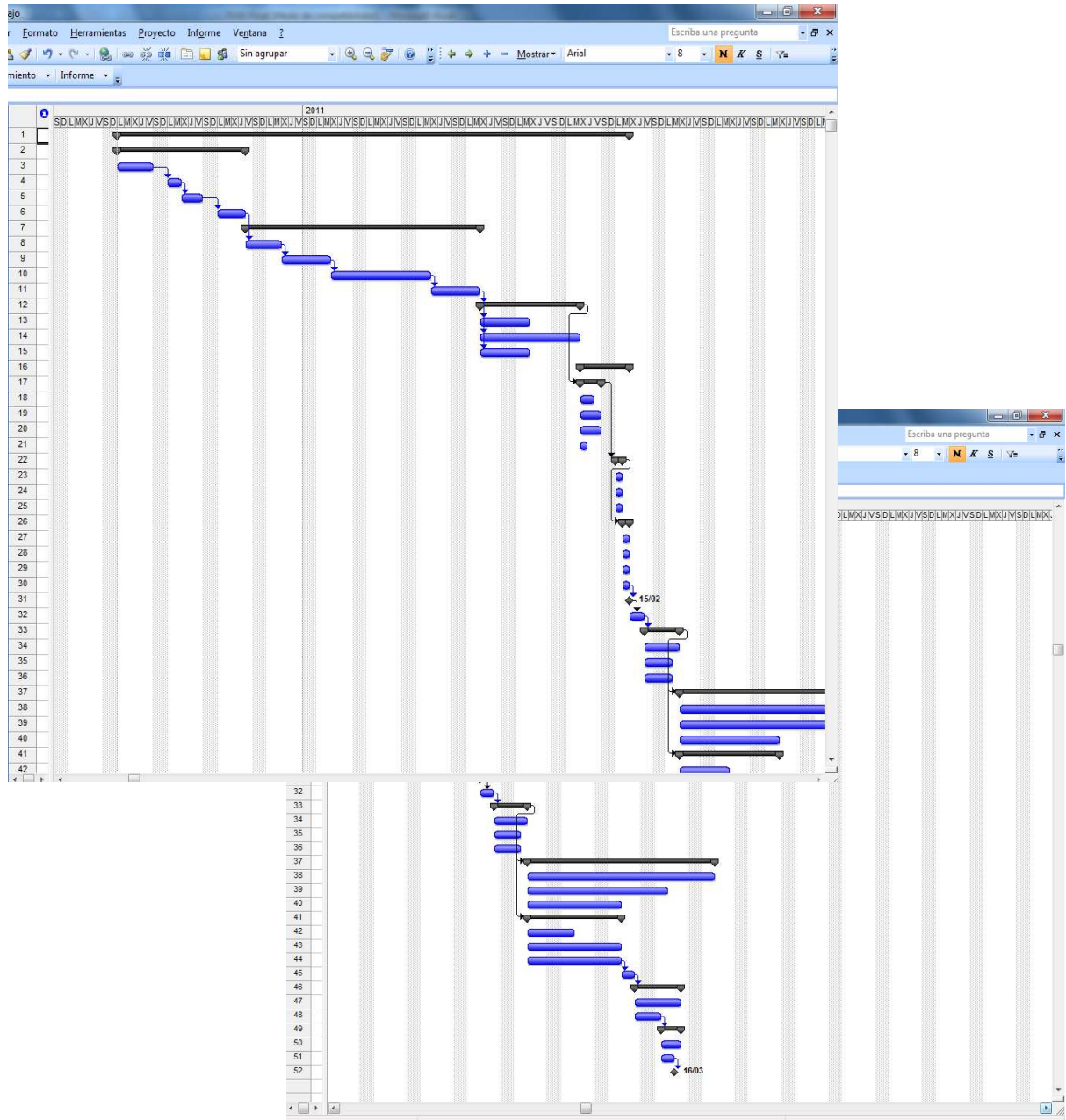
Fuente: Propia

ANEXO 4: Cronograma de actividades e hitos del proyecto

Microsoft Project - Cronograma Trabajo						
Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Proyecto Informe Ventana ?						
Sin agrupar						
	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras	
1	DISEÑO MANIPULADOR CARTESIANO	52 días?	lun 06/12/10	mar 15/02/11		
2	Requerimientos	14 días	lun 06/12/10	jue 23/12/10		
3	Definición Requerimientos genera	5 días	lun 06/12/10	vie 10/12/10		
4	Evaluación Requerimientos	2 días	lun 13/12/10	mar 14/12/10	3	
5	Aprobación Requerimientos	3 días	mié 15/12/10	vie 17/12/10	4	
6	Presupuesto	4 días	lun 20/12/10	jue 23/12/10	5	
7	Diseño general	23 días	vie 24/12/10	mar 25/01/11		
8	Generalidades Diseño mecanico	3 días	vie 24/12/10	mar 28/12/10	6	
9	Generalidades sistema de actuac	5 días	mié 29/12/10	mar 04/01/11	8	
10	Generalidades sistema de control	10 días	mié 05/01/11	mar 18/01/11	9	
11	Generalidades Software control	5 días	mié 19/01/11	mar 25/01/11	10	
12	Diseño de bloques	10 días	mié 26/01/11	mar 08/02/11	11	
13	Planos generales piezas	5 días	mié 26/01/11	mar 01/02/11	11	
14	Esquemas de control básico	10 días	mié 26/01/11	mar 08/02/11	11	
15	Diagrama lógico operación softw	5 días	mié 26/01/11	mar 01/02/11	11	
16	Diseño de detalle	5 días?	mié 09/02/11	mar 15/02/11		
17	Diseño Mecanico	3 días?	mié 09/02/11	vie 11/02/11	12	
18	Análisis de materiales	2 días	mié 09/02/11	jue 10/02/11		
19	Elección de materiales	3 días	mié 09/02/11	vie 11/02/11		
20	Sistema de transmisión de pot	3 días	mié 09/02/11	vie 11/02/11		
21	Sistemas de emergencias	1 día?	mié 09/02/11	mié 09/02/11		
22	Diseño electrónico	1 día?	lun 14/02/11	lun 14/02/11	17	
23	Análisis sistemas de control	1 día?	lun 14/02/11	lun 14/02/11		
24	Elección Sistema de control	1 día?	lun 14/02/11	lun 14/02/11		
25	Simulación sistema de control	1 día?	lun 14/02/11	lun 14/02/11		
26	Diseño Informático	1 día?	mar 15/02/11	mar 15/02/11	22	
27	Programación software	1 día?	mar 15/02/11	mar 15/02/11		
28	Evaluación	1 día?	mar 15/02/11	mar 15/02/11		
29	Puesta a prueba	1 día?	mar 15/02/11	mar 15/02/11		
30	Evaluación Propuesta Diseño	1 día?	mar 15/02/11	mar 15/02/11		
31	Entrega Propuesta Final	0 días	mar 15/02/11	mar 15/02/11	30	
32	Aprobación propuesta	2 días	mié 16/02/11	jue 17/02/11	31	
33	Compra de materiales	3 días	vie 18/02/11	mar 22/02/11	32	
34	Cotizaciones	3 días	vie 18/02/11	mar 22/02/11		
35	Ajustes Presupuesto	2 días	vie 18/02/11	lun 21/02/11		
36	Compras	2 días	vie 18/02/11	lun 21/02/11		
37	Sub-Ensamble de piezas	20 días	mié 23/02/11	mar 22/03/11	33	
38	Ensamble mecanico	20 días	mié 23/02/11	mar 22/03/11		
39	Ensamble electrónico	15 días	mié 23/02/11	mar 15/03/11		
40	Integración Informática	10 días	mié 23/02/11	mar 08/03/11		
41	Programación de integrados	10 días	mié 23/02/11	mar 08/03/11	33	
42	Programación tarjeta	5 días	mié 23/02/11	mar 01/03/11		
43	Programación módulo control	10 días	mié 23/02/11	mar 08/03/11		
44	Programación Software	10 días	mié 23/02/11	mar 08/03/11		
45	Ajustes a la propuesta	2 días	mié 09/03/11	jue 10/03/11	44	
46	Integración con Software	5 días	vie 11/03/11	jue 17/03/11	45	
47	Integración sistema electrónico / info	5 días	vie 11/03/11	jue 17/03/11		
48	Simulación	2 días	vie 11/03/11	lun 14/03/11		
49	Construcción Prototipo	3 días	mar 15/03/11	jue 17/03/11	48	
50	Ensamble Final	3 días	mar 15/03/11	jue 17/03/11		
51	Pruebas	2 días	mar 15/03/11	mié 16/03/11		
52	Presentación Prototipo	0 días	mié 16/03/11	mié 16/03/11	51	

Fuente: Propia

ANEXO 5: cronograma de actividades del proyecto



Fuente: Propia