

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELACIÓN, PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN
DE SISTEMAS MECÁNICOS DE CADENA
CINEMÁTICA CERRADA EN PLANO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA
(ÁREA MECÁNICA)
P R E S E N T A :
ING. JOSÉ EFRÉN RUELAS RUIZ



ASESOR: M. EN I. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ

MÉXICO, D. F. CIUDAD UNIVERSITARIA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

Agradecimientos	iv
Prólogo	v
Resumen	vii

Introducción

1.1 Lenguaje máquina	2
1.2 Lenguaje ensamblador.....	3
1.3 Evolución de los lenguajes computacionales	5
1.4 Comparaciones entre los niveles de programación.....	7
1.4.1 Velocidad	7
1.4.2 Tamaño.....	7
1.4.3 Flexibilidad.....	6
1.4.4 Tiempo de programación	9
1.4.5 Programas fuente	9
1.4.6 Inestabilidad del sistema.....	9
1.4.7 Portabilidad.....	10
1.5 Comparación de líneas de código en función del programa fuente...	11
1.6 La programación de los modelos de robots.....	12
1.7 La sistematización de los modelos y la programación	13
1.8 Resumen de modelos programados en otros lenguajes	14

Capítulo 1: La modelación cinemática y la síntesis de mecanismos

1.1 El problema de la mecánica clásica.....	15
1.2 El problema de la cinemática	16
1.3 Cuerpos rígidos.....	18
1.4 Sistemas de cuerpos rígidos acoplados.....	19
1.5 Dos configuraciones de análisis cinemático.....	20
1.6 El problema inverso y el problema directo	23

1.7 El problema de síntesis de mecanismos.....	26
1.8 Algunas consideraciones sobre las metodologías usadas para construir modelos cinemáticos	27
1.9 Descripción de cadenas cinemáticas robot paralelo y mecanismo ...	28

**Capítulo 2: Modelos de posición de un robot paralelo, programación
y simulación**

2.1 Metodología para construir los modelos de posición.....	30
2.2 Modelación de la configuración no deformada: planteamiento del problema inverso	35
2.3 Modelación de la configuración no deformada (Planteamiento del problema directo).....	41
2.4 Modelación de la configuración deformada (Planteamiento del problema inverso).....	45
2.5 Modelación de la configuración deformada (Planteamiento del problema directo).....	50
2.6 Programación de los modelos de posición.....	54
2.6.1 Programación de la cinemática inversa del robot	54
2.6.2 Programación de la cinemática directa del modelo de posición.....	68

**Capítulo 3: Modelos de velocidad y aceleración del robot paralelo,
programación y simulación**

3.1 Metodología.....	83
3.2 Modelado y planteamiento del problema inverso de velocidad	87
3.3 Modelado y planteamiento del problema de velocidad directo	97
3.4 Modelado y planteamiento del problema inverso de aceleración	101

3.5 Modelado y formulación del problema directo de aceleración	108
3.6 Programación de los modelos de velocidad	111
3.6.1 Programación del problema de inverso de velocidad	111
3.6.2 Programación del problema directo de velocidad	123
3.7 Programación de los modelos de aceleración	136
3.7.1 Programación del problema inverso de aceleración	136
3.7.2 Programación del problema directo de aceleración	150

**Capítulo 4: Metodología para sintetizar un mecanismo de cuatro barras
con 4 puntos de precisión para conducción de cuerpo rígido**

4.1 Metodología.....	164
4.2 Modelación del mecanismo de cuatro barras	165
4.3 Programación y simulación del problema de síntesis	178

Conclusiones

Bibliografía

Agradecimientos

A dios.

A mis padres con profundo amor y respeto, por el apoyo brindado.

A mis hermanos.

A mis maestros que con sus consejos y conocimientos han contribuido a mi formación.

A mi asesor por su colaboración y amistad.

A todos los amigos que forman parte de esta institución educativa ITESCA.

A mis compañeros de esta primera generación.

A virgen de Guadalupe que con su sonrisa ilumina el camino y transforma la oscuridad en un claro de luz.

Prólogo

Este trabajo de tesis tiene el propósito de generar conocimiento escrito para las futuras generaciones de la Maestría en Ingeniería Mecánica, interesadas en la modelación, programación y simulación de sistemas mecánicos de cadena cinemática cerrada.

La programación sistemática de los modelos cinemáticos de robots y mecanismos permite, por un lado, verificar y calcular la eficacia y contundencia de los procesos de análisis y modelación del comportamiento mecánico de multicuerpos rígidos, y por otro, proporcionar la interfaz de control y simulación de los modelos con los prototipos reales.

La programación es vista, en ocasiones, como una técnica secundaria que contribuye a fortalecer la investigación en diferentes áreas de aplicación. La realidad es que tanto los procesos de análisis y modelación como los procesos de programación y simulación tienen gran importancia para el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

En este trabajo de tesis se realiza el proceso de programación en el paquete VISUAL BASIC V6 de los modelos cinemáticos y de trayectoria de un robot paralelo tipo RRR plano, así como la programación de un modelo de síntesis para conducción de cuerpo rígido (4 puntos de precisión) de un mecanismo de cuatro barras.

Los modelos de dichos mecanismos (Excepto el de trayectoria) fueron desarrollados por [2,3] en dos tesis de maestría. Este trabajo forma parte del proyecto "Análisis , modelación, programación y simulación de sistemas mecánicos de cadena cerrada", el cual consta de las siguientes partes:

1).- Análisis cinemático de un robot paralelo plano de tres grados de libertad tipo RRR.

2).- Análisis y síntesis de un mecanismo de cuatro barras (Conducción de cuerpo rígido 3 y 4 puntos de precisión)

3).- Modelación, programación y simulación de sistemas mecánicos de cadena cerrada planos usando VISUAL BASIC V6.

En este trabajo de tesis se desarrolla la tercera parte del proyecto mencionado anteriormente. Asimismo, se introduce el problema de trayectoria del robot paralelo con la cual, se completa el análisis cinemático de dicho multicuerpo.

Los modelos del robot y mecanismos fueron desarrolladas usando la rotación usual definida en el espacio vectorial de números complejos. Dicha rotación fue sistematizada y parametrizada por [8].

Cabe mencionar que este trabajo en tesis forma parte de la línea de investigación "Modelación cinemática de sistemas mecánicos desarrollada por la sección mecánica de la DEPMI, UNAM y pertenece al archivo bibliográfico-científico del laboratorio de Mecatrónica localizado en dicha sección.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta la sistematización de los modelos cinemáticos de cadena cerrada para su programación y simulación utilizando el álgebra de complejos en su análisis. Se describe su comportamiento cinemático en el plano cartesiano. Se modela sistemáticamente y generalizadamente la cinemática, y se obtienen los sistemas de ecuaciones no lineal tipo polinomial, que rigen el comportamiento físico de los sistemas cinemáticos de cadena cerrada. Se resuelven los sistemas de ecuaciones de la cinemática a través de determinar cada uno de los complejos ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$), que satisfagan las ecuaciones cinemáticas para cada uno de los puntos de una trayectoria dada, utilizando el método numérico de la burbuja. Estos resultados se usan para simular el comportamiento cinemático de un robot paralelo y mecanismo de 4 barras, utilizando el lenguaje de programación VISUAL BASIC V6.

Palabra Claves: Programación, simulación, robótica, cinemática, mecanismo.

Introducción

En este trabajo de tesis se pretende cumplir con los siguientes objetivos:

- 1) Sistematizar paso a paso los modelos cinemáticos y de trayectoria de un robot paralelo plano tipo RRR.
- 2) Sistematizar paso a paso el modelo de síntesis de un mecanismo de cuatro barras usado para conducir un cuerpo rígido por cuatro puntos de precisión.
- 3) Programar sistemáticamente los modelos del robot paralelo y el mecanismo en el lenguaje de programación VISUAL BASIC V6.

Esta tesis se intenta homologar el procedimiento de modelación de robots y mecanismos con el proceso de programación de los mismos en el paquete VISUAL BASIC V6 [1]. Dicha homologación es realizada para fines pedagógicos; es decir, para facilitar la enseñanza de futuros interesados en la programación y simulación de robots y mecanismos.

Para realizar el proceso de homologación, es necesario describir los modelos en términos de una metodología paso a paso y que, cada paso, sea programado en forma sistemática en el lenguaje VISUAL BASIC V6.

Los modelos que serán homologados corresponden a un robot paralelo tipo RRR (modelo cinemático) y a un mecanismo de cuatro barras (síntesis para cuatro puntos de precisión para conducción de cuerpo rígido), ambos desarrollados en [2,3].

Es importante señalar que las ecuaciones y parámetros de los modelos descritos en los trabajos mencionados anteriormente, no serán modificados o las modificaciones que se requieran serán mínimas. En realidad, dichas ecuaciones solo son ordenadas sobre los pasos de las metodologías y, posteriormente programadas en VISUAL BASIC V6.

I.1 Lenguaje máquina

Al desarrollarse las primeras computadoras electrónicas, se vio la necesidad de editar programas en ellas, es decir, de almacenar en memoria la información sobre la tarea que iban a ejecutar. Las primeras computadoras se usaban como calculadoras simples; se les indicaban los pasos de cálculo, uno por uno [5].

John Von Neumann desarrolló el modelo que lleva su nombre, para describir este concepto de "programa almacenado". En este modelo, se tiene una abstracción de la memoria como un conjunto de celdas, que almacenan simplemente números. Estos números pueden representar dos cosas: los datos, sobre los que va a trabajar el programa; o bien, el programa en sí.

¿Cómo es que se describe un programa con números? Se tenía el problema de representar las acciones que iba a realizar la computadora, y que la memoria, al estar compuesta por switches correspondientes al concepto de bit, solamente nos permitía almacenar números binarios.

La solución que se tomó fue la siguiente: a cada acción que sea capaz de realizar la computadora, asociarle un número, que será su *código de operación (opcode)*. Por ejemplo, una calculadora programable simple podría asignar los *opcodes*: 1 = SUMA, 2 = RESTA, 3 = MULTIPLICA, 4 = DIVIDE.

Suponga que se quiere realizar la operación $5 * 3 + 2$, en la calculadora descrita arriba. En memoria, se podría "escribir" el programa de la siguiente forma:

Localidad	Opcode	Significado	Comentario
0	5	5	En esta localidad, tenemos el primer número de la fórmula
1	3	*	En esta localidad, tenemos el <i>opcode</i> que representa la multiplicación.
2	3	3	En esta localidad, tenemos el segundo número de la fórmula
3	1	+	En esta localidad, tenemos el <i>opcode</i> que representa la suma.
4	2	2	En esta localidad, tenemos el último número de la fórmula

Tabla I.1 Escritura de un programa simple

Como se observa en la tabla I.1, es simple expresar las operaciones de las que es capaz de desarrollar el hardware (en este caso, la calculadora imaginaria), en la memoria.

La descripción y uso de los opcodes es lo que llama lenguaje de máquina. Es decir, la lista de códigos que la máquina va a interpretar como instrucciones, describe las capacidades de programación que tenemos de ella. Es el lenguaje más primitivo, depende directamente del hardware, y requiere del programador que conozca el funcionamiento de la máquina al más bajo nivel.

I.2 Lenguaje Ensamblador

Cuando se abstrae los opcodes y se sustituye por una palabra que sea una clave de su significado, a la cual comúnmente se le conoce como mnemónico, se tiene el concepto de Lenguaje Ensamblador. Así, se puede definir simplemente al Lenguaje Ensamblador de la siguiente forma:

Lenguaje Ensamblador es la primera abstracción del Lenguaje de Máquina, consistente en asociar a los “opcodes” palabras clave que faciliten su uso por parte del programador.

Como se puede ver, el Lenguaje Ensamblador es directamente traducible al Lenguaje de Máquina, y viceversa; simplemente, es una abstracción que facilita su uso para los seres humanos. Por otro lado, la computadora no entiende directamente al Lenguaje Ensamblador; es necesario traducirle a Lenguaje de Máquina. Originalmente, este proceso se hacía a mano, usando para ello, hojas donde se escribían tablas de programa similares a las vista en al ejemplo de la calculadora. Pero, al ser tan directa la traducción, pronto se desarrollaron los programas Ensambladores, que son traductores que convierten el código fuente (en Lenguaje Ensamblador) a código objeto (es decir, a Lenguaje de Máquina).

Una característica que hay que resaltar, es que al depender estos lenguajes del hardware, hay un distinto Lenguaje de Máquina (y, por consiguiente, un distinto Lenguaje Ensamblador) para cada CPU. Por ejemplo, se puede mencionar tres lenguajes completamente diferentes, que sin embargo vienen de la aplicación de los conceptos anteriores:

- 1) Lenguaje Ensamblador de la familia Intel 80x86
- 2) Lenguaje Ensamblador de la familia Motorola 68000
- 3) Lenguaje Ensamblador del procesador POWER, usado en las IBM RS/6000.

Se tiene a 3 fabricantes distintos, compitiendo entre sí y cada uno aplicando conceptos distintos en la manufactura de sus procesadores, su arquitectura y programación. todos estos aspectos, influyen en que el lenguaje de máquina y ensamblador estén en constante cambio.

El Lenguaje Ensamblador de la familia Intel 80x86 es el más usado junto con las computadoras personales compatibles con IBM. Es importante que se desarrollen las estructuras de programación y la comprensión de los conceptos, suficientes para poder usar otros ensambladores, teniendo una lista de mnemónicos y su uso.

I.3 Evolución de los lenguajes computacionales

De acuerdo con la sección anterior, los lenguajes más primitivos fueron los lenguajes de máquina. Puesto que el hardware se desarrolló antes del software, y además cualquier software finalmente tiene que expresarse en el lenguaje que maneja el hardware.

La programación en esos momentos era sumamente tediosa, pues el programador tenía que "bajarse" al nivel de la máquina y decirle, paso a paso, cada punto de la tarea que tenía que realizar. Además, debía expresarlo en forma numérica; y por supuesto, este proceso era propenso a errores, con lo que la productividad del programador era muy limitada. Sin embargo, hay que recordar que en estos momentos, simplemente aún no existía alternativa.

El primer gran avance que se dió, como ya se comentó, fue la abstracción dada por el Lenguaje Ensamblador, y con él, el nacimiento de las primeras herramientas automáticas para generar el código máquina. Esto redujo los errores triviales, como podía ser el número que correspondía a una operación, que son sumamente engorrosos y difíciles de detectar, pero fáciles de cometer. Sin embargo, aún aquí es fácil para el programador perderse y cometer errores de lógica, pues debe bajar al nivel de la forma en que trabaja el CPU, y entender bien todo lo que sucede dentro de él.

Con el desarrollo en los años 50s y 60s de algoritmos de más elevado nivel, y el aumento de poder del hardware, empezaron a entrar al uso de computadoras científicas de otras ramas. Los científicos conocían la de física, química y otras

ramas similares, pero no de computación, y por supuesto, les era sumamente complicado trabajar con lenguaje ensamblador en vez de fórmulas. Así, nació el concepto de lenguaje de alto nivel, con el primer compilador de FORTRAN (FORmula TRANslation), que, como su nombre indica, inició como un "simple" esfuerzo de traducir un lenguaje de fórmulas al lenguaje ensamblador y por consiguiente al lenguaje de máquina. A partir de FORTRAN, se han desarrollado innumerables lenguajes, que siguen el mismo concepto: buscar la mayor abstracción posible, y facilitar la vida al programador, aumentando la productividad, encargándose los compiladores o intérpretes de traducir el lenguaje de alto nivel, al lenguaje de computadora.

Hay que notar la existencia de lenguajes que combinan características tanto de los de alto nivel como los de bajo nivel (es decir, Ensamblador). Como es el caso del lenguaje C: contiene estructuras de programación de alto nivel, y la facilidad de usar librerías que también son características de alto nivel. Sin embargo, el lenguaje C, fue diseñado con muy pocas instrucciones, las cuales son sumamente sencillas, fáciles de traducir al lenguaje de la máquina; y requiere de un entendimiento apropiado de cómo funciona la máquina, el uso de la memoria, etcétera. Por ello, muchas personas consideran a lenguajes como C (que fue diseñado para hacer sistemas operativos), lenguajes de nivel medio.

I.4 Comparaciones entre los niveles de programación

El proceso de evolución trajo consigo algunas desventajas, que ahora veremos como las ventajas de usar el Lenguaje Ensamblador, respecto a un lenguaje de alto nivel.

I.4.1 Velocidad

El proceso de traducción que realizan los intérpretes, implica un proceso de cómputo adicional al que el programador quiere realizar. Por ello, es posible que se encuentre con que un intérprete sea más lento al realizar la misma acción en Lenguaje Ensamblador, simplemente porque tiene el costo adicional de estar traduciendo el programa, cada vez que se ejecuta.

De ahí nacieron los compiladores, que son mucho más rápidos que los intérpretes, pues hacen la traducción una vez y dejan el código objeto, que ya es Lenguaje de Máquina, y se puede ejecutar muy rápidamente. Aunque el proceso de traducción es más complejo y costoso que el de ensamblar un programa, normalmente se puede describir, contra las ventajas de codificar el programa más rápidamente.

Sin embargo, la mayor parte de las veces, el código generado por un compilador es menos eficiente que el código equivalente que un programador escribiría. La razón es que el compilador no tiene la suficiente capacidad de realizar operaciones, y requiere ser capaz de crear código genérico, que sirva tanto para un programa como para otro; en cambio, un programador humano puede aprovechar las características específicas del problema, reduciendo la generalidad, pero al mismo tiempo, no desperdicia ninguna instrucción, no hace ningún proceso que no sea necesario.

Para darnos una idea, en una PC, y suponiendo que todos son buenos programadores, un programa para ordenar una lista tardará cerca de 20 veces más en Visual Basic (un intérprete), y 2 veces más en C (un compilador), que el equivalente en Ensamblador.

Por ello, cuando es crítica la velocidad del programa, Ensamblador se vuelve un candidato lógico como lenguaje. Ahora bien, esto no es un absoluto; un programa bien hecho en C puede ser muchas veces más rápido que un programa mal hecho

en Ensamblador; por tanto sigue siendo sumamente importante la elección apropiada de algoritmos y estructuras de datos. Por ello, se recomienda buscar optimar primero estos aspectos, en el lenguaje que se desee, y solamente usar Ensamblador cuando se requiere más optimización y no se puede lograr por estos medios.

I.4.2 Tamaño

Por las mismas razones que se observaron en el aspecto de velocidad, los compiladores e intérpretes generan más código máquina del necesario; por ello, el programa ejecutable crece. Así, cuando es importante reducir el tamaño del ejecutable, mejorando el uso de la memoria y teniendo también beneficios en velocidad, puede convenir usar el lenguaje Ensamblador.

Entre los programas que es crítico el uso mínimo de memoria, se tiene a los virus y manejadores de dispositivos (drivers). Muchos de ellos, por supuesto, están escritos en Lenguaje Ensamblador.

I.4.3 Flexibilidad

Las razones anteriores son cuestión de grado: se puede hacer las cosas en otro lenguaje, pero se requiere hacerlas más eficientemente. Pero todos los lenguajes de alto nivel tienen limitantes en el control; al hacer abstracciones, limitan su propia capacidad. Es decir, existen tareas que la máquina puede hacer, pero que un lenguaje de alto nivel no permite. Por ejemplo, en Visual Basic no es posible cambiar la resolución del monitor a medio programa; es una limitante, impuesta por la abstracción del GUI Windows. En cambio, en ensamblador es sumamente sencillo, pues se tiene el acceso directo al hardware del monitor.

I.4.4 Tiempo de programación

Al ser de bajo nivel, el Lenguaje Ensamblador requiere más instrucciones para realizar el mismo proceso, en comparación con un lenguaje de alto nivel. Por otro lado, requiere de más cuidado por parte del programador, pues es propenso a que los errores de lógica se reflejen más fuertemente en la ejecución.

Por todo esto, es más lento el desarrollo de programas comparables en Lenguaje Ensamblador que en un lenguaje de alto nivel, pues el programador goza de una menor abstracción.

I.4.5 Programas fuente

Por las mismas razones que aumenta el tiempo, crecen los programas fuentes; simplemente, se requiere más instrucciones primitivas para describir procesos equivalentes. Esto es una desventaja porque dificulta el mantenimiento de los programas, y nuevamente reduce la productividad de los programadores.

I.4.6 Inestabilidad del sistema

Se tiene la ventaja de que todo lo que se puede hacer en la máquina, se puede hacer con el Lenguaje Ensamblador (flexibilidad). El problema es que todo error que se pueda cometer, o todo riesgo que se pueda tener, puede tenerlo también en este Lenguaje. Dicho de otra forma, tener mucho poder es útil pero también es peligroso.

En la vida práctica, afortunadamente no ocurre mucho; sin embargo, al programar en este lenguaje verán que es mucho más común que la máquina se pierda el control y que se reinicialize. ¿Por qué?, porque con este lenguaje es

perfectamente posible (y sencillo) realizar secuencias de instrucciones inválidas, que normalmente no aparecen al usar un lenguaje de alto nivel.

En ciertos casos extremos, puede llegarse a sobre escribir información del CMOS de la máquina (no se han visto efectos más riesgosos); pero, si no la conservamos, esto puede causar que dejemos de "ver" el disco duro, junto con toda su información.

I.4.7 Portabilidad

Como ya se mencionó, existe un lenguaje ensamblador para cada máquina; por ello, evidentemente no es una selección apropiada de lenguaje cuando se desee codificar en una máquina y luego llevar los programas a otros sistemas operativos o modelos de computadoras. Si bien esto es un problema general a todos los lenguajes, es mucho más notorio en ensamblador: se puede reutilizar un 90% o más del código que se desarrolle en "C", en una PC, al ser llevado a una RS/6000 con UNIX, y lo mismo si después se lleva a una Macintosh, siempre y cuando esté bien hecho y se sigan los estándares de "C", y los principios de la programación estructurada. En cambio, se escribimos el programa en Ensamblador de la PC, por bien que lo se desarrolle y muchos estándares que segan, se tendría prácticamente que reescribir el 100 % del código al llevarlo a UNIX, y otra vez lo mismo al ser llevado a una Mac.

I.5 Comparación de líneas de código en función del programa fuente

La tabla I.2 se proporcionan estimaciones informales del número medio de líneas de código (LCD), requerido para construir un punto de función en diferentes lenguajes y niveles de programación [6].

LENGUAJE	NIVEL	LDC / PF
C	2.5	128
Decision Support Default	9	36
Ansi Basic	5	64
C++	6	53
Java	6	53
SQL	25	13
PL/I	4	80
4th Generation Default	16	20
Ansi Cobol 74	3	107
Visual 4.0	11.00	29
Visual Basic 1	7.00	46
Visual Basic 2	7.50	43
Visual Basic 3	8.00	40
Visual Basic 4	9.00	36
Visual Basic 5	11.00	29
Visual Basic DOS	8.00	40
Visual C++	9.50	34
Basic Assembly	1	320

Tabla I.2 Líneas de Código (Puntos de Función 9)

Debe tenerse en cuenta [6] se señala que la cantidad y calidad de los datos disponibles no permiten asegurar que el margen de error sea reducido, y también que la tabla no ha sido actualizada desde 1996, por lo que los valores deben tomarse con cierta reserva.

El lenguaje de programación utilizado en Synapsis es el Visual Basic nivel 5, esto indicaría que una LDC de Visual Basic proporciona aproximadamente 4.4 veces más de "funcionalidad" que una LDC de C. Interpretaciones de este tipo se pueden hacer fácilmente, como también decir que existe una relación lineal entre el nivel de un determinado lenguaje y las LDC necesarias para lograr un punto de función. Lo que no significa que exista una correlación lineal entre el nivel de lenguaje y la productividad, ya que esta última varía en relación con el tamaño del proyecto.

1.6 La programación de los modelos de robots

Para poder simular el comportamiento mecánico de los sistemas articulados de cuerpos rígidos se debe primero construir, en forma sistemática, los modelos cinemáticos y dinámicos y posteriormente, programarlos en algún lenguaje de programación.

Lenguajes como Mathematica [7], VISUAL BASIC, DELPHI, VISUAL "C"⁺⁺, Matlab y ensamblador entre otros son utilizados para simular los movimientos de mecanismos y robots.

Cada uno de los lenguajes usados para la programación de modelos de robots tienen sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, Mathematica es un lenguaje de programación simbólica y solo se usa para solucionar modelos, decir, en forma numérica. La simulación de los movimientos de los mecanismos se ve limitado en este lenguaje, además, no es posible transferir de forma directa los datos para manejar un prototipo real.

Por otro lado, el lenguaje ensamblador se usa para controlar movimientos con los cuales se mueve una máquina.

Los lenguajes de alto nivel como VISUAL BASIC, DELPHI, VISUAL "C"⁺⁺ pueden ser utilizados para programar los modelos, obtener resultados, simular los movimientos y generar interfaces de control entre el programa y el prototipo real. Matlab se usa también para estos propósitos. Además, los protocolos de comunicación usuario-maquina-modelo son muy simplificados, puesto que se pueden generar ventanas de diálogo que facilitan la introducción de parámetros al programa y, con esto, es probable simular y ejecutar diversas condiciones en las máquinas o robots.

I.7 La sistematización de los modelos y la programación

Para poder programar en forma clara, simple y sistemáticamente los modelos de los robots y mecanismos, es necesario que dichos modelos sean claros y sistemáticos [8]. Además, que las operaciones computacionales; es decir, el cálculo de los parámetros, sean de alguna manera reducidos. Aunque los nuevos procesadores realizan millones de operaciones sobre segundo, no deja de ser importante reducir el número de operaciones.

La homogenización de los procesos de modelación de los movimientos de robots y mecanismos con el proceso de programación en algún lenguaje es una tarea que debe realizarse sistemáticamente. Sin embargo, es necesario discutir las consideraciones siguientes:

- 1) Desde le punto de vista pedagógico, el hecho de que los modelos y la programación sean homologados; es decir, análogos tanto en su escritura como en la secuencia de pasos, conducirá a una mejor comprensión del proceso enseñanza-aprendizaje en el estudiante.
- 2) Desde el punto de vista de programación el hecho de seguir paso a paso la modelación conducirá a minimizar los errores de interpretación y programación de los mismos y con esto, es posible reducir los tiempos en la realización de programas.

- 3) El hecho de que en los lenguajes de alto nivel sea posible simplificar líneas de programación por medio de funciones, implica, por un lado, reducir el código de programación y, por otro, que desde el punto de vista pedagógico los estudiantes se ven limitados a entender el programa.

Es necesario, por lo tanto, evaluar las cuestiones de pedagogía con las simplificaciones en los programas.

I.8 Resumen de modelos programados en otros lenguajes

El lenguaje de programación simbólica ha sido usado para solucionar y simular modelos de robots y mecanismos. Por ejemplo, en [9] se simuló los movimientos de una celda de manufactura en Mathematica. También en [10,11] programó y simuló un robot paralelo, como el analizado en estas tesis, en Matemática. Por otro lado, en [12] se modelaron dos robots, uno de dos grados de libertad y otro de 3GDL usados para la intercepción de trayectorias bidimensionales y tridimensionales, en Mathematica.

Por otro lado, en [13] se usó Mathematica para modelar y simular un mecanismo de cuatro barras y un robot de 2GDL. En [14] se usó Mathematica para simular problemas de evasión de obstáculos en plano.

También en [15] se usó Mathematica y Ensamblador para simular y controlar un prototipo de robot paralelo. En [16] se usó DELPHI para simular y controlar un prototipo de robot de 2GDL para simular y controlar un problema de evasión de obstáculos en el plano.

CAPÍTULO 1

La modelación cinemática y la síntesis de mecanismos

Introducción. En este capítulo se discute el problema de la cinemática de multicuerpos rígidos, así como el problema de síntesis. El objetivo es proporcionar una visión general de dichos problemas, con el propósito de simplificar la comprensión de los modelos cinemáticos del robot paralelo y del mecanismo de cuatro barras estudiados y programados en este trabajo de tesis.

1.1 El problema de la mecánica clásica

El análisis del comportamiento mecánico de robots y mecanismos considerados como multicuerpos rígidos en movimiento debe, partir, en caso mas general, del planteamiento del problema de la mecánica clásica; Esto es [17]:

“El problema de la mecánica clásica consiste en analizar y/o modelar el comportamiento mecánico del medio que nos rodea”

Las restricciones fundamentales que, como todo problema deben indicarse, son las siguientes:

- 1).- El medio es continuo.
- 2).- El medio posee masa.

La restricción de “medio continuo” es en realidad una restricción puramente matemática que implica el uso (hasta hoy en día) de funciones continuas en el modelado del comportamiento mecánico [18].

Para el caso de la restricción en la que el medio debe poseer masa, dicha propiedad es usada para formular la siguiente hipótesis fundamental [17]:

“El comportamiento mecánico del medio que nos rodea satisface las leyes de Newton”

Como es bien sabido, las premisas o acciones básicas del problema de la mecánica clásica son precisamente las leyes de Newton; estas son:

- 1).- Ley de la Inercia.
- 2).- Leyes de balance.
- 3).- Principio de acción y reacción.

El proceso de sistematización del problema de la mecánica clásica conducirá a generar los modelos cinemáticos y dinámicos de robots y mecánicos usando la secuencia lógica (Proceso de análisis de lo general a lo particular).

En este trabajo de tesis se usará el proceso inductivo cual consiste en modelar el problema puramente cinemático de lo particular a lo general; es decir, se empezará por analizar el desplazamiento, luego la velocidad, posteriormente la aceleración y finalmente la trayectoria.

1.2.- El problema de la cinemática

En esta sección se discute brevemente el problema de la cinemática de multicuerpos usando para este propósito la segunda ley de Newton, esto es:

- 1) .- La cantidad de movimiento lineal es igual a la suma de las fuerzas.
- 2).- La cantidad de movimiento angular es igual a la suma de los momentos.

De acuerdo con las proposiciones definidas anteriormente, los elementos primitivos de la mecánica clásica son [17]:

- 1).- Fuerzas.
- 2).- Cuerpos.
- 3).- Desplazamientos.

Dichos elementos están relacionados mediante la siguiente expresión:

$$\frac{d}{dt}(m \cdot v) = \Sigma F$$

Aquí, “m” es la masa del cuerpo o sistemas de cuerpos “v” es la velocidad y F es un sistema de fuerzas. Nótese que por el principio de la conservación de la masa, la expresión anterior se reduce a;

$$\frac{d}{dt}(v) = \Sigma F$$

pues, $\frac{d}{dt}(m) = 0$

Esta última ecuación se puede escribir de la manera siguiente:

$$F = m \cdot a$$

siendo “a” la aceleración del cuerpo.

En realidad el problema de la cinemática está implícito en el problema de la mecánica clásica, es decir,

“Analizar el comportamiento mecánico del medio que nos rodea”

Para reducir el problema de la mecánica al problema puramente cinemático debe introducirse la siguiente restricción:

“En el problema de la cinemática no se incluyen las fuerzas que generan el movimiento”

Esta restricción conduce la siguiente definición:

El problema de la cinemática consiste en analizar el movimiento de un cuerpo o sistema de cuerpos sin considerar las fuerzas que lo producen”.

El hecho de no considerar las fuerzas en el problema de la cinemática hace que el estudio se centre en analizar los siguientes problemas.

- 1).- El desplazamiento.
- 2).- La velocidad.
- 3).- La aceleración.
- 4).- La trayectoria.

Dichos Problemas están todos relacionados .

1.3.- Cuerpos rígidos

Uno de los elementos primitivos del problema de la mecánica clásica es el cuerpo o sistemas de cuerpos.

Dichos cuerpos en el mas sentido real, son deformables, se expansionan o se fracturan. La restricción de medio continuo conduce a considerar que los cuerpos no se fracturan o en otras palabras que el medio conserva su frontera interior durante el movimiento o bajo un sistema de fuerzas.

En el análisis de robots y mecanismos tradicionalmente se ha considerado otra restricción más asociada con los cuerpos de los cuales se componen. Dicha restricción es la siguiente [10]:

“Los cuerpos son rígidos”

El hecho de que un cuerpo considerado sea rígido o indeformable se refiere a: si se define sobre el cuerpo una distancia entre dos puntos, dicha distancia se preservará antes y después del movimiento.

La restricción de cuerpo rígido es en realidad matemática.

1.4.- Sistemas de cuerpos rígidos acoplados

Los robots y mecanismos son generalmente conocidos como sistemas de cuerpos rígidos acoplados [10]. Y se idealizan usando el concepto de cadena cinemática.

Un sistema de cuerpos rígidos es un sistema de cuerpos interconectados por dispositivos llamados comúnmente juntas.

Los sistemas o cadenas cinemáticas pueden estar empotradas a la tierra o sea libres de moverse. Dos tipos de cadenas cinemáticas se usan para modelar los robots y mecanismos [9].

- 1).- Cadenas cerradas.
- 2).- Cadenas abiertas.

Una cadena es cerrada si el extremo final de un eslabón (o cuerpo) está conectado con otro eslabón restringiendo el movimiento del primero. Este tipo de

cadena es usada para representar los mecanismos. De hecho, la estructura de un robot paralelo es también considerada como un sistema de cadenas cerradas.

En las cadenas abiertas el extremo final de un eslabón es libre de moverse. La figura 1.1 a, b, muestra los dos tipos de cadenas cinemáticas antes descritas.

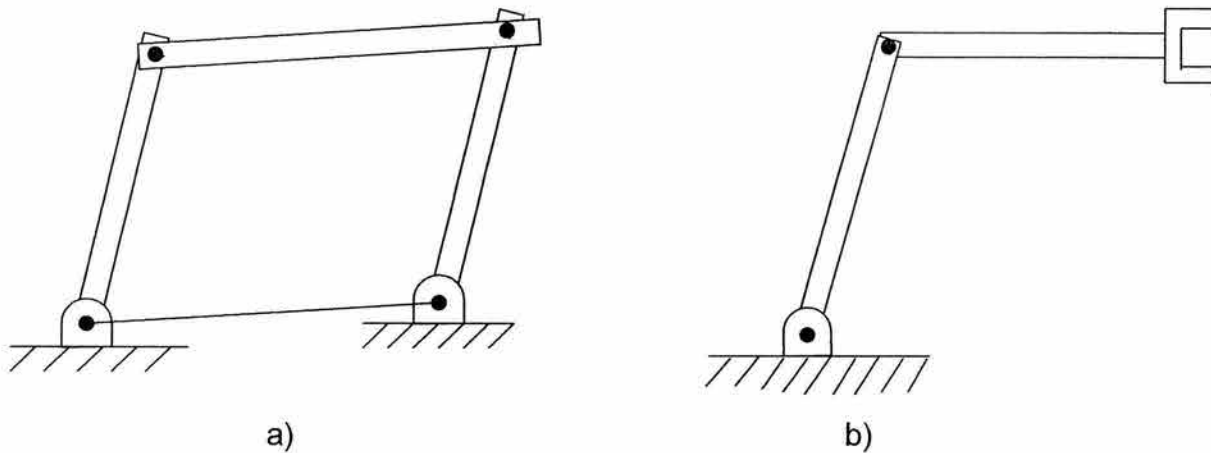


Figura 1.1 Tipos de cadenas cinemáticas; a) cerrada, b) abierto

1.5.- Dos configuraciones de análisis cinemático

Para analizar el comportamiento cinemático de un cuerpo o un sistema de cuerpos rígidos acoplados se procede de la siguiente manera [2,3,4,9]:

- 1).- Estudiar el multicuerpo en su configuración inicial; es decir, antes de iniciar su movimiento.
- 2).- Estudiar el multicuerpo en la configuración final; es decir, después de haber realizado el movimiento.
- 3).- Analizar la transición cinemática entre ambas configuraciones.

Todo multicuerpo debe ser referenciado a un sistema de coordenadas y, posteriormente, caracterizado en su posición inicial. En otras palabras, se plantea un modelo con el cual se determine cada una de las coordenadas de los puntos que componen el multicuerpo medidas desde un sistema fijo inercial. En este proceso, el sistema de cuerpos debe estar fijo en el tiempo.

La posición fija del multicuerpo en el tiempo y referenciado, es llamada "inicial" o configuración de referencia o configuración no deformada (en el sentido de rotaciones y translaciones) [2,3,4,9].

Supóngase ahora que, el multicuerpo es movido por alguna acción de su configuración inicial o una nueva posición la cuál es fijada en el tiempo y referencia al sistema de coordenadas fijo. La nueva posición es llamada "configuración deformada".

El análisis de la configuración deformada consiste en determinar las nuevas coordenadas de los puntos de interés asociados con el multicuerpo en la configuración deformada tomando como base el modelo de la configuración no deformada o inicial.

Es importante señalar que tanto la posición inicial como la deformada no dependen (en este trabajo) del tiempo.

Por último se discutirán algunas consideraciones sobre la transición cinemática entre ambas configuraciones.

Los elementos primitivos del problema cinemático son: 1).- cuerpos o puntos, 2).- desplazamiento, 3).- velocidad, 4).- aceleración y 5).- trayectoria. Todos estos elementos deben estar relacionados con el concepto de "Transición cinemática" el cual se define de la manera siguiente:

“ Una transición cinemática es el movimiento de un cuerpo o sistema de cuerpos definidos de la configuración no deformada a la deformada. La transición o movimiento, como es bien sabido, depende del tiempo”.

El análisis de la transición cinemática responde a la pregunta: ¿Cómo paso en el tiempo el multicuerpo de una posición inicial a una final?

Para analizar un movimiento se procede de la manera siguiente:

1).- Modelar la configuración no deformada.

2).- Modelar la configuración deformada.

3).- Usar funciones del tipo $\gamma : J \rightarrow V$ donde J es un intervalo de tiempo y V un espacio vectorial, para caracterizar, en función del tiempo, la configuración deformada.

4).- Derivar, con respecto al tiempo, el modelo en la configuración deformada del peso anterior, para determinar el modelo de velocidad.

5).- Derivar con respeto al tiempo el modelo de velocidad para determinar el modelo de aceleración.

6).- Definir una trayectoria y aplicar los pasos 3), 4), 5).

Es importante señalar que los pasos descritos anteriormente, están asociados con un proceso de análisis del tipo temporal.

La figura 1.2, muestra un sistema de cuerpos definido en dos configuraciones y caracterizado por una transición cinemática.

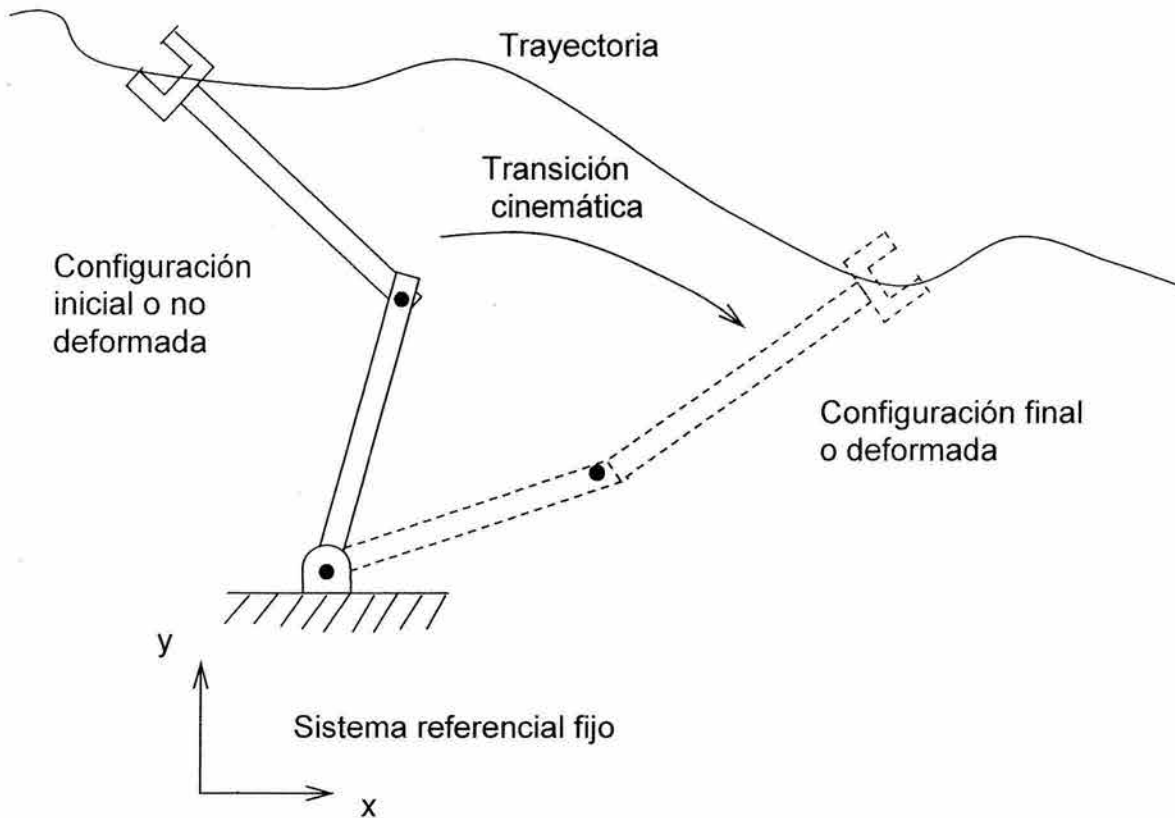


Figura 1.2 Caracterización de una transición cinemática

1.6.- El problema inverso y el problema directo

En esta sección se discuten algunos aspectos importantes relacionados con los problemas cinemáticos directo e inverso. Antes de entrar en discusión, es importante señalar que, generalmente, el desplazamiento de un sistema de cuerpos se puede dar de las siguientes tres formas [2,3,4,9,10,11]:

- 1).- Rotación .
- 2).- Traslación.
- 3).- Combinación de rotación-traslación.

Para el caso de una rotación, el movimiento de un cuerpo está en función de un desplazamiento angular y un eje de rotación. Una rotación se caracteriza por el desplazamiento angular de un cuerpo entre dos configuraciones o, más bien dicho, de un punto a otro. El movimiento caracterizado por una rotación y una translación combina las características intrínsecas de la rotación pura y translación pura.

Para poder explicar los problemas directo e inverso, considere el siguiente caso:

“Un manipulador compuesto de dos eslabones rígidos conectados, requiere ejecutar una tarea sobre una trayectoria determinada. Los eslabones son movidos por actuadores que producen rotaciones”.

La figura 1.3, muestra el manipulador compuesto por dos eslabones rígidos:

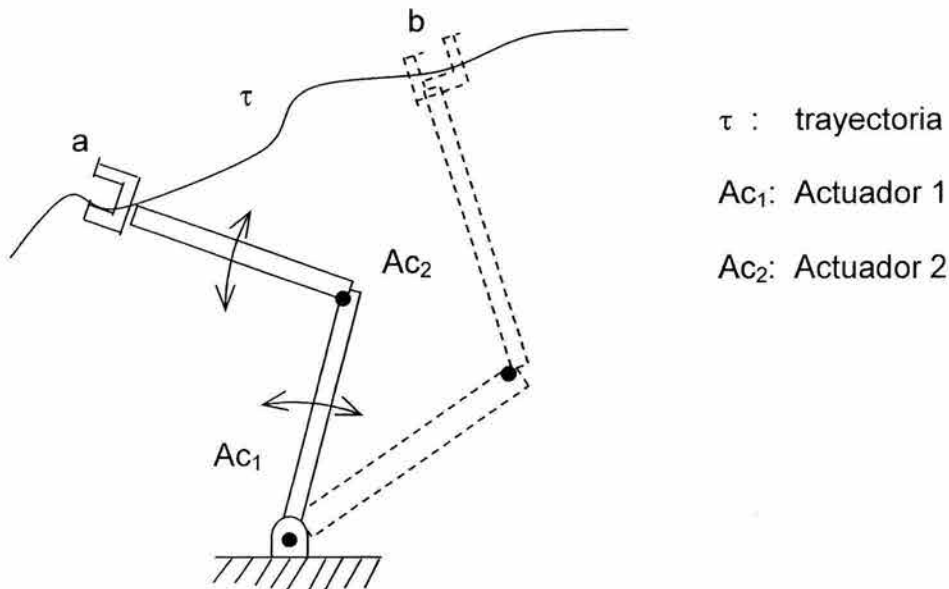


Figura 1.3. Manipulador de 2 GDL

El problema directo se formula de la manera siguiente:

“Si se conocen los desplazamientos angulares de los actuadores y los ejes de rotación, encuéntrase las coordenadas del punto “a” o el punto “b”.

El problema inverso se formula como sigue:

“Si se conocen las coordenadas del punto “a” o “b”, encuentrese los desplazamientos angulares de los motores y los ejes de rotación”.

Cabe mencionar que, para formular ambos problemas se requiere de un modelo de posición, ya sea en la configuración no deformada o en la configuración deformada.

El problema inverso para el caso del modelo de posición, consiste en determinar las variables angulares que requieren los actuadores para satisfacer una trayectoria deseada. Por otro lado, el problema directo es la antítesis (lo contrario) del problema inverso.

Finalmente, en los modelos de velocidad y aceleración deben formularse sus problemas directos e inversos; esto es:

1).- Problema inverso de velocidad: “Conocidas las velocidades lineales de un punto de interés, encuentre las velocidades angulares de los actuadores.

2).- Problema directo de velocidad: “Conocidas las velocidades angulares de los actuadores, encuentre la velocidad lineal de punto de interés”.

3).- Problema inverso de aceleración: “Conocida la aceleración lineal del punto de interés, encuentre las aceleraciones angulares de los actuadores”.

4).- Problema directo de aceleración: “Conocidas las aceleraciones angulares de los actuadores, encuentrese la aceleración lineal del punto de interés”.

Nota: En la formulación de los problemas directos e inversos de posición, velocidad y aceleración, no necesariamente se contraponen la cuestión lineal y angular.

1.7.- El problema de síntesis de mecanismos

Los mecanismos son estructuras formadas por eslabones rígidos caracterizados, cinemáticamente por cadenas cerradas. Estos elementos estructurales se usan para realizar movimiento especiales en máquinas o dispositivos. Los mecanismos pueden ser usados para tareas simples como: exprimidores de jugos o limpia parabrisas o tareas complejas como el cierre o para accionar movimientos de los trenes de aterrizaje.

Para estudiar el comportamiento cinemático de los mecanismos se usan dos procesos:

- 1).- El proceso de análisis.
- 2).- El proceso de síntesis.

El análisis de un mecanismo, consiste en modelar la posición, la velocidad y la aceleración de dicho mecanismo, usando la configuración no deformada y la deformada. Para este caso, son conocidas las dimensiones principales de los eslabones que componen el mecanismo [3,9,19].

El proceso de síntesis consiste en determinar las dimensiones principales de los eslabones que componen un mecanismo el cual debe satisfacer ciertas consideraciones cinemáticas. Así, se puede modelar la síntesis de posición, de velocidad y aceleración.

En el diseño y construcción de mecanismos, los procesos de análisis y síntesis están intrínsecamente relacionados, pues por un lado se determina las dimensiones de los eslabones y, por otro, el movimiento de los eslabones que componen el mecanismo.

Por otro lado, existen tres tipos de problemas de síntesis [3,13]:

- 1).- Generación de función.
- 2).- Conducción de cuerpo rígido.
- 3).- Entrada salida.

En este trabajo de tesis, se estudiará un problema de síntesis para conducción de cuerpo rígido, 4 puntos de precisión.

1.8.- Algunas consideraciones sobre las metodologías usadas para construir modelos cinemáticos

Para modelar el comportamiento cinemático de robots y mecanismos, diversas metodologías han sido utilizadas. Los números complejos en su representación exponencial se han usado, tradicionalmente, para modelar el movimiento plano de mecanismos. Por otro lado, los parámetros de Denavit-Hartenberg se utilizan para modelar los robots que se mueven en el espacio [20].

Recientemente, se han parametrizado y sistematizado las rotaciones y reflexiones en el plano caracterizados en el espacio vectorial de los números complejos [8]. De dicha sistematización se generaron dos rotaciones y dos reflexiones. También, en un trabajo desarrollado por [21] se sistematizó el álgebra de los cuaterniones con lo cual se pueden modelar robots y mecanismos tanto en el plano como en el espacio.

En este trabajo de tesis se usará la rotación usual definida en el espacio de los números complejos para modelar el comportamiento cinemático de un robot paralelo y un problema de síntesis para conducción de cuerpo rígido relacionado con un mecanismo de cuatro barras.

1.9.- Descripción de cadenas cinemáticas robot paralelo y mecanismo

En esta sección se presenta los sistemas articulados de cuerpos rígidos las cuales serán modelados en este trabajo de tesis [2,10,15].

El robot paralelo motivo de estudio en este trabajo es mostrado en la figura 1.4 y está formado por ocho eslabones rígidos incluyendo la tierra T del sistema.

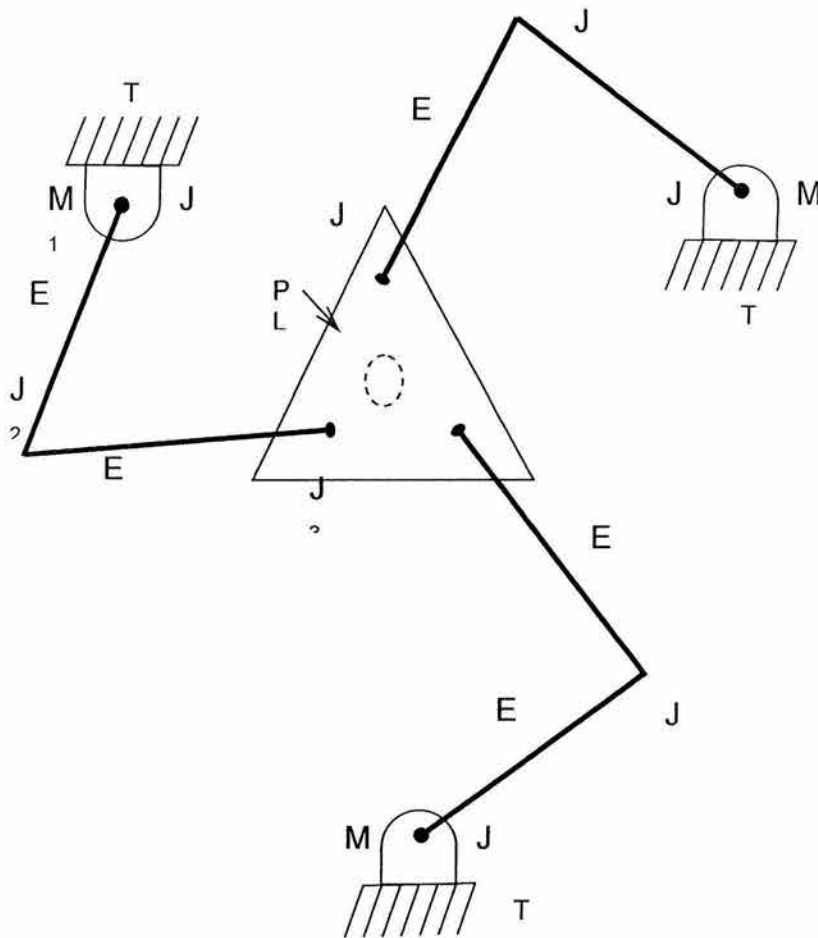


Figura 1.4.- El robot paralelo

El eslabón PL es llamado “plataforma móvil ” y el punto PL mostrado en la figura 1.3 es el punto terminal.

El estudio cinemático del robot paralelo consiste en:

- 1).- Modelar la posición en dos configuraciones y formular los problemas directo e inverso.
- 2).- Modelar la velocidad en la configuración deformada y formular los problemas directo e inverso.
- 3).- Modelar la aceleración en la configuración deformada y formular los problemas directo e inverso.
- 4).- Modelar una trayectoria de operación.
- 5).- Programar y simular los modelos resultantes.

Para el caso del problema de síntesis, se estudiará un mecanismo de cuatro barras [3]. El problema consiste en encontrar las dimensiones de los eslabones que componen el mecanismo tal que el eslabón acoplador pase por 4 puntos de precisión preescritos a cuatro orientaciones como se muestra en la figura 1.5.

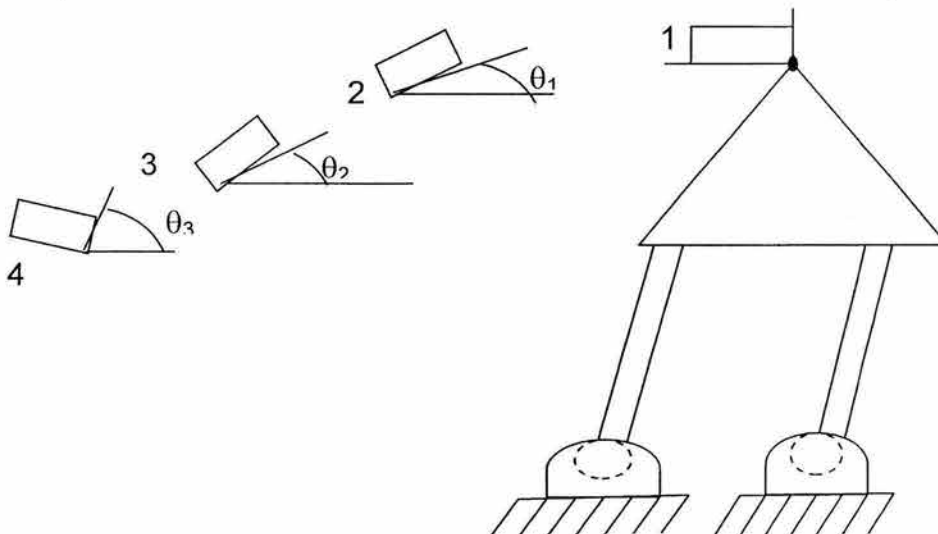


Figura 1.5.- Mecanismo de cuatro barras y 4 puntos de precisión

CAPÍTULO 2

Modelos de posición de un robot paralelo, programación y simulación

Introducción.- En este capítulo se propone una metodología para construir los modelos de posición relacionados con un robot paralelo planar tipo RRR.

Cabe señalar que solo se usará la metodología en su caso más general y descriptivo para generar los modelos, pues en el trabajo desarrollado en [2] los modelos de posición del robot fueron sistematizados. El objetivo principal de la metodología es extraer la información mínima suficiente para generar y programar en VISUAL BASIC V6 [1] los modelos de posición del robot.

2.1.- Metodología para construir los modelos de posición

Modelación del problema inverso (Configuración no deformada) [10]:

Paso 1).- Definir la arquitectura del robot, el espacio de movimiento y los elementos que lo componen.

Paso 2).- Definir la configuración no deformada y asociar vectores de posición sobre los eslabones del robot y vectores relativos con un sistema inercial fijo.

Paso 3).- Definir sobre la plataforma del robot, relaciones geométricas y cinemáticas.

Paso 4).- Encontrar las expresiones vectoriales que permiten generar un modelo de posición, integrando puntos de interés y los vectores asociados con los eslabones.

Paso 5).- Asociar sistemas locales móviles sobre los eslabones que componen el robot y expresar las ecuaciones de posición del paso 2 en términos de dichas bases móviles. Definir las ecuaciones del paso 4) en términos de las bases móviles.

Paso 6).- Usar complejos de norma unitaria y la rotación usual en \mathfrak{R}^2 para expresar las rotaciones de la base inercial sobre los bases móviles.

Paso 7).- Expresar las ecuaciones del paso 5) en términos de la base inercial y de los complejos asociados.

Paso 8).- Definir las ecuaciones de norma unitaria de los complejos asociados con las rotaciones.

Paso 9).- Determinar las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y los componentes de las rotaciones. Graficar los desplazamientos angulares de referencia.

Paso 10).- Formular el problema cinemático inverso usando las ecuaciones de los pasos 7) y 8).

Pasos para plantear el problema directo (Configuración no deformada) [10]:

11).- Verificar si con el modelo de posición obtenido en los pasos 7) y 8) es posible formular el problema directo. Si es posible, entonces formular dicho problema.

12).- Si no es posible formular el problema directo en el modelo de posición generar otro modelo.

13).- Definir nuevos vectores de posición sobre los eslabones del robot.

14).- Construir ecuaciones de lazo cerrado entre las cadenas cinemáticas independientes las cuales deben integrar todos los vectores de posición definidos por el paso 13). Además, las ecuaciones de lazo deben estar referidas a un punto de interés localizado en los eslabones del robot.

15).- Asociar sistemas de referencias móviles sobre los nuevos vectores de posición (en el caso de que halla nuevos vectores) y expresar dichos vectores en términos de las bases móviles.

16).- Expresar las ecuaciones de posición del paso 13) en términos de los sistemas móviles usando los pasos 5) y 13).

17).- Expresar las rotaciones del paso 15) en términos de complejos y la base inercial fija. Además, se deben proponer las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y las bases locales.

18).- Expresar las ecuaciones de posición del paso 16) usando los pasos 7) y 17).

19).- Formular el problema directo usando las expresiones de los pasos 8) y 18).

Pasos para formular el problema inverso (Configuración deformada)

20).- Definir la configuración deformada del robot en estudio y asociar vectores de posición (como en el paso 2).

21).- Definir sobre la plataforma del robot, relaciones geométricas y cinemáticas en la configuración deformada.

22).- Encontrar las expresiones vectoriales que permitan generar un modelo de posición, integrando puntos de interés y los vectores asociados con los eslabones referente a la posición deformada.

23).- Asociar al sistemas bases móviles sobre los eslabones que componen el robot y expresar los de posición del paso 2) en términos de dichas bases móviles. Definir las ecuaciones del paso a) en términos de las bases deformadas .

24).- Usar complejos de norma unitaria y la rotación usual en \mathfrak{R}^2 para expresar las rotaciones de la base inercial sobre los bases móviles , los nuevos complejos están relacionados con las bases de este paso.

25).- Expresar las ecuaciones del paso 22) en términos de la base inercial y de los complejos asociados.

26).- Definir las ecuaciones de norma unitaria de los complejos asociados con las rotaciones.

27).- Determinar las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y los componentes de las rotaciones. Y graficar los desplazamientos angulares de referencia.

28).- Formular el problema cinemático inverso usando las ecuaciones de los pasos 25) y 26).

Pasos para formular el problema directo [2,10]:

29).- Verificar si con el modelo de posición obtenido en los pasos 25) y 26) es posible formular el problema directo. Si es posible, entonces formular dicho problema.

30).- Si no es posible formular el problema directo con el modelo de posición generar otro modelo.

- 31).- Definir nuevos vectores de posición sobre los eslabones del robot.
- 32).- Construir ecuaciones de lazo cerrado entre las cadenas cinemáticas independientes las cuales deben integrar todos los vectores definidos. Además, las ecuaciones de lazo deben estar referidas a un punto de interés localizado en los eslabones del robot.
- 33).- Asociar sistemas de referencias móviles sobre los nuevos vectores de posición (en el caso de que halla nuevos vectores) y expresar dichos vectores en términos de las bases móviles.
- 34).- Expresar las ecuaciones de posición del paso 13) en términos de los sistemas móviles usando los pasos 5) y 13).
- 35).- Expresar las rotaciones del paso 15) en términos de complejos y la base inercial fija. Además, se deben proponer las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y las bases locales.
- 36).- Expresar las ecuaciones de posición del paso 16) usando los pasos 7) y 17).
- 37).- Igual que el paso 19). Aquí se usan las expresiones de los incisos 26 y 36).

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
E1	Eslabón E1
E2	Eslabón E2
E3	Eslabón E3
E	Eslabones acopladores
J	Uniones de eslabones
M	Motores actuadores
P	Plataforma de acoplamiento
T	Tierra del sistema
T2	Junta que conecta E ₁ con T

Tabla 2.1 Descripción de elementos

Paso 2).- Los vectores de posición y del sistema inercial fijo se muestran en la figura 2.2

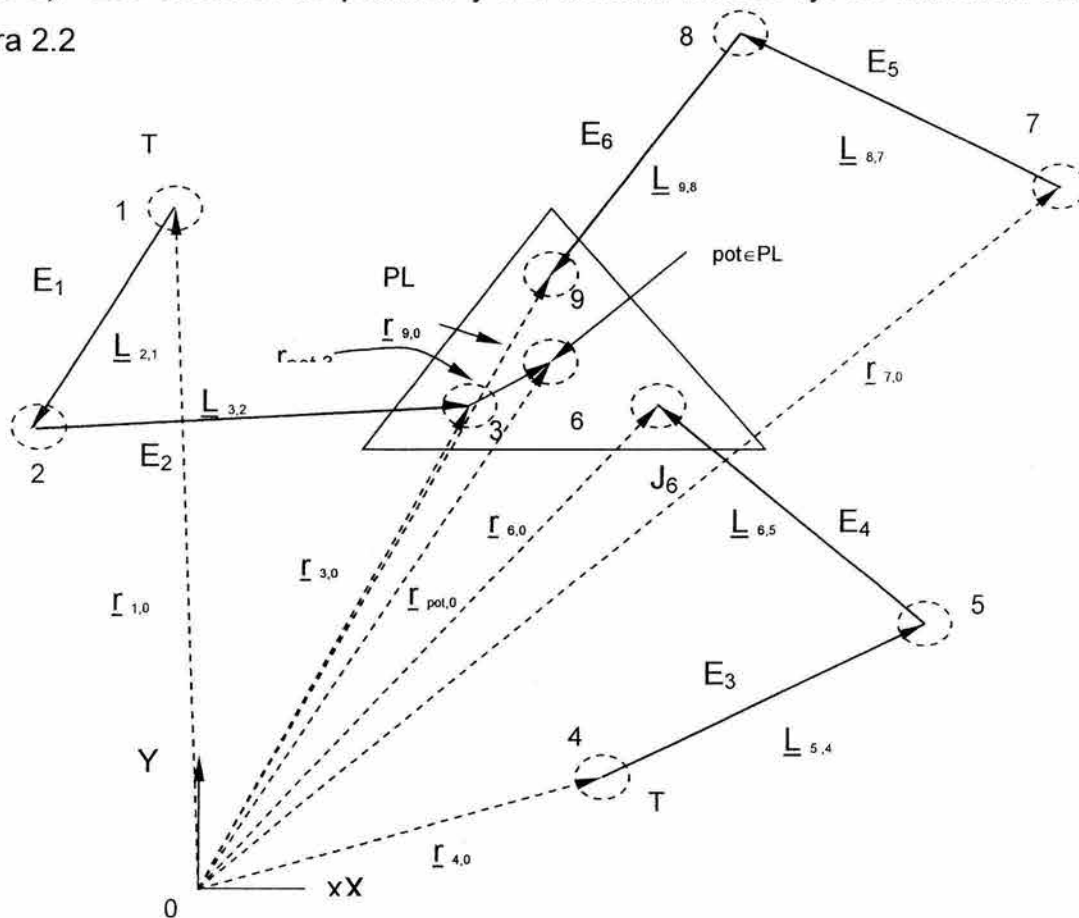


Figura 2.2 Vectores de posición en la configuración no deformada

Paso 3).- Las relaciones cinemáticas y geométricas definidas sobre la plataforma del robot son:

$$r'_{pot,0}(t) = r_{1,0}(t_0) + l_{2,1} \cdot \underline{a}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \underline{a}_1''(t) + l_{pot,3} \cdot \underline{a}_1'''(t)$$

Aquí, θ_{pot} es el ángulo medido desde el eje x y la del vector \underline{L}_{pot} , es el ángulo definido entre los aristas del triángulo de la plataforma.

Paso 4).- las expresiones vectoriales que definen la posición de los puntos (3), (6) y (9) medidas desde el punto "0" son los siguientes:

- 1) $r_{3,0} = r_{1,0} + \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{3,2}$
- 2) $r_{6,0} = r_{4,0} + \underline{L}_{5,4} + \underline{L}_{6,5}$
- 3) $r_{9,0} = r_{7,0} + \underline{L}_{8,7} + \underline{L}_{9,8}$

Paso 5).- Los sistemas locales asociados con los eslabones del robot se muestran en la figura 2.3:

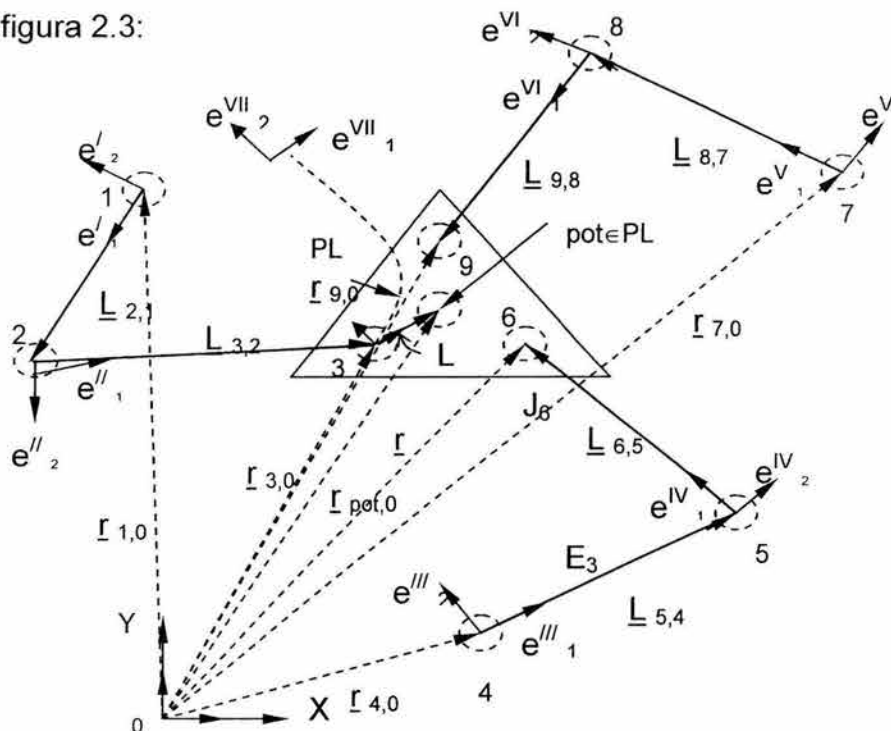


Figura 2.3 Sistemas locales sobre los eslabones

Por otro lado, los vectores de posición se escriben en términos de las bases de la manera siguiente:

- 1) $\underline{L}_{2,1} = l_{2,1} \bullet \underline{e}_j'$; $\underline{L}_{3,2} = l_{3,2} \bullet \underline{e}_j''$
- 2) $\underline{L}_{5,4} = l_{5,4} \bullet \underline{e}_j'''$; $\underline{L}_{6,5} = l_{6,5} \bullet \underline{e}_j^V$
- 3) $\underline{L}_{8,7} = l_{8,7} \bullet \underline{e}_j^V$; $\underline{L}_{9,8} = l_{9,8} \bullet \underline{e}_j^{VI}$

Paso 6).- Los complejos de norma unitaria asociados con las rotaciones son: p, q, r, s, t, u, v. Por otro lado, las rotaciones de la base inercial sobre las bases móviles se expresan de la manera siguiente:

- 1) $\underline{e}_1' = \rho(p, \underline{e}_1) = p * \underline{e}_1$
- 2) $\underline{e}_1'' = \rho(q, \underline{e}_1) = q * \underline{e}_1$
- 3) $\underline{e}_1''' = \rho(r, \underline{e}_1) = r * \underline{e}_1$
- 4) $\underline{e}_1^V = \rho(s, \underline{e}_1) = s * \underline{e}_1$
- 5) $\underline{e}_1^V = \rho(t, \underline{e}_1) = t * \underline{e}_1$
- 6) $\underline{e}_1^{VI} = \rho(u, \underline{e}_1) = u * \underline{e}_1$
- 7) $\underline{e}_1^{VII} = \rho(v, \underline{e}_1) = v * \underline{e}_1$

Paso 7).- Las ecuaciones de posición en términos de la base inicial y de los números complejos asociados son los siguientes:

- 1) $\underline{r}_{3,0} = \underline{r}_{1,0} + l_{2,1} \bullet \{p * \underline{e}_1\} + l_{3,2} \bullet \{q * \underline{e}_1\}$
- 2) $\underline{r}_{6,0} = \underline{r}_{4,0} + l_{5,4} \bullet \{r * \underline{e}_1\} + l_{6,5} \bullet \{s * \underline{e}_1\}$
- 3) $\underline{r}_{9,0} = \underline{r}_{7,0} + l_{8,7} \bullet \{t * \underline{e}_1\} + l_{9,8} \bullet \{u * \underline{e}_1\}$

Paso 8).- Las ecuaciones de norma unitaria de los complejos son:

$$1) \quad p = \{p_0, p_1\} \quad ; \quad \|p\| = p_0^2 + p_1^2 = 1$$

$$2) \quad q = \{q_0, q_1\} \quad ; \quad \|q\| = q_0^2 + q_1^2 = 1$$

$$3) \quad r = \{r_0, r_1\} \quad ; \quad \|r\| = r_0^2 + r_1^2 = 1$$

$$4) \quad s = \{s_0, s_1\} \quad ; \quad \|s\| = s_0^2 + s_1^2 = 1$$

$$5) \quad t = \{t_0, t_1\} \quad ; \quad \|t\| = t_0^2 + t_1^2 = 1$$

$$6) \quad u = \{u_0, u_1\} \quad ; \quad \|u\| = u_0^2 + u_1^2 = 1$$

$$7) \quad v = \{v_0, v_1\} \quad ; \quad \|v\| = v_0^2 + v_1^2 = 1$$

Paso 9).- Las relaciones geométricas entre las rotaciones y los componentes de los complejos asociados son los siguientes:

$$1) \quad p_0 = \cos \theta_1 \quad ; \quad p_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_1$$

$$2) \quad q_0 = \cos \theta_2 \quad ; \quad q_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_2$$

$$3) \quad r_0 = \cos \theta_3 \quad ; \quad r_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_3$$

$$4) \quad s_0 = \cos \theta_4 \quad ; \quad s_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_4$$

$$5) \quad t_0 = \cos \theta_5 \quad ; \quad t_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_5$$

$$6) \quad u_0 = \cos \theta_6 \quad ; \quad u_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_6$$

$$7) \quad v_0 = \cos \theta_7 \quad ; \quad v_1 = \pm \operatorname{sen} \theta_7$$

La figura 2.4 muestra los desplazamientos angulares de referencia.

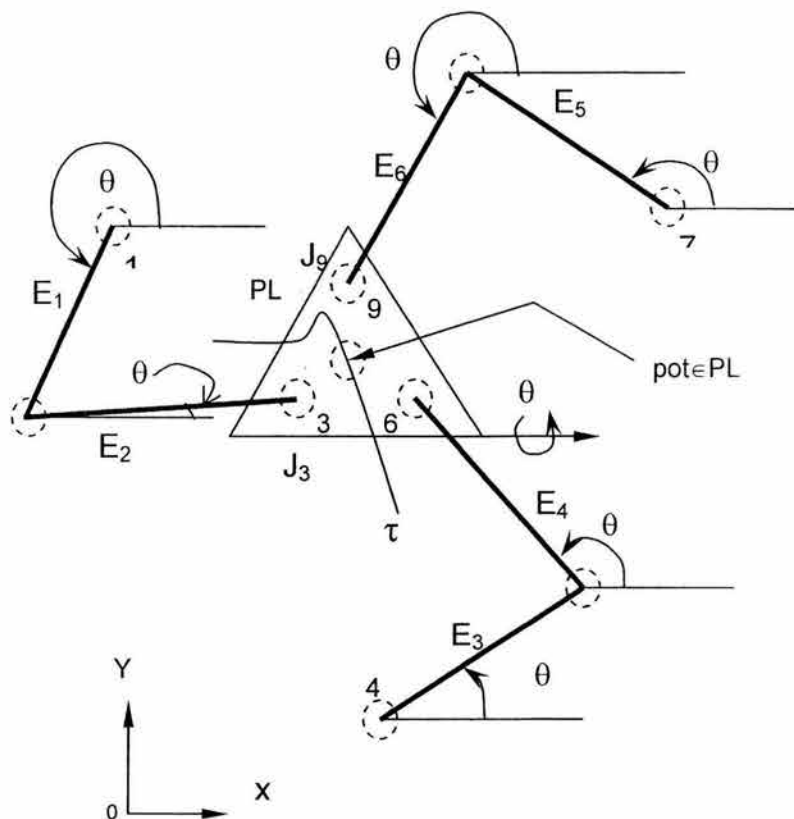


Figura 2.4 Desplazamientos angulares en la configuración no deformada

Paso 10).- La formulación del problema inverso en la configuración deformada es la siguiente[2,10]:

“Dados, $\underline{r}_{3,0} \in \mathbb{R}^2$, $\underline{r}_{6,0} \in \mathbb{R}^2$, $\underline{r}_{9,0} \in \mathbb{R}^2$, $\underline{r}_{1,0} \in \mathbb{R}^2$, $\underline{r}_{4,0} \in \mathbb{R}^2$, $\underline{r}_{7,0} \in \mathbb{R}^2$, $l_{2,1}$, $l_{3,2}$, $l_{5,4}$, $l_{6,5}$, $l_{8,7}$, $l_{9,8} \in \mathbb{R}^+$, encuentre: $\underline{p} = \{p_0, p_1\}$, $\underline{q} = \{q_0, q_1\}$, $\underline{r} = \{r_0, r_1\}$, $\underline{s} = \{s_0, s_1\}$, $\underline{t} = \{t_0, t_1\}$, $\underline{u} = \{u_0, u_1\}$; tal que las expresiones del paso 7 sean satisfechas

- 1) $p_0^2 + p_1^2 = 1$; $q_0^2 + q_1^2 = 1$
- 2) $r_0^2 + r_1^2 = 1$; $s_0^2 + s_1^2 = 1$
- 3) $t_0^2 + t_1^2 = 1$; $u_0^2 + u_1^2 = 1$ ”

Paso 14).- Las ecuaciones de lazo cerrado relacionadas con el modelo de posición son las siguientes:

- 1) $r_{3,0} = r_{1,0} + \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{3,2}$
- 2) $r_{3,0} = r_{4,0} + \underline{L}_{5,4} + \underline{L}_{6,5} + \underline{L}_{3,6}$
- 3) $r_{3,0} = r_{7,0} + \underline{L}_{8,7} + \underline{L}_{9,8} + \underline{L}_{3,9}$

o, equivalentemente:

- 1) $r_{1,0} + \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{3,2} \equiv r_{4,0} + \underline{L}_{5,4} + \underline{L}_{6,5} + \underline{L}_{3,6}$
- 2) $r_{1,0} + \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{3,2} \equiv r_{7,0} + \underline{L}_{8,7} + \underline{L}_{9,8} + \underline{L}_{3,9}$

Paso 15).- Los sistemas de referencia locales asociados con los nuevos vectores de posición son los siguientes:

- 1) $\underline{e}_j^{VIII} = \{\underline{e}_1^{VIII}, \underline{e}_2^{VIII}\}$
- 2) $\underline{e}_j^{IX} = \{\underline{e}_1^{IX}, \underline{e}_2^{IX}\}$

Por otro lado, los vectores de posición definidos sobre la plataforma se escriben en términos de las bases locales de la manera siguiente [2, 10]:

- 1) $\underline{L}_{3,6} = l_{3,6} \cdot \underline{e}_1^{VIII}$
- 2) $\underline{L}_{3,9} = l_{3,9} \cdot \underline{e}_1^{IX}$

La figura 2.6 muestra dichos sistemas referenciales.

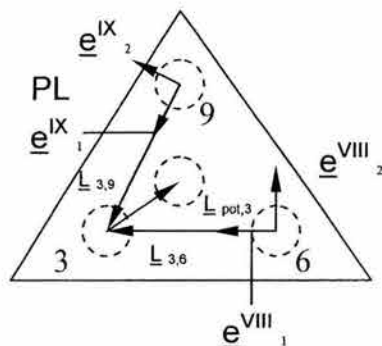


Figura 2.6 Definición de nuevos sistemas de referencia locales

Paso 16).- Las ecuaciones de lazo se escriben en términos de las bases locales de la manera siguiente:

$$1) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \cdot \underline{e}_1' + l_{3,2} \cdot \underline{e}_1'' - [r_{4,0} + l_{5,4} \cdot \underline{e}_1''' + l_{6,5} \cdot \underline{e}_1^{IV} + l_{3,6} \cdot \underline{e}_1^{VIII}] = \underline{0}$$

$$2) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \cdot \underline{e}_1' + l_{3,2} \cdot \underline{e}_1'' - [r_{7,0} + l_{8,7} \cdot \underline{e}_1^V + l_{9,8} \cdot \underline{e}_1^{VI} + l_{3,9} \cdot \underline{e}_1^{IX}] = \underline{0}$$

Paso 17).- Las rotaciones de las bases locales, definidas sobre la plataforma, se escriben en términos de la base inicial fija de la manera siguiente:

$$1) \quad \underline{e}_1^{VIII} = \rho(w, \underline{e}_1) = w * \underline{e}_1$$

$$2) \quad \underline{e}_1^{IX} = \rho(x, \underline{e}_1) = x * \underline{e}_1$$

Aquí w, x son dos complejos de norma unitaria. Por otro lado, las relaciones geométricas definidas entre los complejos $w, x \in \mathfrak{R}^2$ y las rotaciones son:

$$1) \quad w = \{w_0, w_1\} \quad ; \quad w_0 \in \mathfrak{R} \quad ; \quad w_0 = \cos \theta_8$$

$$w_1 \in \mathfrak{R} \quad ; \quad w_1 = \pm \text{sen } \theta_8$$

$$2) \quad x = \{x_0, x_1\} \quad ; \quad x_0 \in \mathfrak{R} \quad ; \quad x_0 = \cos \theta_9$$

$$x_1 \in \mathfrak{R} \quad ; \quad x_1 = \pm \text{sen } \theta_9$$

También existen relaciones rotacionales entre las bases $\underline{e}_1^{VII}, \underline{e}_1^{VIII}, \underline{e}_1^{IX} \in \mathfrak{R}^2$, éstas son:

$$1) \quad \underline{e}_1^{VIII} = \rho(w, \underline{e}_1^{VII}) = \rho(w, \rho(v, \underline{e}_1)) = w * v * \underline{e}_1$$

$$2) \quad \underline{e}_1^{IX} = \rho(x, \underline{e}_1^{VII}) = \rho(x, \rho(v, \underline{e}_1)) = x * v * \underline{e}_1$$

Paso 18).- Las ecuaciones de lazo cerrado se escriben en términos de la base inercial de la manera siguiente:

$$1) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \cdot \{p * \underline{e}_1\} + l_{3,2} \cdot \{q * \underline{e}_1\} -$$

$$-[r_{4,0} + l_{5,4} \cdot \{r * \underline{e}_1\} + l_{6,5} \cdot \{s * \underline{e}_1\} + l_{3,6} \cdot \{w * \underline{e}_1\}] = \underline{0}$$

$$2) \quad \underline{r}_{1,0} + l_{2,1} \cdot \{ p * \underline{e}_1 \} + l_{3,2} \cdot \{ q * \underline{e}_1 \} - \\ - [\underline{r}_{7,0} + l_{8,7} \cdot \{ t * \underline{e}_1 \} + l_{9,8} \cdot \{ u * \underline{e}_1 \} + l_{3,9} \cdot \{ x * \underline{e}_1 \}] = \underline{0}$$

Paso 19).- La formulación del problema directo en la configuración no deformada es[2,10]:

“Dados $p = \{p_0, p_1\}$, $r = \{r_0, r_1\}$, $t = \{t_0, t_1\}$, con $\|p\| = \|r\| = \|t\| = 1$, $\underline{r}_{1,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{r}_{4,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{r}_{7,0} \in \mathfrak{R}^2$, $w = \{w_0, w_1\}$, $x = \{x_0, x_1\}$ $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{3,6}, l_{3,9}, l_{pot,3} \in \mathfrak{R}^+$ encuentre $\underline{r}_{pot,0} \in \mathfrak{R}^2$, $q = \{q_0, q_1\}$, $s = \{s_0, s_1\}$, $u = \{u_0, u_1\}$, $v = \{v_0, v_1\}$, tal que las expresiones del paso 18 sean satisfechas y,

$$q_0^2 + q_1^2 = 1$$

$$s_0^2 + s_1^2 = 1$$

$$u_0^2 + u_1^2 = 1$$

$$v_0^2 + v_1^2 = 1”$$

2.4.- Modelación de la configuración deformada (Planteamiento del problema inverso)

En esta sección se aplican los pasos del 20) al 28) para modelar la posición del robot paralelo motivo de estudio, así como para formular el problema inverso en la configuración deformada.

Paso 20).- La figura 2.7 muestra la configuración deformada del robot paralelo, así como vectores de Posición asociado[2,10]:

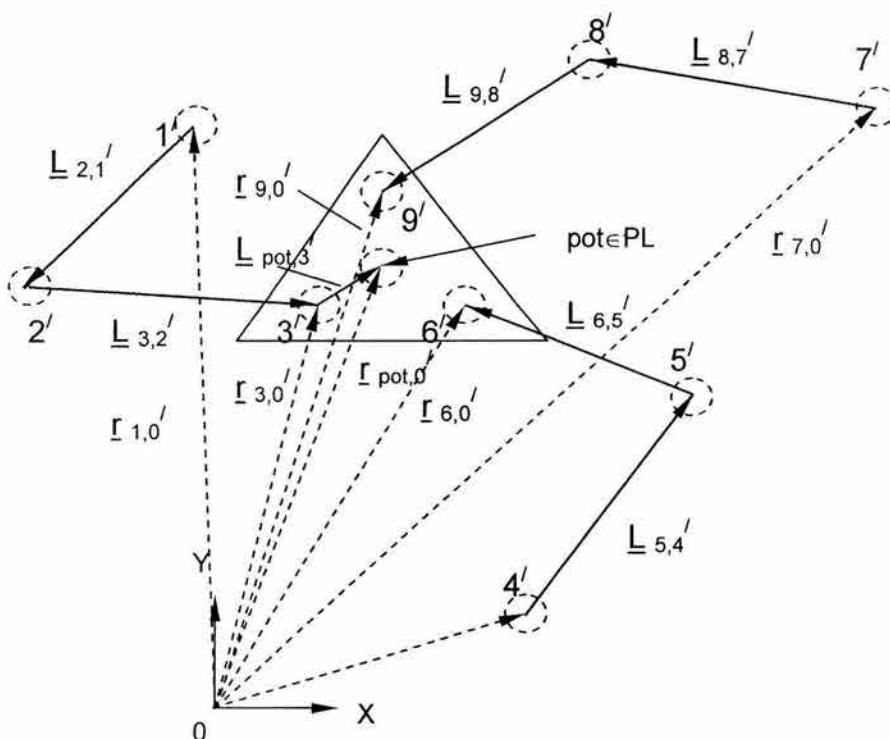


Figura 2.7 Vectores en la configuración deformada del robot paralelo

Paso 21).- Las relaciones geométricas y cinemáticas definidas sobre el robot son:

- 1) $r_{3,0} = (r_{3,0,x}, r_{3,0,y}) = (x_{pot,0} - l_{pot,3} \cos \theta_{pot}, y_{pot,0} - l_{pot,3} \sin \theta_{pot})$
- 2) $r_{6,0} = (r_{3,0,x} + l_{6,3} \cos (\theta_{pot} - \beta_{pot}), r_{3,0,y} + l_{6,3} \sin (\theta_{pot} - \beta_{pot}))$
- 3) $r_{9,0} = (r_{3,0,x} + l_{9,3} \cos (\theta_{pot} + \beta_{pot}), r_{3,0,y} + l_{9,3} \sin (\theta_{pot} + \beta_{pot}))$

Paso 22).- Las expresiones vectoriales de posición que caracterizan la configuración deformada del robot respecto al sistema cartesiano fijo son:

- 1) $\underline{r}'_{3,0} = \underline{r}_{1,0} + \underline{L}'_{2,1} + \underline{L}'_{3,2}$
- 2) $\underline{r}'_{6,0} = \underline{r}_{4,0} + \underline{L}'_{5,4} + \underline{L}'_{6,5}$
- 3) $\underline{r}'_{9,0} = \underline{r}_{7,0} + \underline{L}'_{8,7} + \underline{L}'_{9,8}$

Paso 23).- En la figura 2.8 se muestra los sistemas locales relacionados con la configuración deformada.

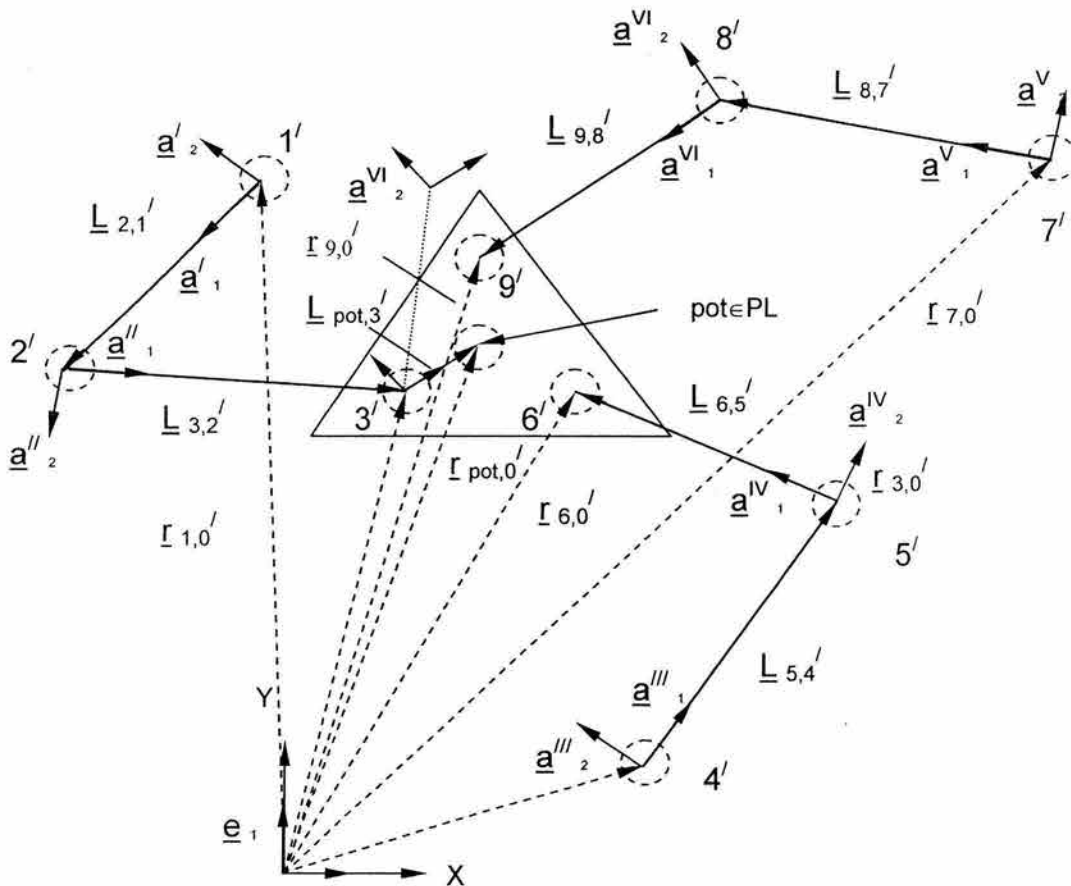


Figura 2.8 Caracterización de las bases locales en la configuración deformada

Por el otro lado, los vectores de posición deformados se escriben en términos de las bases locales de la manera siguiente[2, 10] :

- 1) $\underline{L}'_{2,1} = l'_{2,1} \cdot \underline{a}_j'$; $\underline{L}'_{3,2} = l'_{3,2} \cdot \underline{a}_j''$
- 2) $\underline{L}'_{5,4} = l'_{5,4} \cdot \underline{a}_j'''$; $\underline{L}'_{6,5} = l'_{6,5} \cdot \underline{a}_j^{IV}$
- 3) $\underline{L}'_{8,7} = l'_{8,7} \cdot \underline{a}_j^V$; $\underline{L}'_{9,8} = l'_{9,8} \cdot \underline{a}_j^{VI}$
- 4) $\underline{L}'_{\text{pot},3} = l'_{\text{pot},3} \cdot \underline{a}_j^{VII}$

Las ecuaciones de posición se pueden escribir en términos de las bases móviles; esto es:

- 1) $\underline{r}'_{3,0} = r_{1,0} + l_{2,1} \cdot \underline{a}_j' + l_{3,2} \cdot \underline{a}_j''$
- 2) $\underline{r}'_{6,0} = r_{4,0} + l_{5,4} \cdot \underline{a}_j''' + l_{6,5} \cdot \underline{a}_j^{IV}$
- 3) $\underline{r}'_{9,0} = r_{7,0} + l_{8,7} \cdot \underline{a}_j^V + l_{9,8} \cdot \underline{a}_j^{VI}$

Paso 24) Las relaciones entre las bases deformadas, las bases locales y la base inercial fija, se expresan en términos de los complejos unitarios; esto es:

- 1) $\underline{a}_1' = \rho(P, \underline{e}_1') = \rho(P, \rho(p, \underline{e}_1)) = P * p * \underline{e}_1$
- 2) $\underline{a}_1'' = \rho(Q, \underline{e}_1'') = \rho(Q, \rho(q, \underline{e}_1)) = Q * q * \underline{e}_1$
- 3) $\underline{a}_1''' = \rho(R, \underline{e}_1''') = \rho(R, \rho(r, \underline{e}_1)) = R * r * \underline{e}_1$
- 4) $\underline{a}_1^{IV} = \rho(S, \underline{e}_1^{IV}) = \rho(S, \rho(s, \underline{e}_1)) = S * s * \underline{e}_1$
- 5) $\underline{a}_1^V = \rho(T, \underline{e}_1^V) = \rho(T, \rho(t, \underline{e}_1)) = T * t * \underline{e}_1$
- 6) $\underline{a}_1^{VI} = \rho(U, \underline{e}_1^{VI}) = \rho(U, \rho(u, \underline{e}_1)) = U * u * \underline{e}_1$
- 7) $\underline{a}_1^{VII} = \rho(V, \underline{e}_1^{VII}) = \rho(V, \rho(v, \underline{e}_1)) = V * v * \underline{e}_1$

Aquí $P, G, R, S, T, U, V \in \mathfrak{R}^2$ son complejos de norma unitaria.

Paso 25).- Las ecuaciones de posición que definen la configuración deformada se escriben en términos de la base inicial de la manera siguiente:

- 1) $\underline{r}'_{3,0} = r_{1,0} + l_{2,1} \cdot \{P * p * \underline{e}_1\} + l_{3,2} \cdot \{Q * q * \underline{e}_1\}$
- 2) $\underline{r}'_{6,0} = r_{4,0} + l_{5,4} \cdot \{R * r * \underline{e}_1\} + l_{6,5} \cdot \{S * s * \underline{e}_1\}$
- 3) $\underline{r}'_{9,0} = r_{7,0} + l_{8,7} \cdot \{T * t * \underline{e}_1\} + l_{9,8} \cdot \{U * u * \underline{e}_1\}$

Paso 26).- Las ecuaciones de norma unitaria relacionadas con los números complejos son:

- 1) $P = \{P_0, P_1\}$; $\|P\| = 1$; $P_0^2 + P_1^2 = 1$
- 2) $Q = \{Q_0, Q_1\}$; $\|Q\| = 1$; $Q_0^2 + Q_1^2 = 1$
- 3) $R = \{R_0, R_1\}$; $\|R\| = 1$; $R_0^2 + R_1^2 = 1$
- 4) $S = \{S_0, S_1\}$; $\|S\| = 1$; $S_0^2 + S_1^2 = 1$
- 5) $T = \{T_0, T_1\}$; $\|T\| = 1$; $T_0^2 + T_1^2 = 1$
- 6) $U = \{U_0, U_1\}$; $\|U\| = 1$; $U_0^2 + U_1^2 = 1$
- 7) $V = \{V_0, V_1\}$; $\|V\| = 1$; $V_0^2 + V_1^2 = 1$

Paso 27).- Las relaciones geométricas entre los componentes de los complejos y las rotaciones son:

- 1) $\underline{r}'_{3,0} = \underline{r}_{1,0} + \underline{l}_{2,1} \cdot \{P \cdot p \cdot \underline{e}_1\} + \underline{l}_{3,2} \cdot \{Q \cdot q \cdot \underline{e}_1\}$
- 2) $\underline{r}'_{6,0} = \underline{r}_{4,0} + \underline{l}_{5,4} \cdot \{R \cdot r \cdot \underline{e}_1\} + \underline{l}_{6,5} \cdot \{S \cdot s \cdot \underline{e}_1\}$
- 3) $\underline{r}'_{9,0} = \underline{r}_{7,0} + \underline{l}_{8,7} \cdot \{T \cdot t \cdot \underline{e}_1\} + \underline{l}_{9,8} \cdot \{U \cdot u \cdot \underline{e}_1\}$

También,

$$\underline{r}'_{\text{pot},0} = \underline{r}_{1,0} + \underline{l}_{2,1} \cdot \{P \cdot p \cdot \underline{e}_1\} + \underline{l}_{3,2} \cdot \{Q \cdot q \cdot \underline{e}_1\} + \underline{l}_{\text{pot},3} \cdot \{V \cdot v \cdot \underline{e}_1\}$$

La figura 2.9 muestra los desplazamientos angulares $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7 \in \mathfrak{R}$

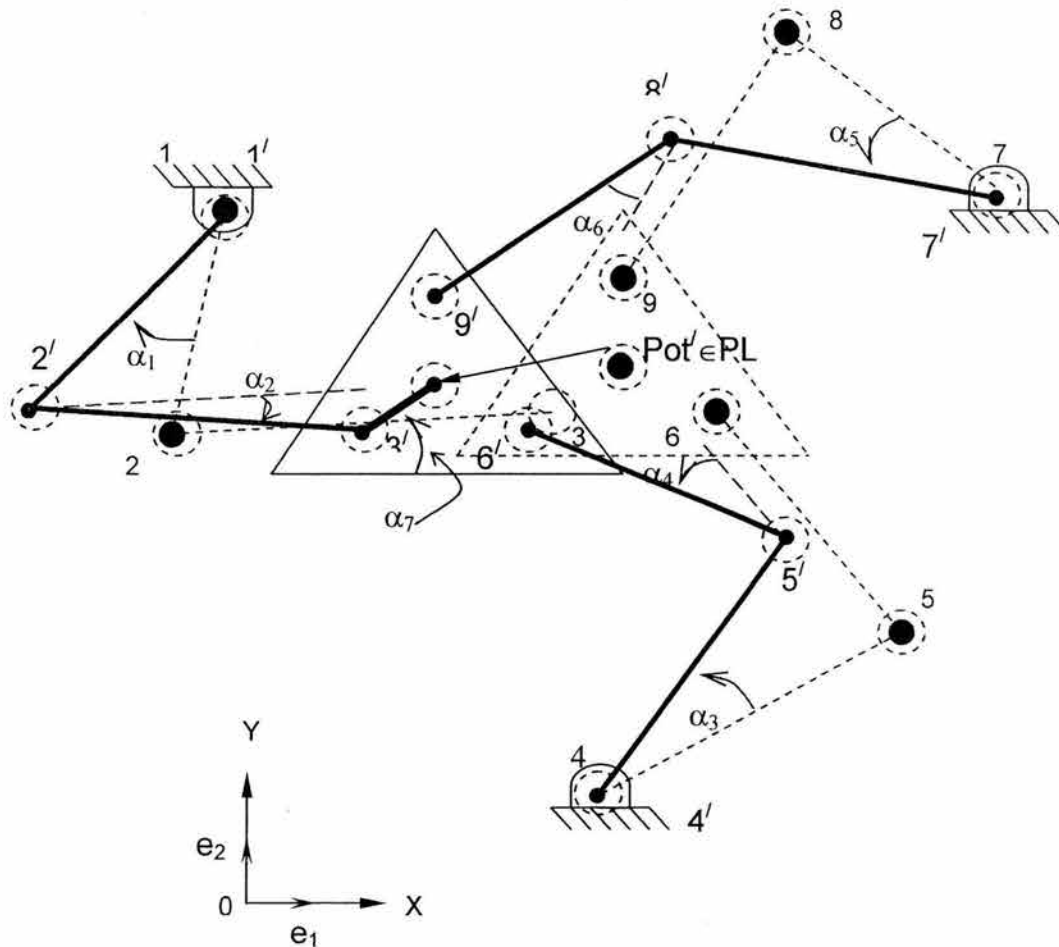


Figura 2.9 Desplazamientos angulares en la configuración deformada

Paso 28).- La formulación del problema inverso en la configuración deformada es la siguiente:

“Dados, $\Gamma_{3,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\Gamma_{6,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\Gamma_{9,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\Gamma_{1,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\Gamma_{4,0} \in \mathfrak{R}^2$, $\Gamma_{7,0} \in \mathfrak{R}^2$, $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8} \in \mathfrak{R}^+$, $p = \{p_0, p_1\}$, $q = \{q_0, q_1\}$, $r = \{r_0, r_1\}$, $s = \{s_0, s_1\}$, $t = \{t_0, t_1\}$, $u = \{u_0, u_1\}$, con $\|p\| = \|q\| = \|r\| = \|s\| = \|t\| = \|u\| = 1$, encuentre $P = \{P_0, P_1\}$, $Q = \{Q_0, Q_1\}$, $R = \{R_0, R_1\}$, $S = \{S_0, S_1\}$, $T = \{T_0, T_1\}$, $U = \{U_0, U_1\}$, tal que la expresión del paso 27) sea satisfecha y,

- 1) $P_0^2 + P_1^2 = 1$; $Q_0^2 + Q_1^2 = 1$
- 2) $R_0^2 + R_1^2 = 1$; $S_0^2 + S_1^2 = 1$
- 3) $T_0^2 + T_1^2 = 1$; $U_0^2 + U_1^2 = 1$ ”

2.5.- Modelación de la configuración deformada (Planteamiento del problema directo)

En esta sección se usarán los pasos del 29) al 37), para el formular el problema directo en la configuración deformada.

Paso 29).- De acuerdo en [2] no es posible formular el problema directo en la configuración deformada usando las ecuaciones de los pasos 25) y 26).

Paso 30).- Es necesario plantear otro sistema de ecuaciones.

Paso 31).- La figura 2.10 muestra los nuevos vectores de posición asociados con el robot motivo de estudio definido en la configuración deformada.

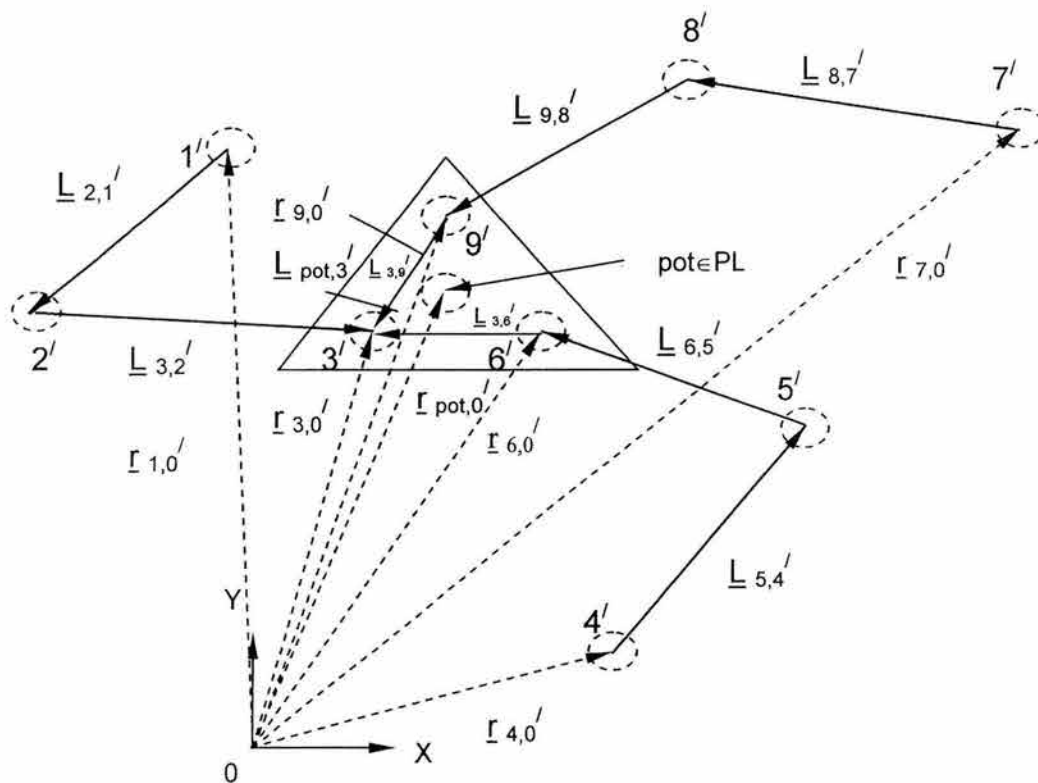


Figura 2.10 Vectores deformados para el planteamiento del problema directo

Paso 32).- Las ecuaciones de lazo cerrado definidas en la configuración deformada son los siguientes:

- 1) $r'_{3,0} = r_{1,0} + \underline{L}'_{2,1} + \underline{L}'_{3,2}$
- 2) $r'_{3,0} = r_{4,0} + \underline{L}'_{5,4} + \underline{L}'_{6,5} + \underline{L}'_{3,6}$
- 3) $r'_{3,0} = r_{7,0} + \underline{L}'_{8,7} + \underline{L}'_{9,8} + \underline{L}'_{3,9}$

o, equivalentemente:

- 1) $r_{1,0} + \underline{L}'_{2,1} + \underline{L}'_{3,2} - [r_{4,0} + \underline{L}'_{5,4} + \underline{L}'_{6,5} + \underline{L}'_{3,6}] = 0$
- 2) $r_{1,0} + \underline{L}'_{2,1} + \underline{L}'_{3,2} - [r_{7,0} + \underline{L}'_{8,7} + \underline{L}'_{9,8} + \underline{L}'_{3,9}] = 0$

Paso 33).- Los sistemas referenciales locales deformados relacionadas con los vectores definidos sobre la plataforma del robot son mostrados en la figura siguiente:

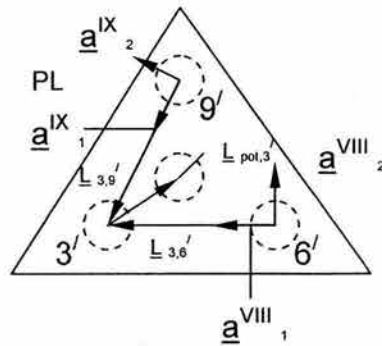


Figura 2.11 Bases locales deformadas sobre la plataforma P_L'

Los vectores de posición asociados con la plataforma se escriben en términos de las bases locales de la manera siguiente:

- 1) $\underline{L}'_{3,6} = l'_{3,6} \cdot \underline{a}_1^{VIII}$
- 2) $\underline{L}'_{3,9} = l'_{3,9} \cdot \underline{a}_1^{IX}$

Paso 34).- Por otro lado, las ecuaciones de lazo cerrado pueden escribir en términos de las bases locales deformadas de la manera siguiente:

$$1) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \bullet a_j' + l_{3,2} \bullet a_j'' - [r_{4,0} + l_{5,4} \bullet a_j''' + l_{6,5} \bullet a_j^V + l_{3,6} \bullet a_1^{VIII}] = 0$$

$$2) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \bullet a_j' + l_{3,2} \bullet a_j'' - [r_{7,0} + l_{8,7} \bullet a_j^V + l_{9,8} \bullet a_j^{VI} + l_{3,9} \bullet a_1^{IX}] = 0$$

Paso 35).- Las rotaciones de las bases locales deformadas sobre las bases locales no deformadas y sobre la base inicial fija se expresa de la manera siguiente:

$$1) \quad a_1^{VIII} = \rho(W, a_1^{VIII}) = \rho(W, \rho(V, e_1^{VIII})) = \rho(W, \rho(V, \rho(v, e_1))) = W * V * v * e_1$$

$$2) \quad a_1^{IX} = \rho(X, a_1^{VIII}) = \rho(X, \rho(V, e_1^{VIII})) = \rho(X, \rho(V, \rho(v, e_1))) = X * V * v * e_1$$

Aquí, $W, X \in \mathfrak{R}^2$ son complejos norma unitaria.

Paso 36).- Las ecuaciones de lazo se escriben en términos de la base inercial fija de la manera siguiente:

$$1) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \bullet \{P * p * e_1\} + l_{3,2} \bullet \{Q * q * e_1\} - [r_{4,0} + l_{5,4} \bullet \{Q * q * e_1\} + l_{6,5} \bullet \{S * s * e_1\} + l_{3,6} \bullet \{W * V * v * e_1\}] = 0$$

$$3) \quad r_{1,0} + l_{2,1} \bullet \{P * p * e_1\} + l_{3,2} \bullet \{Q * q * e_1\} - [r_{7,0} + l_{8,7} \bullet \{T * t * e_1\} + l_{9,8} \bullet \{U * u * e_1\} + l_{3,9} \bullet \{X * V * v * e_1\}] = 0$$

Paso 37).- la formulación del problema directo en la configuración deformada es:

“Dados, $P = \{P_0, P_1\}$, $R = \{R_0, R_1\}$, $T = \{T_0, T_1\}$, con $\|P\| = \|R\| = \|T\| = 1$, $r_{1,0} \in \mathfrak{R}^2$, $r_{4,0} \in \mathfrak{R}^2$, $r_{7,0} \in \mathfrak{R}^2$, $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{pot,3} \in \mathfrak{R}^+$, $W = \{W_0, W_1\}$, $X = \{X_0, X_1\}$, con $\|W\| = \|X\| = 1$, $p = \{p_0, p_1\}$, $q = \{q_0, q_1\}$, $r = \{r_0, r_1\}$, $s = \{s_0, s_1\}$, $t = \{t_0, t_1\}$, $u = \{u_0, u_1\}$, $v = \{v_0, v_1\}$, $w = \{w_0, w_1\}$, $x = \{x_0, x_1\}$, con $\|p\| = \|q\| = \|r\| = \|s\| = \|t\| = \|u\| = \|v\| = \|w\| = \|x\| = 1$, encuentre $r_{pot,0} \in \mathfrak{R}^2$, $Q = \{Q_0, Q_1\}$, $S = \{S_0, S_1\}$, $U =$

$\{U_0, U_1\}$, $V = \{V_0, V_1\}$, tal que las expresiones de los paso anteriores sean satisfechas y,

$$\begin{aligned} 1) \quad Q_0^2 + Q_1^2 = 1 & \quad ; \quad S_0^2 + S_1^2 = 1 \\ 2) \quad U_0^2 + U_1^2 = 1 & \quad ; \quad V_0^2 + V_1^2 = 1 \end{aligned}$$

2.6.- Programación de los modelos de posición

En este capítulo se programan los modelos cinemáticos de posicionamiento del robot paralelo planar tipo RRR de 3 GDL, el objetivo es mostrar como el uso sistemático del álgebra de los números complejos permite una facil programación y visualización de los movimientos del robot mediante la programación en el lenguaje VISUAL BASIC [1] .

La programación del robot en base al modelo cinemático de posición desarrollado en esta tesis, tiene gran importancia debido a que los modelos matemáticos que la literatura tradicional utiliza para modelar este tipo de robot son complicados. Sin embargo el modelo planteado en el capítulo 1 utilizando el álgebra de los números complejos, permite generar un programa que modela la cinemática de posición inversa y directa de este sistema mecánico.

2.6.1. Programación de la cinemática inversa del robot

En esta sección se describe la programación del modelo cinemático inverso de posicionamiento, se dan aquí, las coordenadas del efector final conocido como P_{ot} localizado en la plataforma P_L del robot, estas coordenadas son X_{POT} , Y_{POT} tomadas con relación a un sistema cartesiano de referencia fijo y el ángulo θ_{POT} existente entre el eje x y el vector $L_{pot,3}$ existente entre la junta rotacional 3 y el punto P_{OT} de la placa triangular P_L del robot, para encontrar los ángulos de los

eslabones conductor llamado para efecto de programación activo y conducido de cada cadena cinemática que conforma el robot, esto con respecto al eje x de referencia.

- Se definen las banderas de estado para el problema de solución inversa de las cadenas cinemáticas 1, 2 y 3.

```
Dim banderacc1, banderacc2, banderacc3 As Boolean
```

```
Dim incremento As Integer
```

- Se aplican nuevas coordenadas para modelar su posición.

```
Private Sub aplicar_Click()
```

- Posición home de referencia.

```
Xref = Int(Trim(Text1.Text))
```

```
Yref = Int(Trim(Text2.Text))
```

```
tetharef = Int(Trim(Text3.Text))
```

```
cinematicalInversa Xref, Yref, tetharef
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

- Se define la posición home de referencia.

```
Xref = 0
```

```
Yref = 1000
```

```
tetharef = 150
```

```
cinematicalInversa Xref, Yref, tetharef
```

```
End Sub
```

- Se sale de la ventana de modelación de posición.

```
Private Sub Salir_Click()  
Unload Me  
End Sub
```

- En el siguiente segmento de código se determina la solución de la cinemática inversa del robot

```
Public Sub cinematicaInversa(x As Single, y As Single, angulo As Single)
```

- Definición del ángulo de referencia bpl de PL.

```
Dim Bpl As Single
```

- Definición de ángulos temporales.

```
Dim angulo1 As Single
```

```
Dim angulo2 As Single
```

```
'Tolerancia
```

```
rango = 10
```

- Base de referencia.

```
e1(0) = 1
```

```
e1(1) = 0
```

- Definición del ángulo tethapot.

```
tethapot = GtoR(angulo)
```

- Las siguientes 4 líneas describen las coordenadas de referencia.

```
Rpot(0) = x
```

```
Rpot(1) = y
```

```
Xpot = Rpot(0)
```

```
Ypot = Rpot(1)
```

- Definición de los vectores que componen al robot.

$$Bpl = GtoR(30)$$

$$Lpot = 400$$

$$L36 = Lpot * 2$$

$$L39 = Lpot * 2$$

$$L1 = L36$$

$$L2 = L1$$

$$L3 = L1$$

$$L4 = L1$$

$$L5 = L1$$

$$L6 = L1$$

$$L = 2 * L1$$

- Modelo referido a P1.

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

- Determinación de R3(), R6() y R9() en la configuración no deformada.

$$R3(0) = \text{Int}(Xpot - Lpot * \text{Cos}(tethapot))$$

$$R3(1) = \text{Int}(Ypot - Lpot * \text{Sin}(tethapot))$$

$$p3(0) = R3(0)$$

$$p3(1) = R3(1)$$

$$R6(0) = \text{Int}(p3(0) + L36 * \text{Cos}(tethapot - Bpl))$$

$$R6(1) = \text{Int}(p3(1) + L36 * \text{Sin}(tethapot - Bpl))$$

$$R9(0) = \text{Int}(p3(0) + L39 * \text{Cos}(tethapot + Bpl))$$

$$R9(1) = \text{Int}(p3(1) + L39 * \text{Sin}(tethapot + Bpl))$$

- Función de la cinemática inversa de cadena CC1.

cadenacc1

- Función de la cinemática inversa de cadena CC2.
cadenacc2

- Función de la cinemática inversa de cadena CC3.
cadenacc3

- Gráfica el robot en la pantalla.
Graficarobot
End Sub

- Función de la cinemática inversa de cadena CC1.
Private Sub cadenacc1()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.
Dim angulo1 As Single
Dim angulo2 As Single

- Bandera de estado de solución.
banderacc1 = True

- Complejos de la cadena cinemática.
For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9
 P(0) = Cos(GtoR(angulo1))
 P(1) = Sin(GtoR(angulo1))
 For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9
 Q(0) = Cos(GtoR(angulo2))
 Q(1) = Sin(GtoR(angulo2))

- Determinación de las bases móviles.
 e11(0) = ropq(P(), e1()).x(0)
 e11(1) = ropq(P(), e1()).x(1)
 e12(0) = ropq(Q(), e1()).x(0)

$$e12(1) = \text{ropq}(Q(), e1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L1,L2.

$$LL1t(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$LL1t(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

$$LL2t(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$LL2t(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Determinación de la condición $R3=I1+I2$.

$$\text{If } (R3(0) + \text{rango} > LL1t(0) + LL2t(0) \text{ And } R3(1) + \text{rango} > LL1t(1) + LL2t(1))$$

$$\text{And } (R3(0) - \text{rango} < LL1t(0) + LL2t(0) \text{ And } R3(1) - \text{rango} < LL1t(1) + LL2t(1)) \text{ Then}$$

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha1} = \text{angulo1}$$

$$\text{tetha2} = \text{angulo2}$$

- Determinación de la condición.

$$L11(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$L11(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

$$L22(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$L22(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $P0+P1=1, Q0+Q1=1$.

$$\text{If } ((P(0) * P(0) + P(1) * P(1) = 1) \text{ And } (Q(0) * Q(0) + Q(1) * Q(1) = 1)) \text{ Then}$$

Exit Sub

End If

End If

Next

Next

banderacc1 = False

End Sub

- Función de la cinemática inversa de cadena CC2.

Private Sub cadenacc2()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

- Bandera de estado de solución.

banderacc2 = True

- Determinación de la tierra de cc2.

$$L14(0) = L * \text{Cos}(GtoR(60))$$

$$L14(1) = L * \text{Sin}(GtoR(60))$$

- Complejos de la cadena cinemática

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

$$R(0) = \text{Cos}(GtoR(angulo1))$$

$$R(1) = \text{Sin}(GtoR(angulo1))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$S(0) = \text{Cos}(GtoR(angulo2))$$

$$S(1) = \text{Sin}(GtoR(angulo2))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e13(0) = \text{ropq}(R(), e1()).x(0)$$

$$e13(1) = \text{ropq}(R(), e1()).x(1)$$

$$e14(0) = \text{ropq}(S(), e1()).x(0)$$

$$e14(1) = \text{ropq}(S(), e1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L3,L4.

$$LL3t(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$LL3t(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

$$LL4t(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$LL4t(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Determinación de la condición $R6=L14+L3+L4$.

If $(R6(0) + \text{rango} > L14(0) + LL3t(0) + LL4t(0) \text{ And } R6(1) + \text{rango} > L14(1) + LL3t(1) + LL4t(1)) \text{ And } (R6(0) - \text{rango} < L14(0) + LL3t(0) + LL4t(0) \text{ And } R6(1) - \text{rango} < L14(1) + LL3t(1) + LL4t(1))$ Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha3} = \text{angulo1}$$

$$\text{tetha4} = \text{angulo2}$$

- Determinación de la condición.

$$L33(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$L33(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

$$L44(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$L44(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $Po+P1=1, Q0+Q1=1$.

If $((R(0) * R(0) + R(1) * R(1) = 1) \text{ And } (S(0) * S(0) + S(1) * S(1) = 1))$ Then

Exit Sub

End If

End If

Next

Next

banderacc2 = False

End Sub

- Función de la cinemática inversa de cadena CC3.

Private Sub cadenacc3()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

- Bandera de estado de solución.

banderacc3 = True

- Determinación del eslabón de tierra de CC3.

$$L17(0) = -1 * L * \text{Cos}(GtoR(60))$$

$$L17(1) = L * \text{Sin}(GtoR(60))$$

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 360 To 0 Step -0.9

$$T(0) = \text{Cos}(GtoR(angulo1))$$

$$T(1) = \text{Sin}(GtoR(angulo1))$$

For angulo2 = 360 To 0 Step -0.9

$$U(0) = \text{Cos}(GtoR(angulo2))$$

$$U(1) = \text{Sin}(GtoR(angulo2))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e15(0) = \text{ropq}(T(), e1()).x(0)$$

$$e15(1) = \text{ropq}(T(), e1()).x(1)$$

$$e16(0) = \text{ropq}(U(), e1()).x(0)$$

$$e16(1) = \text{ropq}(U(), e1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L5,L6.

$$LL5t(0) = \text{Int}(L5 * e15(0))$$

$$LL5t(1) = \text{Int}(L5 * e15(1))$$

$$LL6t(0) = \text{Int}(L6 * e16(0))$$

$$LL6t(1) = \text{Int}(L6 * e16(1))$$

- Determinación de la condición $R9=L17+L5+L6$.

If $(R9(0) + \text{rango} > L17(0) + LL5t(0) + LL6t(0) \text{ And } R9(1) + \text{rango} > L17(1) + LL5t(1) + LL6t(1)) \text{ And } (R9(0) - \text{rango} < L17(0) + LL5t(0) + LL6t(0) \text{ And } R9(1) - \text{rango} < L17(1) + LL5t(1) + LL6t(1))$ Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha5} = \text{angulo1}$$

$$\text{tetha6} = \text{angulo2}$$

- Determinación de la condición.

$$L55(0) = \text{Int}(L5 * e15(0))$$

$$L55(1) = \text{Int}(L5 * e15(1))$$

$$L66(0) = \text{Int}(L6 * e16(0))$$

$$L66(1) = \text{Int}(L6 * e16(1))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados.

If $((T(0) * T(0) + T(1) * T(1) = 1) \text{ And } (U(0) * U(0) + U(1) * U(1) = 1))$ Then

Exit Sub

End If

End If

Next

Next

banderacc3 = False

End Sub

- Grafica el robot en el la caja de dibujo.

Private Sub Graficarobot()

- Variables temporales para el sistema de la pantalla.

Dim ofsetx As Single

Dim ofsety As Single

Dim Rtpot(1) As Single

Dim RT1(1) As Single

Dim RT2(1) As Single

Dim RT3(1) As Single

Dim RT4(1) As Single

Dim RT6(1) As Single

Dim RT9(1) As Single

- Verificación de soluciones.

If (banderacc1 = False Or banderacc2 = False Or banderacc3 = False) Then

MsgBox "El sistema no tubo solucion "

Exit Sub

End If

- Ofset en x+2500 ofset en y -2100, centrado referido a CC1.

ofsetx = 2500

ofsety = 1500

- Adecuación al sistema en de pantalla.

Rtpot(0) = Rpot(0) + ofsetx

Rtpot(1) = Rpot(1) + ofsety

RT3(0) = R3(0) + ofsetx

RT3(1) = R3(1) + ofsety

RT6(0) = R6(0) + ofsetx

RT6(1) = R6(1) + ofsety

$RT9(0) = R9(0) + \text{offsetx}$

$RT9(1) = R9(1) + \text{offsety}$

- Características de la figura del robot.

Line3.BorderWidth = 3

Line4.BorderWidth = 3

Line5.BorderWidth = 3

Line6.BorderWidth = 3

Line7.BorderWidth = 3

Line8.BorderWidth = 3

Line9.BorderWidth = 3

Line10.BorderWidth = 3

Line11.BorderWidth = 3

Line12.BorderWidth = 3

Line3.BorderColor = vbWhite

Line4.BorderColor = vbWhite

Line5.BorderColor = vbWhite

Line6.BorderColor = vbWhite

Line7.BorderColor = vbBlue

Line8.BorderColor = vbBlue

Line9.BorderColor = vbBlue

Line10.BorderColor = vbBlue

Line11.BorderColor = vbBlue

Line12.BorderColor = vbBlue

- Corrección de cuadrante y offset de centrado.

- Graficación del vector Bpl.

Line3.X1 = Int(Rtpot(0))

Line3.Y1 = Int(Rtpot(1))

Line3.X2 = Int(RT3(0))

Line3.Y2 = Int(RT3(1))

- Graficación del vector L36.

Line4.X1 = Int(RT3(0))

Line4.Y1 = Int(RT3(1))

Line4.X2 = Int(RT6(0))

Line4.Y2 = Int(RT6(1))

- Graficación del vector L39.

Line5.X1 = Int(RT3(0))

Line5.Y1 = Int(RT3(1))

Line5.X2 = Int(RT9(0))

Line5.Y2 = Int(RT9(1))

- Graficación del vector L96.

Line6.X1 = Int(RT9(0))

Line6.Y1 = Int(RT9(1))

Line6.X2 = Int(RT6(0))

Line6.Y2 = Int(RT6(1))

- Graficación de CC1.

- Vector L1.

Line7.X1 = offsetx

Line7.Y1 = offsety

Line7.X2 = offsetx + L11(0)

Line7.Y2 = offsety + L11(1)

- Vector L2

Line8.X1 = offsetx + L11(0)

Line8.Y1 = offsety + L11(1)

Line8.X2 = offsetx + L11(0) + L22(0)

Line8.Y2 = ofsety + L11(1) + L22(1)

- Graficación de CC2.
- Vector L3.

Line9.X1 = ofsetx + L14(0)

Line9.Y1 = ofsety + L14(1)

Line9.X2 = ofsetx + L14(0) + L33(0)

Line9.Y2 = ofsety + L14(1) + L33(1)

- Vector L4.

Line10.X1 = ofsetx + L14(0) + L33(0)

Line10.Y1 = ofsety + L14(1) + L33(1)

Line10.X2 = ofsetx + L14(0) + L33(0) + L44(0)

Line10.Y2 = ofsety + L14(1) + L33(1) + L44(1)

- Graficación de CC3.
- Vector L5.

Line11.X1 = ofsetx + L17(0)

Line11.Y1 = ofsety + L17(1)

Line11.X2 = ofsetx + L17(0) + L55(0)

Line11.Y2 = ofsety + L17(1) + L55(1)

- Vector L6.

Line12.X1 = ofsetx + L17(0) + L55(0)

Line12.Y1 = ofsety + L17(1) + L55(1)

Line12.X2 = ofsetx + L17(0) + L55(0) + L66(0)

Line12.Y2 = ofsety + L17(1) + L55(1) + L66(1)

- Valores de los controles

Text1.Text = Int(Rpot(0))

Text2.Text = Int(Rpot(1))

Text3.Text = RtoG(tethapot)

- Valores de los ángulos de las cadena cinemática.

Label13.Caption = Int(tetha1)

Label16.Caption = Int(tetha2)

Label14.Caption = Int(tetha3)

Label17.Caption = Int(tetha4)

Label19.Caption = Int(tetha5)

Label20.Caption = Int(tetha6)

End Sub

Private Sub VScroll1_Change()

incremento = VScroll1.Value

Text4.Text = incremento

End Sub

El ejecutar el programa anterior da como resultado la salida gráfica que se muestra en la figura siguiente, donde se dan los valores de x, y, theta pot y la solución al modelo permite mostrar su nuevo posicionamiento de cada eslabón que compone el robot.

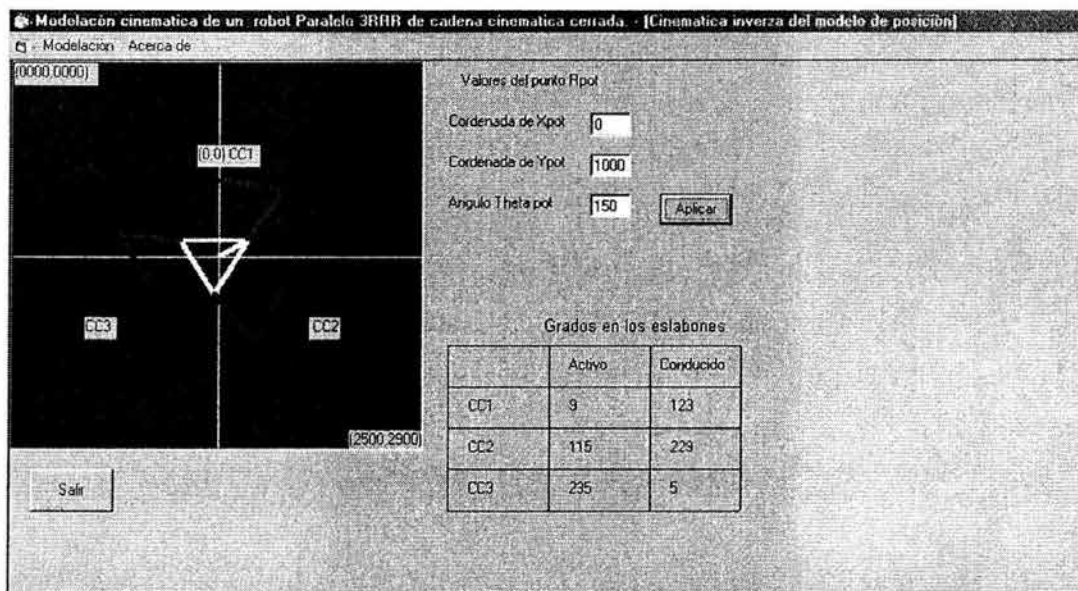


Figura 2.12 Interfase gráfica de usuario de la cinemática inversa del modelo de posición del robot paralelo

2.6.2. Programación de la cinemática directa del modelo de posición

En esta sección se describe la programación del modelo cinemático directo de posicionamiento, se dan aquí con respecto a un sistema coordinado de referencia x, y , básicamente respecto a x , los ángulos de los eslabones conductores de las cadenas cinemáticas llamados para efecto de programación activos, para localizar la posición del efector final $P_{ot} \in P_L$ del robot,. Esto es, se encuentran las coordenadas X_{POT} , Y_{POT} y el ángulo θ_{POT} . También el programa determina la posición en grados de los eslabones conducidos

- Se dimensionan las banderas de estado de solución inversa de cadenas cinemáticas.

Dim banderacc1, banderacc2, banderacc3 As Boolean

Dim incremento As Integer

- Se aplican nuevas coordenadas para modelar su posición.

```
Private Sub aplicar_Click()
```

- Nueva orientación.

```
tetha1 = Int(Trim(Text1.Text))
```

```
tetha3 = Int(Trim(Text2.Text))
```

```
tetha6 = Int(Trim(Text3.Text))
```

```
cinematicadirecta tetha1, tetha3, tetha6
```

```
End Sub
```

Private Sub Form_Load()

- Posición Home de referencia Borrar>rango de 307, 112, 238.

Text4.Text = "9"

Text5.Text = "115"

Text6.Text = "235"

cinematicadirecta 9, 115, 235

End Sub

- Sale de la ventana de modelación de posición.

Private Sub Salir_Click()

Unload Me

End Sub

- Determinación de la posición de la cinemática directa del robot.

Public Sub cinematicadirecta(angulo1 As Single, angulo3 As Single, angulo6 As Single)

- Definición de ángulos temporales.

Dim angulot1 As Single

Dim angulot2 As Single

Dim angulot3 As Single

Dim angulot4 As Single

- Definición de los elementos temporales de solución.

Dim e36(1) As Single

Dim e39(1) As Single

Dim epot(1) As Single

Dim tem(1) As Single

Dim LL36t(1) As Single
Dim LL39t(1) As Single
Dim solucion(1) As Single
Dim incremento As Single

- Dato que depende de la resolución del actuador mecánico del sistema.

incremento = 0.9

- Margen de tolerancia.

rango = 10

- Formulación del problema DADOS:

tetha1 = angulo1

tetha3 = angulo3

tetha6 = angulo6

- Base de referencia.

e1(0) = 1

e1(1) = 0

- Definición de los vectores que componen al robot.

Bpl = GtoR(30)

Lpot = 400

L36 = Lpot * 2

L39 = Lpot * 2

L1 = L36

L2 = L1

L3 = L1

L4 = L1

L5 = L1

L6 = L1

L = 2 * L1

- Definición de los complejos X() y W().

$$x(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(150))$$

$$x(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(150))$$

$$W(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(210))$$

$$W(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(210))$$

- Determinación de la orientación del eslabón activo de CC1.
- Modelo referido a P1.

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e11(0) = \text{ropq}(P(), e1()).x(0)$$

$$e11(1) = \text{ropq}(P(), e1()).x(1)$$

- Determinación de vector de L1.

$$L11(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$L11(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

- Determinación de la orientación del eslabón activo de CC2.
- Determinación de la tierra de CC2.

$$L14(0) = L * \text{Cos}(\text{GtoR}(60))$$

$$L14(1) = L * \text{Sin}(\text{GtoR}(60))$$

- Determinación de la orientación del vector.

$$R(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo3}))$$

$$R(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo3}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e13(0) = \text{ropq}(R(), e1()).x(0)$$

$$e13(1) = \text{ropq}(R(), e1()).x(1)$$

- Determinación de vector de L1.

$$L33(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$L33(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

- Determinación de la orientación del eslabón activo de CC3.

$$T(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{angulo6}))$$

$$T(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{angulo6}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e15(0) = \text{ropq}(T(), e1()).x(0)$$

$$e15(1) = \text{ropq}(T(), e1()).x(1)$$

- Determinación de vector de L1.

$$L55(0) = \text{Int}(L5 * e15(0))$$

$$L55(1) = \text{Int}(L5 * e15(1))$$

- Determinación del eslabón de tierra de CC3

$$L17(0) = -1 * L * \text{Cos}(GtoR(60))$$

$$L17(1) = L * \text{Sin}(GtoR(60))$$

- Formulación de la ecuación $L11+L22-(L14+L33+L44+L36)=0$.

- Determinación del vector L2 temporal 121.

For angulot1 = 120 To 360 Step incremento

$$Q(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{angulot1}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{angulot1}))$$

$$e12(0) = \text{ropq}(Q(), e1()).x(0)$$

$$e12(1) = \text{ropq}(Q(), e1()).x(1)$$

$$LL2t(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$LL2t(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Determinación del vector L44 temporal.

For angulot2 = 0 To 360 Step incremento

$$S(0) = \text{Cos}(GtoR(angulot2))$$

$$S(1) = \text{Sin}(GtoR(angulot2))$$

$$e14(0) = \text{ropq}(S(), e1()).x(0)$$

$$e14(1) = \text{ropq}(S(), e1()).x(1)$$

$$LL4t(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$LL4t(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Determinación del vector L36 temporal.

For angulot3 = 0 To 360 Step incremento

$$V(0) = \text{Cos}(GtoR(angulot3))$$

$$V(1) = \text{Sin}(GtoR(angulot3))$$

$$\text{tem}(0) = \text{ropq}(x(), V()).x(0)$$

$$\text{tem}(1) = \text{ropq}(x(), V()).x(1)$$

$$e36(0) = \text{ropq}(\text{tem}(), e1()).x(0)$$

$$e36(1) = \text{ropq}(\text{tem}(), e1()).x(1)$$

$$LL36t(0) = \text{Int}(L36 * e36(0))$$

$$LL36t(1) = \text{Int}(L36 * e36(1))$$

- Verificación de la solución de la ecuación L11+L22-(L14+L33+L44+L36)=0.

$$\text{solucion}(0) = L11(0) + LL2t(0) - (L14(0) + L33(0) + LL4t(0) + LL36t(0))$$

$$\text{solucion}(1) = L11(1) + LL2t(1) - (L14(1) + L33(1) + LL4t(1) + LL36t(1))$$

If (solucion(0) + rango > 0 And solucion(1) + rango > 0) And (solucion(0) - rango < 0 And solucion(1) - rango < 0) Then

- Formulación de la ecuación $L11+L22-(L17+L55+L66+L39)=0$.
- Determinación del vector L66.

For angulot4 = 0 To 360 Step 0.9

$$U(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulot4}))$$

$$U(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulot4}))$$

$$e16(0) = \text{ropq}(U(), e1()).x(o)$$

$$e16(1) = \text{ropq}(U(), e1()).x(1)$$

$$LL6t(0) = \text{Int}(L6 * e16(0))$$

$$LL6t(1) = \text{Int}(L6 * e16(1))$$

- Determinación del vector L39 temporal.

$$\text{tem}(0) = \text{ropq}(W(), V()).x(o)$$

$$\text{tem}(1) = \text{ropq}(W(), V()).x(1)$$

$$e39(0) = \text{ropq}(\text{tem}(), e1()).x(o)$$

$$e39(1) = \text{ropq}(\text{tem}(), e1()).x(1)$$

$$LL39t(0) = \text{Int}(L39 * e39(0))$$

$$LL39t(1) = \text{Int}(L39 * e39(1))$$

- Verificación de la solución de la ecuación $L11+L22-(L17+L55+L66+L39)=0$.

$$\text{solucion}(0) = L11(0) + LL2t(0) - (L17(0) + L55(0) + LL6t(0) + LL39t(0))$$

$$\text{solucion}(1) = L11(1) + LL2t(1) - (L17(1) + L55(1) + LL6t(1) + LL39t(1))$$

If (solucion(0) + rango > 0 And solucion(1) + rango > 0) And

(solucion(0) - rango < 0 And solucion(1) - rango < 0) Then

- Determinación de las rotaciones de los eslabones conducidos.

$$\text{tetha2} = \text{angulot1}$$

$$\text{tetha4} = \text{angulot2}$$

$$\text{tethapot} = \text{angulot3}$$

tetha5 = angulot4

- Determinación de los vectores asociados a los eslabones.

$$L22(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$L22(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

$$L44(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$L44(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

$$L66(0) = \text{Int}(L6 * e16(0))$$

$$L66(1) = \text{Int}(L6 * e16(1))$$

$$LL36(0) = \text{Int}(L36 * e36(0))$$

$$LL36(1) = \text{Int}(L36 * e36(1))$$

$$LL39(0) = \text{Int}(L39 * e39(0))$$

$$LL39(1) = \text{Int}(L39 * e39(1))$$

$$\text{epot}(0) = \text{ropq}(V(), e1()).x(0)$$

$$\text{epot}(1) = \text{ropq}(V(), e1()).x(1)$$

$$LLpot(0) = \text{Int}(Lpot * \text{epot}(0))$$

$$LLpot(1) = \text{Int}(Lpot * \text{epot}(1))$$

$$Rpot(0) = L11(0) + L22(0) + LLpot(0)$$

$$Rpot(1) = L11(1) + L22(1) + LLpot(1)$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados Q(),S(),U() Y V().

$$\text{If } ((Q(0) * Q(0) + Q(1) * Q(1) = 1) \text{ And } (S(0) * S(0) + S(1) * S(1) = 1)$$

$$\text{And } (U(0) * U(0) + U(1) * U(1) = 1) \text{ And } (V(0) * V(0) + V(1) * V(1) = 1)) \text{ Then}$$

Graficarobot

Exit Sub

End If

End If

Next

End If

Next

Next

Next

MsgBox ("no se encontró solución")

End Sub

- Gráfica el robot en el la caja de dibujo.

Private Sub Graficarobot()

- Variables temporales para el sistema de la pantalla.

Dim ofsetx As Single

Dim ofsety As Single

Dim Rtpot(1) As Single

- Ofset en x+2500 ofset en y -2100, centrado y referido a CC1 el modelo.

ofsetx = 2500

ofsety = 1500

- Adecuación al sistema en de pantalla.

Rtpot(0) = Rpot(0) + ofsetx

Rtpot(1) = Rpot(1) + ofsety

- Características de la figura del robot.

Line3.BorderWidth = 3

Line4.BorderWidth = 3

Line5.BorderWidth = 3

Line6.BorderWidth = 3

Line7.BorderWidth = 3

Line8.BorderWidth = 3

Line9.BorderWidth = 3

Line10.BorderWidth = 3

Line11.BorderWidth = 3

Line12.BorderWidth = 3

Line3.BorderColor = vbBlue

Line4.BorderColor = vbWhite
 Line5.BorderColor = vbWhite
 Line6.BorderColor = vbWhite
 Line7.BorderColor = vbBlue
 Line8.BorderColor = vbBlue
 Line9.BorderColor = vbBlue
 Line10.BorderColor = vbBlue
 Line11.BorderColor = vbBlue
 Line12.BorderColor = vbBlue

- Corrección de cuadrante y offset de centrado.
- Graficación del vector Bpl.

Line3.X1 = offsetx + L11(0) + L22(0) 'Int(Rtpot(0))
 Line3.Y1 = offsety + L11(1) + L22(1) 'Int(Rtpot(1))
 Line3.X2 = offsetx + L11(0) + L22(0) + LLpot(0) 'Int(RT3(0))
 Line3.Y2 = offsety + L11(1) + L22(1) + LLpot(1) 'Int(RT3(1))

- Graficación del vector L36.

Line4.X1 = offsetx + L14(0) + L33(0) + L44(0) 'Int(RT3(0))
 Line4.Y1 = offsety + L14(1) + L33(1) + L44(1) 'Int(RT3(1))
 Line4.X2 = offsetx + L14(0) + L33(0) + L44(0) + LL36(0) 'offsetx + L14(0) + L33(0) +
 L44(0) 'Int(RT6(0))
 Line4.Y2 = offsety + L14(1) + L33(1) + L44(1) + LL36(1) 'offsety + L14(1) + L33(1) +
 L44(1) 'Int(RT6(1))

- Graficación del vector L39.

Line5.X1 = offsetx + L17(0) + L55(0) + L66(0) 'Int(RT3(0))
 Line5.Y1 = offsety + L17(1) + L55(1) + L66(1) 'Int(RT3(1))
 Line5.X2 = offsetx + L17(0) + L55(0) + L66(0) + LL39(0) 'Int(RT9(0))
 Line5.Y2 = offsety + L17(1) + L55(1) + L66(1) + LL39(1) 'Int(RT9(1))

- Graficación del vector L96.

$$\text{Line6.X1} = \text{offsetx} + \text{L14}(0) + \text{L33}(0) + \text{L44}(0) \cdot \text{Int}(\text{RT9}(0))$$

$$\text{Line6.Y1} = \text{offsety} + \text{L14}(1) + \text{L33}(1) + \text{L44}(1) \cdot \text{Int}(\text{RT9}(1))$$

$$\text{Line6.X2} = \text{offsetx} + \text{L17}(0) + \text{L55}(0) + \text{L66}(0) \cdot \text{Int}(\text{RT6}(0))$$

$$\text{Line6.Y2} = \text{offsety} + \text{L17}(1) + \text{L55}(1) + \text{L66}(1) \cdot \text{Int}(\text{RT6}(1))$$

- Graficación de CC1.

'vector L1

$$\text{Line7.X1} = \text{offsetx}$$

$$\text{Line7.Y1} = \text{offsety}$$

$$\text{Line7.X2} = \text{offsetx} + \text{L11}(0)$$

$$\text{Line7.Y2} = \text{offsety} + \text{L11}(1)$$

'vector L2

$$\text{Line8.X1} = \text{offsetx} + \text{L11}(0)$$

$$\text{Line8.Y1} = \text{offsety} + \text{L11}(1)$$

$$\text{Line8.X2} = \text{offsetx} + \text{L11}(0) + \text{L22}(0)$$

$$\text{Line8.Y2} = \text{offsety} + \text{L11}(1) + \text{L22}(1)$$

- Graficación de CC2.

- Vector L3.

$$\text{Line9.X1} = \text{offsetx} + \text{L14}(0)$$

$$\text{Line9.Y1} = \text{offsety} + \text{L14}(1)$$

$$\text{Line9.X2} = \text{offsetx} + \text{L14}(0) + \text{L33}(0)$$

$$\text{Line9.Y2} = \text{offsety} + \text{L14}(1) + \text{L33}(1)$$

- Vector L4.

$$\text{Line10.X1} = \text{offsetx} + \text{L14}(0) + \text{L33}(0)$$

$$\text{Line10.Y1} = \text{offsety} + \text{L14}(1) + \text{L33}(1)$$

$$\text{Line10.X2} = \text{offsetx} + \text{L14}(0) + \text{L33}(0) + \text{L44}(0)$$

$$\text{Line10.Y2} = \text{offsety} + \text{L14}(1) + \text{L33}(1) + \text{L44}(1)$$

- Graficación de CC3.

- Vector L5.

Line11.X1 = offsetx + L17(0)

Line11.Y1 = offsety + L17(1)

Line11.X2 = offsetx + L17(0) + L55(0)

Line11.Y2 = offsety + L17(1) + L55(1)

- Vector L6.

Line12.X1 = offsetx + L17(0) + L55(0)

Line12.Y1 = offsety + L17(1) + L55(1)

Line12.X2 = offsetx + L17(0) + L55(0) + L66(0)

Line12.Y2 = offsety + L17(1) + L55(1) + L66(1)

- Valores de la cinemática directa.
- Valores de las corenadas de PL.

Text1.Text = Int(Rpot(0))

Text2.Text = Int(Rpot(1))

Text3.Text = tethapot

- Valores de los ángulos de las cadena cinemática

Label13.Caption = Int(tetha1)

Label16.Caption = Int(tetha2)

Label14.Caption = Int(tetha3)

Label17.Caption = Int(tetha4)

Label19.Caption = Int(tetha6)

Label20.Caption = Int(tetha5)

End Sub

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

El ejecutar el programa descrito anteriormente se obtiene como resultado la salida grafica que se muestra en la figura siguiente. En dicha salida grafica se dan los valores de los ángulos para los eslabones activos de las cadenas cinemáticas CC1, CC2 y CC3 del robot y se determinan X_{pot} , Y_{pot} , θ_{pot} , que representan la posición del efector final $P_{ot} \in P_L$ y la solución al modelo permite mostrar su nuevo posicionamiento.

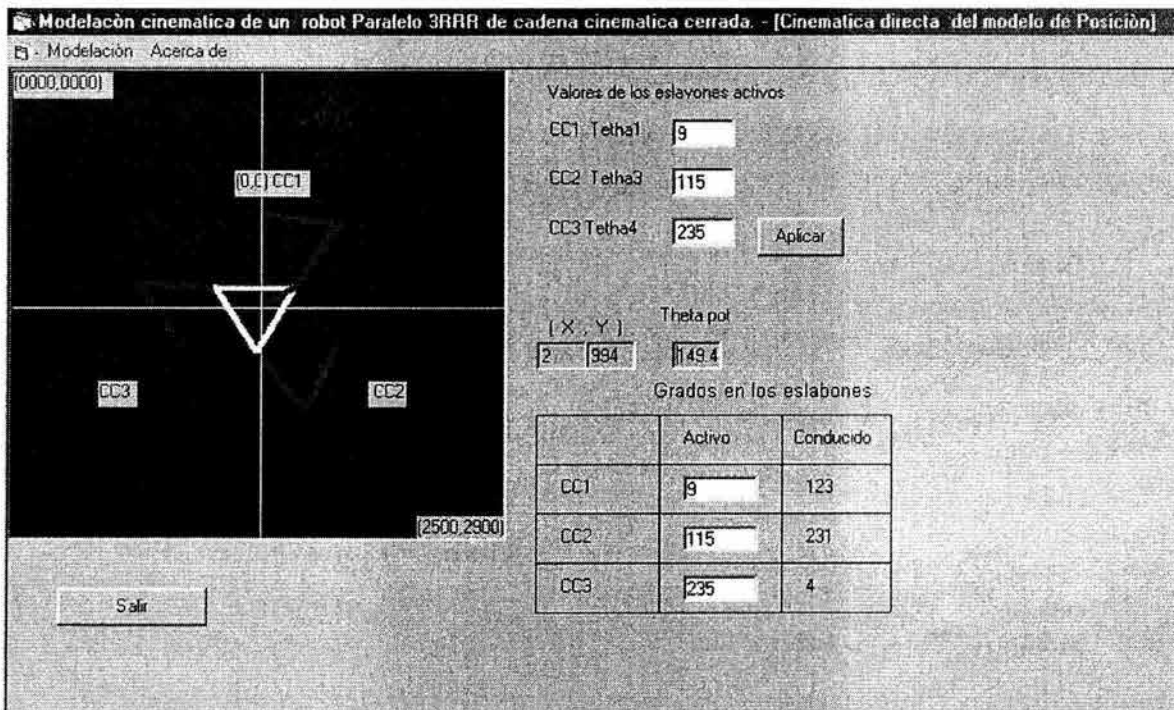


Figura 2.13 Interfase grafica de usuario de la cinemática directa del modelo de posición del robot paralelo

CAPÍTULO 3

Modelos de velocidad y aceleración del robot paralelo, programación y simulación

Introducción.- En este capítulo se propone una metodología para generar los modelos de velocidad y aceleración relacionados con el robot paralelo estudiado en el capítulo 2. Se formulan los problemas directo e inverso de la velocidad y aceleración, ambos asociados con la configuración deformada. Cabe señalar que la metodología usada en este capítulo, tiene el propósito de extraer, de la sistematización hecha en [2], los modelos de velocidad y aceleración con el objetivo de programarlos en el paquete VISUAL BACIS V6.

3.1.- Metodología

En esta sección se propone una metodología para desarrollar los modelos de velocidad y aceleración asociados con el robot motivo de estudio. Se seguirá con la numeración dada en el capítulo anterior para no truncar la secuencia de pasos.

- Pasos para plantear el problema inverso de velocidad.

Paso 38).- Usar funciones del tipo $I: J \rightarrow \in \mathfrak{R}^2$, donde $J \in [0, +\infty)$ es un intervalo de tiempo, para expresar las ecuaciones del paso 22) en términos del tiempo.

Paso 39).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 38).

Paso 40).- Usar funciones del tipo $\underline{a} : J \rightarrow \in \mathfrak{R}^2$ para expresar las bases locales deformadas y sus componentes en términos del tiempo $t \in J$, así, como funciones del tipo $I : J \rightarrow \in \mathfrak{R}$ para representar las longitudes de los vectores en función del tiempo.

Paso 41).- Expresar los vectores de posición definidos en la configuración deformada en términos de sus longitudes y bases locales deformadas en función del tiempo $t \in J$.

Paso 42).- Expresar las ecuaciones del paso 38) en términos de los vectores y bases locales del paso 41).

Paso 43).- Derivar con respecto al tiempo $t \in J$, las expresiones del paso 41).

Paso 44) .- Expresar las ecuaciones del paso 39) en términos del paso 43).

Paso 45).- Usar funciones del tipo $P:J \rightarrow \mathbb{R}^2$ para expresar en función del tiempo las bases locales definidas en la configuración no deformada.

Paso 46).- Usar Funciones del tipo $\underline{e} :J \rightarrow \mathbb{R}^2$ para expresar en función del tiempo las bases locales definidas en la configuración no deformada.

Paso 47).- Expresar las bases definidas en función de los complejos del paso 45) y las bases locales del paso 46) en función del tiempo y la función rotación.

Paso 48).- Expresar las ecuaciones del paso 44) en términos del paso 47).

Paso 49).- Derivar con respecto al tiempo $t \in J$ las bases locales del paso 47).

Paso 50).- Expresar las ecuaciones del paso 58) en términos del paso 49).

Paso 51).- Usar la identidad $K(t) * K(t) = I(t)$ para representar las bases locales no deformadas en términos de las bases locales deformadas y los complejos asociados con las rotaciones.

Paso 52).- Expresar las ecuaciones del paso 50) en términos del paso 51).

Paso 53).- Usar funciones del tipo $l : J \rightarrow \in \mathfrak{R}$ para expresar en funciones del tiempo las ecuaciones de norma unitaria del paso 26) y sus derivadas con respecto al tiempo.

Paso 54).- Usar funciones del tipo $\alpha : J \rightarrow \in \mathfrak{R}$ para representar las ecuaciones del paso 27) en función del tiempo y, posteriormente, derivarlas con respecto al tiempo.

Paso 55).- Usar funciones del tipo $r : J \rightarrow \in \mathfrak{R}$ para representar las expresiones del paso 21) en función del tiempo y, posteriormente, derivarlas con respecto al tiempo.

Paso 56).- Formular el problema inverso de velocidad usando las ecuaciones de los pasos 52) y 53).

- Pasos para plantear el problema directo de velocidad.

Paso 57).- Usar funciones del tipo $\underline{l} : J \rightarrow \in \mathfrak{R}^2$ para expresar las ecuaciones de lazo del paso 32) en función del tiempo.

Paso 58).- Derivar las ecuaciones de lazo del paso 57) en términos del tiempo $t \in \mathfrak{R}^+$.

Paso 59).- Usar funciones del tipo $\underline{l} : J \rightarrow \in \mathfrak{R}^2$ para expresar las ecuaciones del paso 33) en función del tiempo $t \in J$.

Paso 60).- Expresar las ecuaciones del paso 57) y 59) en términos del tiempo $t \in J$ y de las bases locales deformadas.

Paso 61).- Derivar con respecto al tiempo $t \in J$ las expresiones del paso 60).

Paso 62).- Usar funciones de tipo $\rho : J \rightarrow \mathbb{R}^2$ para expresar en función del tiempo los complejos asociados con la plataforma (ecuaciones del paso 35). También, es este paso, de deben expresar las bases locales deformadas definidas sobre la plataforma, en términos de complejos y de bases locales no deformadas.

Paso 63).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 62).

Paso 64).- Expresar las ecuaciones del paso 63) en términos de velocidades instantáneas.

Paso 65).- Expresar las ecuaciones de lazo paso 60) en términos de las derivadas de los complejos y en función de velocidades instantáneas.

Paso 66).- Formular el problema directo de velocidad.

Pasos para modelar el problema inverso de aceleración.

- Planteamiento del problema inverso de aceleración.

Paso 67).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 39).

Paso 68).- Expresar los vectores de velocidad del paso 41) en términos de las derivadas de las bases locales deformadas y, posteriormente, derivar dichas vectores en términos del tiempo $t \in J$.

Paso 69).- Expresar las ecuaciones del paso 67) en términos de las expresiones del paso 68).

Paso 70).- Explicitar las segundas derivadas de las bases locales deformadas en términos de los complejos asociados y las bases locales no deformadas.

Paso 71).- Expresar las ecuaciones del paso 69) en términos de las ecuaciones del paso 70).

Paso 72).- Usar las relaciones entre bases deformadas y bases locales no deformadas para representar las ecuaciones del paso 71) en términos de aceleración instantáneas.

Paso 73).- Derivar en términos del tiempo $t \in J$ las normas de los complejos descritas en el paso 53)

Paso 74).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 54).

Paso 75).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 55).

Paso 76).- Formular el problema cinemático inverso de aceleración.

- Pasos para modelar el problema cinemático directo de aceleración[2]:

Paso 77).- Derivar con respecto al tiempo las ecuaciones de lazo del paso 50).

Paso 78).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 61).

Paso 79).- Explicitar las ecuaciones de lazo del paso 77) en términos de las dobles derivadas de las bases locales.

Paso 80).- Derivar con respecto al tiempo las expresiones del paso 63).

Paso 81).- Transformar las expresiones del paso 81) a aceleraciones instantáneas.

Paso 82).- Explicitar las ecuaciones del paso 79) en términos de aceleraciones instantáneas.

Paso 83).- Formular el problema cinemático directo de aceleración.

3.2.- Modelado y planteamiento del problema inverso de velocidad

En esta sección se utilizarán los pasos del 38) al 56) para modelar el problema inverso de velocidad del robot paralelo motivo de estudio en este trabajo de tesis[2].

Paso 38).- Las ecuaciones del paso 22) se definen en función del tiempo $t \in J$ de la manera siguiente:

- 1) $\underline{r}'_{3,0}(t) = \underline{r}_{1,0} + \underline{L}'_{2,1}(t) + \underline{L}'_{3,2}(t)$
- 2) $\underline{r}'_{6,0}(t) = \underline{r}_{4,0} + \underline{L}'_{5,4}(t) + \underline{L}'_{6,5}(t)$
- 3) $\underline{r}'_{9,0}(t) = \underline{r}_{7,0} + \underline{L}'_{8,7}(t) + \underline{L}'_{9,8}(t)$

Paso 39).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las expresiones del paso 57) son:

- 1) $\dot{\underline{r}}'_{3,0}(t) = \dot{\underline{L}}'_{2,1}(t) + \dot{\underline{L}}'_{3,2}(t)$
- 2) $\dot{\underline{r}}'_{6,0}(t) = \dot{\underline{L}}'_{5,4}(t) + \dot{\underline{L}}'_{6,5}(t)$
- 3) $\dot{\underline{r}}'_{9,0}(t) = \dot{\underline{L}}'_{8,7}(t) + \dot{\underline{L}}'_{9,8}(t)$

Paso 40).- Las bases locales deformadas y sus componentes, así como las longitudes de los vectores se escriben en función del tiempo $t \in J$ de la manera siguiente:

- 1) $\underline{a}_J'(t) = \{ \underline{a}_1'(t), \underline{a}_2'(t) \}$
- 2) $\underline{a}_J''(t) = \{ \underline{a}_1''(t), \underline{a}_2''(t) \}$
- 3) $\underline{a}_J'''(t) = \{ \underline{a}_1'''(t), \underline{a}_2'''(t) \}$
- 4) $\underline{a}_J^{IV}(t) = \{ \underline{a}_1^{IV}(t), \underline{a}_2^{IV}(t) \}$
- 5) $\underline{a}_J^V(t) = \{ \underline{a}_1^V(t), \underline{a}_2^V(t) \}$
- 6) $\underline{a}_J^{VI}(t) = \{ \underline{a}_1^{VI}(t), \underline{a}_2^{VI}(t) \}$
- 7) $\underline{a}_J^{VII}(t) = \{ \underline{a}_1^{VII}(t), \underline{a}_2^{VII}(t) \}$

Por otro lado, las distancias $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{pot,3} \in \mathfrak{R}^+$ también se pueden escribir en términos de la función $l : J \rightarrow \mathfrak{R}^+$ de la manera siguiente:

- 1) $l_{2,1}(t) \quad ; \quad l_{3,2}(t)$
- 2) $l_{5,4}(t) \quad ; \quad l_{6,5}(t)$
- 3) $l_{8,7}(t) \quad ; \quad l_{9,8}(t)$
- 4) $l_{pot,3}(t)$

En realidad, del ser rígidos los eslabones que componen el robot las dimensiones no dependen del tiempo.

Paso 41).- Los vectores de posición de la configuración deformada se representan en términos de las expresiones del paso 40) de la manera siguiente:

- 1) $\underline{L}'_{2,1}(t) = l_{2,1} \cdot \underline{a}_1'(t)$
- 2) $\underline{L}'_{3,2}(t) = l_{3,2} \cdot \underline{a}_1''(t)$
- 3) $\underline{L}'_{5,4}(t) = l_{5,4} \cdot \underline{a}_1'''(t)$
- 4) $\underline{L}'_{6,5}(t) = l_{6,5} \cdot \underline{a}_1^{IV}(t)$
- 5) $\underline{L}'_{8,7}(t) = l_{8,7} \cdot \underline{a}_1^V(t)$

$$6) \quad \underline{L}'_{9,8}(t) = l_{9,8} \cdot \underline{a}_1^{V'}(t)$$

$$7) \quad \underline{L}'_{pot,3}(t) = l_{pot,3} \cdot \underline{a}_1^{V'''}(t)$$

Paso 42).- Las expresiones del paso 38) se escriben en términos de las ecuaciones del paso 41), esto es:

$$1) \quad \underline{r}'_{3,0}(t) = r_{1,0}(t_0) + l_{2,1} \cdot \underline{a}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \underline{a}_1''(t)$$

$$2) \quad \underline{r}'_{6,0}(t) = r_{4,0}(t_0) + l_{5,4} \cdot \underline{a}_1'''(t) + l_{6,5} \cdot \underline{a}_1^{V'}(t)$$

$$3) \quad \underline{r}'_{9,0}(t) = r_{7,0}(t_0) + l_{8,7} \cdot \underline{a}_1^V(t) + l_{9,8} \cdot \underline{a}_1^{V'}(t)$$

Paso 43).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las ecuaciones del paso 41) son:

$$1) \quad \dot{\underline{L}}_{2,1}(t) = l_{2,1} \cdot \dot{\underline{a}}_1'(t)$$

$$2) \quad \dot{\underline{L}}_{3,2}(t) = l_{3,2} \cdot \dot{\underline{a}}_1''(t)$$

$$3) \quad \dot{\underline{L}}_{5,4}(t) = l_{5,4} \cdot \dot{\underline{a}}_1'''(t)$$

$$4) \quad \dot{\underline{L}}_{6,5}(t) = l_{6,5} \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t)$$

$$5) \quad \dot{\underline{L}}_{8,7}(t) = l_{8,7} \cdot \dot{\underline{a}}_1^V(t)$$

$$6) \quad \dot{\underline{L}}_{9,8}(t) = l_{9,8} \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t)$$

$$7) \quad \dot{\underline{L}}_{pot,3}(t) = l_{pot,3} \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'''}(t)$$

Paso 44).- Las expresiones del paso 39) se escriben en términos de las ecuaciones del paso 43) de la manera siguiente:

$$1) \quad \dot{\underline{r}}_{3,0}'(t) = l_{2,1}' \cdot \dot{\underline{a}}_1'(t) + l_{3,2}' \cdot \dot{\underline{a}}_1''(t)$$

$$2) \quad \dot{\underline{r}}_{6,0}'(t) = l_{5,4}' \cdot \dot{\underline{a}}_1'''(t) + l_{6,5}' \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t)$$

$$3) \quad \dot{\underline{r}}_{9,0}'(t) = l_{8,7}' \cdot \dot{\underline{a}}_1^V(t) + l_{9,8}' \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V''}(t)$$

Paso 45).- Los complejos relacionados con la configuración deformada se escriben, en función del tiempo, de la manera siguiente[2]:

$$1) \quad P(t) = \{ P_0(t), P_1(t) \} ; Q(t) = \{ Q_0(t), Q_1(t) \}$$

$$2) \quad R(t) = \{ R_0(t), R_1(t) \} ; S(t) = \{ S_0(t), S_1(t) \}$$

$$3) \quad T(t) = \{ T_0(t), T_1(t) \} ; U(t) = \{ U_0(t), U_1(t) \}$$

$$4) \quad V(t) = \{ V_0(t), V_1(t) \}$$

Paso 46).- Las bases no deformadas se escriben en función del tiempo, esto es:

$$1) \quad \underline{e}_J'(t) = \{ \underline{e}_1'(t_0), \underline{e}_2'(t_0) \}$$

$$2) \quad \underline{e}_J''(t) = \{ \underline{e}_1''(t_0), \underline{e}_2''(t_0) \}$$

$$3) \quad \underline{e}_J'''(t) = \{ \underline{e}_1'''(t_0), \underline{e}_2'''(t_0) \}$$

$$4) \quad \underline{e}_J^V(t) = \{ \underline{e}_1^V(t_0), \underline{e}_2^V(t_0) \}$$

$$5) \quad \underline{e}_J^V'(t) = \{ \underline{e}_1^V'(t_0), \underline{e}_2^V'(t_0) \}$$

$$6) \quad \underline{e}_J^{V''}(t) = \{ \underline{e}_1^{V''}(t_0), \underline{e}_2^{V''}(t_0) \}$$

$$7) \quad \underline{e}_J^{V'''}(t) = \{ \underline{e}_1^{V'''}(t_0), \underline{e}_2^{V'''}(t_0) \}$$

En realidad dichas base no dependen del tiempo.

Paso 47).- Las bases deformadas se escriben en términos de las no deformadas de la manera siguiente:

$$1) \quad \underline{a}_1^I(t) = \rho(P(t), \underline{e}_2^I) = P(t) * \underline{e}_2^I$$

$$2) \quad \underline{a}_1^{II}(t) = \rho(Q(t), \underline{e}_2^{II}) = Q(t) * \underline{e}_2^{II}$$

$$3) \quad \underline{a}_1^{III}(t) = \rho(R(t), \underline{e}_2^{III}) = R(t) * \underline{e}_2^{III}$$

- 4) $\underline{a}_1^{IV}(t) = \rho(S(t), \underline{e}_2^{IV}) = S(t) * \underline{e}_2^{IV}$
- 5) $\underline{a}_1^V(t) = \rho(T(t), \underline{e}_2^V) = T(t) * \underline{e}_2^V$
- 6) $\underline{a}_1^{VI}(t) = \rho(U(t), \underline{e}_2^{VI}) = U(t) * \underline{e}_2^{VI}$
- 7) $\underline{a}_1^{VII}(t) = \rho(V(t), \underline{e}_2^{VII}) = V(t) * \underline{e}_2^{VII}$

Paso 48).- Las ecuaciones del paso 44) se escriben en términos del paso 47), esto es:

- 1) $\underline{r}'_{3,0}(t) = \underline{r}_{1,0} + l_{2,1} \bullet \{P(t) * \underline{e}_1'\} + l_{3,2}(t) \bullet \{Q(t) * \underline{e}_1''\}$
- 2) $\underline{r}'_{6,0}(t) = \underline{r}_{4,0} + l_{5,4} \bullet \{R(t) * \underline{e}_1'''\} + l_{6,5}(t) \bullet \{S(t) * \underline{e}_1^{IV}\}$
- 3) $\underline{r}'_{9,0}(t) = \underline{r}_{7,0} + l_{8,7} \bullet \{T(t) * \underline{e}_1^V\} + l_{9,8}(t) \bullet \{U(t) * \underline{e}_1^{VI}\}$

Paso 49).- Las derivadas de las bases locales deformadas en función del tiempo $t \in J$ son:

- 1) $\dot{\underline{a}}_1'(t) = (P(t) * \underline{e}_1') = \dot{P}(t) * \underline{e}_1'$
- 2) $\dot{\underline{a}}_1''(t) = (Q(t) * \underline{e}_1'') = \dot{Q}(t) * \underline{e}_1''$
- 3) $\dot{\underline{a}}_1'''(t) = (R(t) * \underline{e}_1''') = \dot{R}(t) * \underline{e}_1'''$
- 4) $\dot{\underline{a}}_1'^V(t) = (S(t) * \underline{e}_1'^V) = \dot{S}(t) * \underline{e}_1'^V$
- 5) $\dot{\underline{a}}_1^V(t) = (T(t) * \underline{e}_1^V) = \dot{T}(t) * \underline{e}_1^V$
- 6) $\dot{\underline{a}}_1^{V'}(t) = (U(t) * \underline{e}_1^{V'}) = \dot{U}(t) * \underline{e}_1^{V'}$
- 7) $\dot{\underline{a}}_1^{V''}(t) = (V(t) * \underline{e}_1^{V''}) = \dot{V}(t) * \underline{e}_1^{V''}$

Paso 50).- Las ecuaciones del paso 48) se escriben en términos de las expresiones del paso 44) de la manera siguiente:

- 1) $\dot{\underline{r}}'_{3,0}(t) = l_{2,1}(t) \bullet \left\{ \dot{P}(t) * \underline{e}_1' \right\} + l_{3,2}(t) \bullet \left\{ \dot{Q}(t) * \underline{e}_1'' \right\}$

$$2) \quad \dot{\underline{r}}_{6,0}'(t) = I_{5,4}(t) \cdot \left\{ \dot{\underline{R}}(t) * \underline{e}_1''' \right\} + I_{3,2}(t) \cdot \left\{ \dot{\underline{S}}(t) * \underline{e}_1'^V \right\}$$

$$3) \quad \dot{\underline{r}}_{9,0}'(t) = I_{8,7}(t) \cdot \left\{ \dot{\underline{T}}(t) * \underline{e}_1^V \right\} + I_{3,2}(t) \cdot \left\{ \dot{\underline{U}}(t) * \underline{e}_1'^V \right\}$$

Paso 51).- Las bases locales deformadas se escriben es términos de los no deformados y complejos, esto es:

$$1) \quad \underline{a}_1'(t) = P(t) * \underline{e}_1'$$

$$2) \quad \underline{a}_1''(t) = Q(t) * \underline{e}_1''$$

$$3) \quad \underline{a}_1'''(t) = R(t) * \underline{e}_1'''$$

$$4) \quad \underline{a}_1'^V(t) = S(t) * \underline{e}_1'^V$$

$$5) \quad \underline{a}_1^V(t) = T(t) * \underline{e}_1^V$$

$$6) \quad \underline{a}_1^{V'}(t) = U(t) * \underline{e}_1^{V'}$$

$$7) \quad \underline{a}_1^{V''}(t) = V(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

Por otro lado, las bases no deformadas se escriben:

$$1) \quad \underline{e}_1' = \overline{P(t)} * \underline{a}_1'(t)$$

$$2) \quad \underline{e}_1'' = \overline{Q(t)} * \underline{a}_1''(t)$$

$$3) \quad \underline{e}_1''' = \overline{R(t)} * \underline{a}_1'''(t)$$

$$4) \quad \underline{e}_1'^V = \overline{S(t)} * \underline{a}_1'^V(t)$$

$$5) \quad \underline{e}_1^V = \overline{T(t)} * \underline{a}_1^V(t)$$

$$6) \quad \underline{e}_1^{V'} = \overline{U(t)} * \underline{a}_1^{V'}(t)$$

$$7) \quad \underline{e}_1^{V''} = \overline{V(t)} * \underline{a}_1^{V''}(t)$$

Paso 52).- Las ecuaciones del paso 50) se escriben en términos de las expresiones del paso 51), esto es:

$$1) \quad \dot{\underline{r}}_{3,0}'(t) = l_{2,1} \cdot \left\{ \dot{\underline{P}}(t) * \overline{P}(t) * \underline{a}_1'(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \dot{\underline{Q}}(t) * \overline{Q}(t) * \underline{a}_1''(t) \right\}$$

$$2) \quad \dot{\underline{r}}_{6,0}'(t) = l_{5,4} \cdot \left\{ \dot{\underline{R}}(t) * \overline{R}(t) * \underline{a}_1'''(t) \right\} + l_{6,5} \cdot \left\{ \dot{\underline{S}}(t) * \overline{S}(t) * \underline{a}_1^{V'}(t) \right\}$$

$$3) \quad \dot{\underline{r}}_{9,0}'(t) = l_{8,7} \cdot \left\{ \dot{\underline{T}}(t) * \overline{T}(t) * \underline{a}_1^V(t) \right\} + l_{9,8} \cdot \left\{ \dot{\underline{U}}(t) * \overline{U}(t) * \underline{a}_1^{V'}(t) \right\}$$

Paso 53).- Las ecuaciones de norma unitaria se escriben en función del tiempo de la manera siguiente:

$$1) \quad \|\underline{P}(t)\| = P_0^2(t) + P_1^2(t) = 1$$

$$2) \quad \|\underline{Q}(t)\| = Q_0^2(t) + Q_1^2(t) = 1$$

$$3) \quad \|\underline{R}(t)\| = R_0^2(t) + R_1^2(t) = 1$$

$$4) \quad \|\underline{S}(t)\| = S_0^2(t) + S_1^2(t) = 1$$

$$5) \quad \|\underline{T}(t)\| = T_0^2(t) + T_1^2(t) = 1$$

$$6) \quad \|\underline{U}(t)\| = U_0^2(t) + U_1^2(t) = 1$$

$$7) \quad \|\underline{V}(t)\| = V_0^2(t) + V_1^2(t) = 1$$

Las derivadas de dichas normas con respecto al tiempo $t \in J$ son:

$$1) \quad \dot{P}_0(t)P_0(t) + \dot{P}_1(t)P_1(t) = 0$$

$$2) \quad \dot{Q}_0(t)Q_0(t) + \dot{Q}_1(t)Q_1(t) = 0$$

$$3) \quad \dot{R}_0(t)R_0(t) + \dot{R}_1(t)R_1(t) = 0$$

$$4) \quad \dot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}_1(t)S_1(t) = 0$$

$$5) \quad \dot{T}_0(t)T_0(t) + \dot{T}_1(t)T_1(t) = 0$$

$$6) \quad \dot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_1(t)U_1(t) = 0$$

$$7) \quad \dot{V}_0(t)V_0(t) + \dot{V}_1(t)V_1(t) = 0$$

Paso 54).- Las relaciones geométricas entre las rotaciones y los complejos se escriben en función del tiempo de la manera siguiente:

$$1) \quad P(t) = \{P_0(t), P_1(t)\} ; P_0(t) \in \mathfrak{R} ; P_0(t) = \text{Cos } \alpha_1(t) \\ P_1(t) \in \mathfrak{R} ; P_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_1(t)$$

$$2) \quad Q(t) = \{Q_0(t), Q_1(t)\} ; Q_0(t) \in \mathfrak{R} ; Q_0(t) = \text{Cos } \alpha_2(t) \\ Q_1(t) \in \mathfrak{R} ; Q_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_2(t)$$

$$3) \quad R(t) = \{R_0(t), R_1(t)\} ; R_0(t) \in \mathfrak{R} ; R_0(t) = \text{Cos } \alpha_3(t) \\ R_1(t) \in \mathfrak{R} ; R_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_3(t)$$

$$4) \quad S(t) = \{S_0(t), S_1(t)\} ; S_0(t) \in \mathfrak{R} ; S_0(t) = \text{Cos } \alpha_4(t) \\ S_1(t) \in \mathfrak{R} ; S_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_4(t)$$

$$5) \quad T(t) = \{T_0(t), T_1(t)\} ; T_0(t) \in \mathfrak{R} ; T_0(t) = \text{Cos } \alpha_5(t) \\ T_1(t) \in \mathfrak{R} ; T_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_5(t)$$

$$6) \quad U(t) = \{U_0(t), U_1(t)\} ; U_0(t) \in \mathfrak{R} ; U_0(t) = \text{Cos } \alpha_6(t) \\ U_1(t) \in \mathfrak{R} ; U_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_6(t)$$

$$7) \quad V(t) = \{V_0(t), V_1(t)\} ; V_0(t) \in \mathfrak{R} ; V_0(t) = \text{Cos } \alpha_7(t) \\ V_1(t) \in \mathfrak{R} ; V_1(t) = \pm \text{Sen } \alpha_7(t)$$

Las derivadas de dichas relaciones en función del tiempo $t \in J$ son:

$$1) \quad \dot{P}(t) = \left\{ \dot{P}_0(t), \dot{P}_1(t) \right\} ; \dot{P}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{P}_0(t) = -\dot{\alpha}_1(t) \text{Sen } \alpha_1(t) \quad (2.28)$$

$$\dot{P}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{P}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_1(t) \text{Cos } \alpha_1(t)$$

$$2) \quad \dot{Q}(t) = \left\{ \dot{Q}_0(t), \dot{Q}_1(t) \right\} ; \dot{Q}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{Q}_0(t) = -\dot{\alpha}_2(t) \text{Sen } \alpha_2(t)$$

$$\dot{Q}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{Q}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_2(t) \text{Cos } \alpha_2(t)$$

$$3) \quad \dot{R}(t) = \left\{ \dot{R}_0(t), \dot{R}_1(t) \right\} ; \dot{R}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{R}_0(t) = -\dot{\alpha}_3(t) \text{Sen } \alpha_3(t)$$

$$\dot{R}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{R}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_3(t) \text{Cos } \alpha_3(t)$$

$$4) \quad \dot{S}(t) = \left\{ \dot{S}_0(t), \dot{S}_1(t) \right\} ; \dot{S}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{S}_0(t) = -\dot{\alpha}_4(t) \text{Sen } \alpha_4(t)$$

$$\dot{S}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{S}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_4(t) \text{Cos } \alpha_4(t)$$

$$5) \quad \dot{T}(t) = \left\{ \dot{T}_0(t), \dot{T}_1(t) \right\} ; \dot{T}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{T}_0(t) = -\dot{\alpha}_5(t) \text{Sen } \alpha_5(t)$$

$$\dot{T}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{T}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_5(t) \text{Cos } \alpha_5(t)$$

$$6) \quad \dot{U}(t) = \left\{ \dot{U}_0(t), \dot{U}_1(t) \right\} ; \dot{U}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{U}_0(t) = -\dot{\alpha}_6(t) \text{Sen } \alpha_6(t)$$

$$\dot{U}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{U}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_6(t) \text{Cos } \alpha_6(t)$$

$$7) \quad \dot{V}(t) = \left\{ \dot{V}_0(t), \dot{V}_1(t) \right\} ; \dot{V}_0(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{V}_0(t) = -\dot{\alpha}_7(t) \text{Sen } \alpha_7(t)$$

$$\dot{V}_1(t) \in \mathfrak{R} ; \dot{V}_1(t) = \pm \dot{\alpha}_7(t) \text{Cos } \alpha_7(t)$$

Paso 55).- Las relaciones geométricas y cinemáticas definidas sobre la plataforma se pueden escribir en función del tiempo $t \in J$ de la manera siguiente:

- 1) $\underline{r}'_{3,0}(t) = (r'_{3,0,X}(t), r'_{3,0,Y}(t)) = [x'_{pot,0}(t) - l_{pot,3} \text{Cos} \alpha_{pot}(t), y'_{pot,0}(t) - l_{pot,3} \text{Sen} \alpha_{pot}(t)]$
- 2) $\underline{r}'_{6,0}(t) = [r'_{3,0,X}(t) + l_{3,6} \text{Cos}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t)), r'_{3,0,Y}(t) + l_{3,6} \text{Sen}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t))]$
- 3) $\underline{r}'_{9,0}(t) = [r'_{3,0,X}(t) + l_{3,9} \text{Cos}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t)), r'_{3,0,Y}(t) + l_{3,9} \text{Sen}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t))]$

Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de dichas relaciones son:

- 1) $\underline{\dot{r}}'_{3,0}(t) = (\dot{r}'_{3,0,X}(t), \dot{r}'_{3,0,Y}(t)) = [\dot{x}'_{pot,0}(t) - l_{pot,3}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Sen} \alpha_{pot}(t), \dot{y}'_{pot,0}(t) - l_{pot,3}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Cos} \alpha_{pot}(t)]$
- 2) $\underline{\dot{r}}'_{6,0}(t) = [\dot{r}'_{3,0,X}(t) + l_{3,6}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Sen}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t)), \dot{r}'_{3,0,Y}(t) + l_{3,6}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Cos}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t))]$
- 3) $\underline{\dot{r}}'_{9,0}(t) = [\dot{r}'_{3,0,X}(t) + l_{3,9}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Sen}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t)), \dot{r}'_{3,0,Y}(t) + l_{3,9}(\dot{\alpha}_{pot}(t)) \text{Cos}(\alpha_{pot}(t) - \beta_{pot}(t))]$

Paso 56).- La formulación del problema inverso de velocidad es:

“Dados, $\underline{\dot{r}}'_{3,0}(t) \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{\dot{r}}'_{6,0}(t) \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{\dot{r}}'_{9,0}(t) \in \mathfrak{R}^2$, $l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8} \in \mathfrak{R}^+$, $P(t) = \{P_0(t), P_1(t)\}$, $Q(t) = \{Q_0(t), Q_1(t)\}$, $R(t) = \{R_0(t), R_1(t)\}$, $S(t) = \{S_0(t), S_1(t)\}$, $T(t) = \{T_0(t), T_1(t)\}$, $U(t) = \{U_0(t), U_1(t)\}$, con $\|P(t)\| = \|Q(t)\| = \|R(t)\| = \|S(t)\| = \|T(t)\| = \|U(t)\| = 1$, $p = \{p_0, p_1\}$, $q = \{q_0, q_1\}$, $r = \{r_0, r_1\}$, $s = \{s_0, s_1\}$, $t = \{t_0, t_1\}$, $u = \{u_0, u_1\}$, con $\|p\| = \|q\| = \|r\| = \|s\| = \|t\| = \|u\| = 1$, encuentre: $\dot{P}(t) = \{\dot{P}_0(t), \dot{P}_1(t)\}$, $\dot{Q}(t) = \{\dot{Q}_0(t), \dot{Q}_1(t)\}$,

$$\dot{R}(t) = \left\{ \dot{R}_0(t), \dot{R}_1(t) \right\}, \quad \dot{S}(t) = \left\{ \dot{S}_0(t), \dot{S}_1(t) \right\}, \quad \dot{T}(t) = \left\{ \dot{T}_0(t), \dot{T}_1(t) \right\}, \quad \dot{U}(t) = \left\{ \dot{U}_0(t), \dot{U}_1(t) \right\},$$

tal que las expresiones del paso 55) sean satisfechas y,

$$1) \quad \dot{P}_0(t)P_0(t) + \dot{P}_1(t)P_1(t) = 0$$

$$2) \quad \dot{Q}_0(t)Q_0(t) + \dot{Q}_1(t)Q_1(t) = 0$$

$$3) \quad \dot{R}_0(t)R_0(t) + \dot{R}_1(t)R_1(t) = 0$$

$$4) \quad \dot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}_1(t)S_1(t) = 0$$

$$5) \quad \dot{T}_0(t)T_0(t) + \dot{T}_1(t)T_1(t) = 0$$

$$6) \quad \dot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_1(t)U_1(t) = 0$$

3.3.- Modelado y planteamiento del problema de velocidad directo

En esta sección se utilizarán los pasos de 57) al 56) para modelar el problema directo de velocidad.

Paso 57).- Las ecuaciones del lazo del paso 32) se escriben en función del tiempo de la manera siguiente:

$$1) \quad \dot{r}'_{3,0}(t) = \dot{L}'_{2,1}(t) + \dot{L}'_{-3,2}(t)$$

$$2) \quad \dot{r}'_{3,0}(t) = \dot{L}'_{5,4}(t) + \dot{L}'_{6,5}(t) + \dot{L}'_{3,6}(t)$$

$$3) \quad \dot{r}'_{3,0}(t) = \dot{L}'_{8,7}(t) + \dot{L}'_{-9,8}(t) + \dot{L}'_{3,9}(t)$$

Paso 58).- Las ecuaciones de lazo del paso 57) se derivan con respecto al tiempo $t \in J$; esto es:

$$1) \quad \dot{\underline{r}}_{3,0}(t) = \dot{\underline{L}}_{2,1}(t) + \dot{\underline{L}}_{-3,2}(t)$$

$$2) \quad \dot{\underline{r}}_{3,0}(t) = \dot{\underline{L}}_{5,4}(t) + \dot{\underline{L}}_{6,5}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,6}(t)$$

$$3) \quad \dot{\underline{r}}_{3,0}(t) = \dot{\underline{L}}_{8,7}(t) + \dot{\underline{L}}_{-9,8}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,9}(t)$$

o, equivalentemente:

$$1) \quad \dot{\underline{L}}_{2,1}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,2}(t) - [\dot{\underline{L}}_{3,4}(t) + \dot{\underline{L}}_{6,5}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,6}(t)] = 0$$

$$2) \quad \dot{\underline{L}}_{2,1}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,2}(t) - [\dot{\underline{L}}_{8,7}(t) + \dot{\underline{L}}_{-9,8}(t) + \dot{\underline{L}}_{3,9}(t)] = 0$$

Paso 59).- Las ecuaciones del paso 33) se escriben en términos del tiempo $t \in J$ de la manera siguiente:

$$1) \quad \underline{L}'_{3,6}(t) = l_{3,6} \cdot \underline{a}_1^{v'''}(t)$$

$$2) \quad \underline{L}'_{3,9}(t) = l_{3,9} \cdot \underline{a}_1^{x'}(t)$$

Paso 60).- las expresiones de los pasos 57) y 59) se escriben en términos del tiempo $t \in J$ y de las bases locales deformadas; esto es:

$$1) \quad \underline{r}_{1,0}(t_0) + l_{2,1} \cdot \underline{a}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \underline{a}_1''(t) - [\underline{r}_{4,0} + l_{5,4} \cdot \underline{a}_1'''(t) + \\ + l_{6,5} \cdot \underline{a}_1^{v'}(t) + l_{3,6} \cdot \underline{a}_1^{v''}(t)] = 0$$

$$2) \quad \underline{r}_{1,0}(t_0) + l_{2,1} \cdot \underline{a}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \underline{a}_1''(t) - [\underline{r}_{7,0} + l_{8,7} \cdot \underline{a}_1^v(t) + \\ + l_{9,8} \cdot \underline{a}_1^{v'}(t) + l_{3,9} \cdot \underline{a}_1^{x'}(t)] = 0$$

Paso 61).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las ecuaciones del paso 60) son:

$$1) \quad l_{2,1}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1'(t) + l_{3,2}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1''(t) - \left[l_{5,4}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1'''(t) + \right.$$

$$+l_{6,5}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t) + l_{3,6}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'''}(t)] = \underline{0}$$

$$2) \quad l_{2,1}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t) + l_{3,2}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V''}(t) - \left[l_{8,7}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^V(t) + \right. \\ \left. + l_{9,8}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'}(t) + l_{3,9}(t) \cdot \dot{\underline{a}}_1^{V'X}(t) \right] = \underline{0}$$

Paso 62).- Las expresiones del paso 55) se pueden escribir en función del tiempo $t \in J$ de la manera siguiente:

$$1) \quad W(t) = \{W_0(t), W_1(t)\}$$

$$2) \quad X(t) = \{X_0(t), X_1(t)\}$$

También, las relaciones entre las bases locales deformadas y las no deformadas se escriben en términos de los complejos asociados con la plataforma del robot; esto es:

$$1) \quad \underline{a}_1^{V'''}(t) = \rho(W(t), \underline{a}_1^{V''}(t)) = \rho(W(t), \rho(V(t), \underline{e}_1^{V''})) = \\ = W(t) * V(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

$$2) \quad \underline{a}_1^{V'X}(t) = \rho(X(t), \underline{a}_1^{V'X}(t)) = \rho(X(t), \rho(V(t), \underline{e}_1^{V''})) = \\ = X(t) * V(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

Paso 63).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las expresiones del paso 62) son:

$$1) \quad \dot{\underline{a}}_1^{V'''}(t) = W(t) * \dot{V}(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

$$2) \quad \dot{\underline{a}}_1^{V'X}(t) = X(t) * \dot{V}(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

Paso 64).- Las expresiones del paso 63) se escriben en términos de velocidades instantáneas de la manera siguiente:

$$1) \quad \dot{\underline{a}}_1^{v'''}(t) = W(t) * \dot{V}(t) * \bar{V}(t) * \bar{W}(t) * \underline{a}_1^{v''}(t)$$

$$2) \quad \dot{\underline{a}}_1^{x'}(t) = X(t) * \dot{V}(t) * \bar{V}(t) * \bar{X}(t) * \underline{a}_1^{v''}(t)$$

Paso 65).- Las ecuaciones del lazo del paso 60) se escriben en términos de las derivadas de los complejos y en función de las velocidades instantáneas de la manera siguiente:

$$1) \quad l_{2,1} \cdot \left\{ \dot{P}(t) * \bar{P}(t) * \underline{a}_1'(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \dot{Q}(t) * \bar{Q}(t) * \underline{a}_1''(t) \right\} + \\ [l_{5,4} \cdot \left\{ \dot{R}(t) * \bar{R}(t) * \underline{a}_1'''(t) \right\} + l_{6,5} \cdot \left\{ \dot{S}(t) * \bar{S}(t) * \underline{a}_1^{v'}(t) \right\} + \\ l_{3,6} \cdot \left\{ W(t) * \dot{V}(t) * \bar{V}(t) * \bar{W}(t) * \underline{a}_1^{v''}(t) \right\}] = \underline{0}$$

$$2) \quad l_{2,1} \cdot \left\{ \dot{P}(t) * \bar{P}(t) * \underline{a}_1'(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \dot{Q}(t) * \bar{Q}(t) * \underline{a}_1''(t) \right\} - \\ l_{8,7} \cdot \left\{ \dot{T}(t) * \bar{T}(t) * \underline{a}_1^v(t) \right\} + l_{9,8} \cdot \left\{ \dot{U}(t) * \bar{U}(t) * \underline{a}_1^{v'}(t) \right\} + \\ + l_{3,9} \cdot \left\{ X(t) * \dot{V}(t) * \bar{V}(t) * \bar{X}(t) * \underline{a}_1^{v''}(t) \right\}] = \underline{0}$$

Paso 66).- La formulación del problema directo de velocidad es la siguiente:

$$\text{"Dados, } \dot{P}(t) = \left\{ \dot{P}_0(t), \dot{P}_1(t) \right\}, \dot{R}(t) = \left\{ \dot{R}_0(t), \dot{R}_1(t) \right\}, \dot{T}(t) = \left\{ \dot{T}_0(t), \dot{T}_1(t) \right\}, \text{ con } \|P(t)\| =$$

$$\|R(t)\| = \|T(t)\| = 0, \quad l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}(t), l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{pot,3}, l_{3,6}, l_{3,9} \in \mathfrak{R}^+, P(t) = \{P_0(t), P_1(t)\},$$

$$\bar{P}(t) = \{P_0(t), -P_1(t)\}, Q(t) = \{Q_0(t), Q_1(t)\}, \bar{Q}(t) = \{Q_0(t), -Q_1(t)\}, R(t) = \{R_0(t), R_1(t)\},$$

$\bar{R}(t)=\{R_0(t), -R_1(t)\}$, $S(t)=\{S_0(t), S_1(t)\}$, $\bar{S}(t)=\{S_0(t), -S_1(t)\}$, $T(t)=\{T_0(t), T_1(t)\}$,
 $\bar{T}(t)=\{T_0(t), -T_1(t)\}$, $U(t)=\{U_0(t), U_1(t)\}$, $\bar{U}(t)=\{U_0(t), -U_1(t)\}$, $V(t)=\{V_0(t), V_1(t)\}$,
 $\bar{V}(t)=\{V_0(t), -V_1(t)\}$, $W(t)=\{W_0(t), W_1(t)\}$, $\bar{W}(t)=\{W_0(t), -W_1(t)\}$, $X(t)=\{X_0(t), X_1(t)\}$,
 $\bar{X}(t)=\{X_0(t), -X_1(t)\}$, Con $\|P(t)\| = \|Q(t)\| = \|R(t)\| = \|S(t)\| = \|T(t)\| = \|U(t)\| = \|V(t)\| = \|W(t)\| =$
 $\|X(t)\| = 1$, $p=\{p_0, p_1\}$, $q=\{q_0, q_1\}$, $r=\{r_0, r_1\}$, $s=\{s_0, s_1\}$, $t=\{t_0, t_1\}$, $u=\{u_0, u_1\}$, $v=\{v_0,$
 $v_1\}$, $w=\{w_0, w_1\}$, $x=\{x_0, x_1\}$, con $\|p\| = \|q\| = \|r\| = \|s\| = \|t\| = \|u\| = \|v\| = \|w\| = \|x\| = 1$,

encuentre: $\underline{r}'_{pot,0}(t) \in \mathbb{R}^2$, $\dot{Q}(t) = \left\{ \dot{Q}_0(t), \dot{Q}_1(t) \right\}$, $\dot{S}(t) = \left\{ \dot{S}_0(t), \dot{S}_1(t) \right\}$,

$\dot{U}(t) = \left\{ \dot{U}_0(t), \dot{U}_1(t) \right\}$, $\dot{V}(t) = \left\{ \dot{V}_0(t), \dot{V}_1(t) \right\}$, tal que las expresiones del paso 65 sean

satisfechas y,

- 1) $\dot{Q}_0(t)Q_0(t) + \dot{Q}_1(t)Q_1(t) = 0$
- 2) $\dot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}_1(t)S_1(t) = 0$
- 3) $\dot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_1(t)U_1(t) = 0$
- 4) $\dot{V}_0(t)V_0(t) + \dot{V}_1(t)V_1(t) = 0$

3.4.- Modelado y planteamiento del problema inverso de aceleración

En esta sección se utilizarán los pasos del 67) al 76) de la metodología descrita en la sección 3.1 de este capítulo, para modelar el problema inverso de aceleración.

Paso 67).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las expresiones 39) son:

$$1) \quad \ddot{\underline{r}}_{3,0}(t) = \ddot{\underline{L}}_{2,1}(t) + \ddot{\underline{L}}_{3,2}(t)$$

$$2) \quad \ddot{\underline{r}}_{6,0}(t) = \ddot{\underline{L}}_{5,4}(t) + \ddot{\underline{L}}_{6,5}(t)$$

$$3) \quad \ddot{\underline{r}}_{9,0}(t) = \ddot{\underline{L}}_{8,7}(t) + \ddot{\underline{L}}_{9,8}(t)$$

Paso 68).- Los vectores de velocidad definidos en el paso 41) se escriben en términos de las derivadas de las bases locales deformadas; esto es:

$$1) \quad \dot{\underline{L}}_{2,1}(t) = l_{2,1} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$2) \quad \dot{\underline{L}}_{3,2}(t) = l_{3,2} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$3) \quad \dot{\underline{L}}_{5,4}(t) = l_{5,4} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$4) \quad \dot{\underline{L}}_{6,5}(t) = l_{6,5} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$5) \quad \dot{\underline{L}}_{8,7}(t) = l_{8,7} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$6) \quad \dot{\underline{L}}_{9,8}(t) = l_{9,8} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

$$7) \quad \dot{\underline{L}}_{\text{pot},3}(t) = l_{\text{pot},3} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t)$$

Por otro lado, las derivadas de dichos vectores en función del tiempo $t \in J$ son las siguientes:

$$1) \quad \ddot{\underline{L}}_{2,1}(t) = \left(\dot{\underline{L}}_{2,1}(t) \right)' = \left(l_{2,1} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t) \right)' = l_{2,1} \cdot \ddot{\underline{a}}_1(t)$$

$$2) \quad \ddot{\underline{L}}_{3,2}(t) = \left(\dot{\underline{L}}_{3,2}(t) \right)' = \left(l_{3,2} \cdot \dot{\underline{a}}_1(t) \right)' = l_{3,2} \cdot \ddot{\underline{a}}_1(t)$$

$$\begin{aligned}
3) \quad \ddot{\underline{L}}'_{5,4}(t) &= \left(\dot{\underline{L}}'_{5,4}(t) \right)' = \left(l_{5,4} \cdot \dot{\underline{a}}'''_1(t) \right)' = l_{5,4} \cdot \ddot{\underline{a}}'''_1(t) \\
4) \quad \ddot{\underline{L}}'_{6,5}(t) &= \left(\dot{\underline{L}}'_{6,5}(t) \right)' = \left(l_{6,5} \cdot \dot{\underline{a}}'^{V}_1(t) \right)' = l_{6,5} \cdot \ddot{\underline{a}}'^{V}_1(t) \\
5) \quad \ddot{\underline{L}}'_{8,7}(t) &= \left(\dot{\underline{L}}'_{8,7}(t) \right)' = \left(l_{8,7} \cdot \dot{\underline{a}}^V_1(t) \right)' = l_{8,7} \cdot \ddot{\underline{a}}^V_1(t) \\
6) \quad \ddot{\underline{L}}'_{9,8}(t) &= \left(\dot{\underline{L}}'_{9,8}(t) \right)' = \left(l_{9,8} \cdot \dot{\underline{a}}^{V'}_1(t) \right)' = l_{9,8} \cdot \ddot{\underline{a}}^{V'}_1(t) \\
7) \quad \ddot{\underline{L}}'_{\text{pot},3}(t) &= \left(\dot{\underline{L}}'_{\text{pot},3}(t) \right)' = \left(l_{\text{pot},3} \cdot \dot{\underline{a}}'_1(t) \right)' = l_{\text{pot},3} \cdot \ddot{\underline{a}}^{V''}_1(t)
\end{aligned}$$

Paso 69).- Las ecuaciones del paso 67) se escriben en términos de las expresiones del paso 68) de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
1) \quad \ddot{\underline{r}}'_{3,0}(t) &= l_{2,1} \cdot \ddot{\underline{a}}'_1(t) + l_{3,2} \cdot \ddot{\underline{a}}''_1(t) \\
2) \quad \ddot{\underline{r}}'_{6,0}(t) &= l_{5,4} \cdot \ddot{\underline{a}}'''_1(t) + l_{6,5} \cdot \ddot{\underline{a}}'^{V}_1(t) \\
3) \quad \ddot{\underline{r}}'_{9,0}(t) &= l_{8,7} \cdot \ddot{\underline{a}}^V_1(t) + l_{9,8} \cdot \ddot{\underline{a}}^{V'}_1(t)
\end{aligned}$$

Paso 70).- Las segundas derivadas de las bases deformadas son:

$$\begin{aligned}
1) \quad \ddot{\underline{a}}'_1(t) &= \left(\dot{\underline{a}}'_1(t) \right)' = \left(\dot{\underline{P}}(t) * \underline{e}'_1 \right)' = \ddot{\underline{P}}(t) * \underline{e}'_1 \\
2) \quad \ddot{\underline{a}}'_2(t) &= \left(\dot{\underline{a}}''_1(t) \right)' = \left(\dot{\underline{Q}}(t) * \underline{e}''_1 \right)' = \ddot{\underline{Q}}(t) * \underline{e}''_1 \\
3) \quad \ddot{\underline{a}}'''_1(t) &= \left(\dot{\underline{a}}'''_1(t) \right)' = \left(\dot{\underline{R}}(t) * \underline{e}'''_1 \right)' = \ddot{\underline{R}}(t) * \underline{e}'''_1
\end{aligned}$$

$$4) \quad \ddot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V} = \left(\dot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V} \right)^{\cdot} = \left(\dot{\underline{S}}(t) * \underline{e}^{\prime V_1} \right)^{\cdot} = \ddot{\underline{S}}(t) * \underline{e}^{\prime V_1}$$

$$5) \quad \ddot{\underline{a}}_{1(t)}^V = \left(\dot{\underline{a}}_{1(t)}^V \right)^{\cdot} = \left(\dot{\underline{T}}(t) * \underline{e}^V_1 \right)^{\cdot} = \ddot{\underline{T}}(t) * \underline{e}^V_1$$

$$6) \quad \ddot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V'} = \left(\dot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V'} \right)^{\cdot} = \left(\dot{\underline{U}}(t) * \underline{e}^{\prime V'_1} \right)^{\cdot} = \ddot{\underline{U}}(t) * \underline{e}^{\prime V'_1}$$

$$7) \quad \ddot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V''} = \left(\dot{\underline{a}}_{1(t)}^{\prime V''} \right)^{\cdot} = \left(\dot{\underline{V}}(t) * \underline{e}^{\prime V''_1} \right)^{\cdot} = \ddot{\underline{V}}(t) * \underline{e}^{\prime V''_1}$$

Paso 71).- Las ecuaciones del paso 69) se escriben en términos de los expresiones del paso 70) de la manera siguiente:

$$1) \quad \ddot{\underline{r}}_{3,0}^{\prime}(t) = l_{2,1} \cdot \left\{ \ddot{\underline{P}}(t) * \underline{e}^{\prime}_1 \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \ddot{\underline{Q}}(t) * \underline{e}^{\prime\prime}_1 \right\}$$

$$2) \quad \ddot{\underline{r}}_{6,0}^{\prime}(t) = l_{5,4} \cdot \left\{ \ddot{\underline{R}}(t) * \underline{e}^{\prime\prime\prime}_1 \right\} + l_{6,5} \cdot \left\{ \ddot{\underline{S}}(t) * \underline{e}^{\prime V_1} \right\}$$

$$3) \quad \ddot{\underline{r}}_{9,0}^{\prime}(t) = l_{8,7} \cdot \left\{ \ddot{\underline{T}}(t) * \underline{e}^V_1 \right\} + l_{9,8} \cdot \left\{ \ddot{\underline{U}}(t) * \underline{e}^{\prime V'_1} \right\}$$

Paso 72).- Las aceleraciones instantáneas relacionadas con las ecuaciones del paso 71) son:

$$1) \quad \ddot{\underline{r}}_{3,0}^{\prime}(t) = l_{2,1} \cdot \left\{ \ddot{\underline{P}}(t) * \bar{\underline{P}}(t) * \underline{a}^{\prime}_1(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \ddot{\underline{Q}}(t) * \bar{\underline{Q}}(t) * \underline{a}^{\prime\prime}_1(t) \right\}$$

$$2) \quad \ddot{\underline{r}}_{6,0}^{\prime}(t) = l_{5,4} \cdot \left\{ \ddot{\underline{R}}(t) * \bar{\underline{R}}(t) * \underline{a}^{\prime\prime\prime}_1(t) \right\} + l_{6,5} \cdot \left\{ \ddot{\underline{S}}(t) * \bar{\underline{S}}(t) * \underline{a}^{\prime V_1}(t) \right\}$$

$$3) \quad \ddot{\underline{r}}_{9,0}^{\prime}(t) = l_{8,7} \cdot \left\{ \ddot{\underline{T}}(t) * \bar{\underline{T}}(t) * \underline{a}^V_1(t) \right\} + l_{9,8} \cdot \left\{ \ddot{\underline{U}}(t) * \bar{\underline{U}}(t) * \underline{a}^{\prime V'_1}(t) \right\}$$

Paso 73).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las normas unitarias (Ya derivadas) del paso 55) son las siguientes:

- 1) $\ddot{P}_0(t)P_0(t) + \dot{P}_0^2(t) + \ddot{P}_1(t)P_1(t) + \dot{P}_1^2(t) = 0$
- 2) $\ddot{Q}_0(t)Q_0(t) + \dot{Q}_0^2(t) + \ddot{Q}_1(t)Q_1(t) + \dot{Q}_1^2(t) = 0$
- 3) $\ddot{R}_0(t)R_0(t) + \dot{R}_0^2(t) + \ddot{R}_1(t)R_1(t) + \dot{R}_1^2(t) = 0$
- 4) $\ddot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}_0^2(t) + \ddot{S}_1(t)S_1(t) + \dot{S}_1^2(t) = 0$
- 5) $\ddot{T}_0(t)T_0(t) + \dot{T}_0^2(t) + \ddot{T}_1(t)T_1(t) + \dot{T}_1^2(t) = 0$
- 6) $\ddot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_0^2(t) + \ddot{U}_1(t)U_1(t) + \dot{U}_1^2(t) = 0$
- 7) $\ddot{V}_0(t)V_0(t) + \dot{V}_0^2(t) + \ddot{V}_1(t)V_1(t) + \dot{V}_1^2(t) = 0$

Paso 74).- Las derivadas con respecto al $t \in J$ de las ecuaciones del paso 59) son:

$$1) \ddot{P}(t) = \left\{ \ddot{P}_0(t), \ddot{P}_1(t) \right\}; \ddot{P}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{P}_0(t) = +\ddot{\alpha}_1(t)\text{Sen}\alpha_1(t) - \dot{\alpha}_1^2(t)\text{Cos}\alpha_1(t)$$

$$\ddot{P}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{P}_1(t) = \pm\ddot{\alpha}_1(t)\text{Cos}\alpha_1(t) \mp \dot{\alpha}_1^2(t)\text{Sen}\alpha_1(t)$$

$$2) \ddot{Q}(t) = \left\{ \ddot{Q}_0(t), \ddot{Q}_1(t) \right\}; \ddot{Q}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{Q}_0(t) = +\ddot{\alpha}_2(t)\text{Sen}\alpha_2(t) - \dot{\alpha}_2^2(t)\text{Cos}\alpha_2(t)$$

$$\ddot{Q}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{Q}_1(t) = -\ddot{\alpha}_2(t)\text{Cos}\alpha_2(t) - \dot{\alpha}_2^2(t)\text{Sen}\alpha_2(t)$$

$$3) \ddot{R}(t) = \left\{ \ddot{R}_0(t), \ddot{R}_1(t) \right\}; \ddot{R}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{R}_0(t) = +\ddot{\alpha}_3(t)\text{Sen}\alpha_3(t) - \dot{\alpha}_3^2(t)\text{Cos}\alpha_3(t)$$

$$\ddot{R}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{R}_1(t) = -\ddot{\alpha}_3(t)\text{Cos}\alpha_3(t) - \dot{\alpha}_3^2(t)\text{Sen}\alpha_3(t)$$

$$4) \ddot{\mathbf{S}}(t) = \left\{ \ddot{\mathbf{S}}_0(t), \ddot{\mathbf{S}}_1(t) \right\}; \ddot{\mathbf{S}}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{S}}_0(t) = +\ddot{\alpha}_4(t)\text{Sen}\alpha_4(t) - \dot{\alpha}_4^2(t)\text{Cos}\alpha_4(t)$$

$$\ddot{\mathbf{S}}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{S}}_1(t) = -\ddot{\alpha}_4(t)\text{Cos}\alpha_4(t) - \dot{\alpha}_4^2(t)\text{Sen}\alpha_4(t)$$

$$5) \ddot{\mathbf{T}}(t) = \left\{ \ddot{\mathbf{T}}_0(t), \ddot{\mathbf{T}}_1(t) \right\}; \ddot{\mathbf{T}}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{T}}_0(t) = +\ddot{\alpha}_5(t)\text{Sen}\alpha_5(t) - \dot{\alpha}_5^2(t)\text{Cos}\alpha_5(t)$$

$$\ddot{\mathbf{T}}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{T}}_1(t) = -\ddot{\alpha}_5(t)\text{Cos}\alpha_5(t) - \dot{\alpha}_5^2(t)\text{Sen}\alpha_5(t)$$

$$6) \ddot{\mathbf{U}}(t) = \left\{ \ddot{\mathbf{U}}_0(t), \ddot{\mathbf{U}}_1(t) \right\}; \ddot{\mathbf{U}}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{U}}_0(t) = +\ddot{\alpha}_6(t)\text{Sen}\alpha_6(t) - \dot{\alpha}_6^2(t)\text{Cos}\alpha_6(t)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{U}}_1(t) = -\ddot{\alpha}_6(t)\text{Cos}\alpha_6(t) - \dot{\alpha}_6^2(t)\text{Sen}\alpha_6(t)$$

$$7) \ddot{\mathbf{V}}(t) = \left\{ \ddot{\mathbf{V}}_0(t), \ddot{\mathbf{V}}_1(t) \right\}; \ddot{\mathbf{V}}_0(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{V}}_0(t) = +\ddot{\alpha}_7(t)\text{Sen}\alpha_7(t) - \dot{\alpha}_7^2(t)\text{Cos}\alpha_7(t)$$

$$\ddot{\mathbf{V}}_1(t) \in \mathfrak{R}; \ddot{\mathbf{V}}_1(t) = -\ddot{\alpha}_7(t)\text{Cos}\alpha_7(t) - \dot{\alpha}_7^2(t)\text{Sen}\alpha_7(t)$$

Paso 75).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in \mathfrak{R}^+$ de las expresiones 55) se escriben de la manera siguiente:

$$1) \ddot{\mathbf{r}}_{3,0}(t) = (\ddot{\mathbf{r}}_{3,0,X}(t), \ddot{\mathbf{r}}_{3,0,Y}(t)) = \left(\ddot{X}_{\text{pot},0}(t) - \left[l_{\text{pot},3}(-\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t))\text{sen}\alpha_{\text{pot}}(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{\text{pot},3}(-\dot{\alpha}_{\text{pot}}^2(t)\text{cos}\alpha_{\text{pot}}(t)) \right], \ddot{Y}_{\text{pot},0}(t) - \left[l_{\text{pot},3}\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t)\text{cos}\alpha_{\text{pot}}(t) + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{\text{pot},3}(\dot{\alpha}_{\text{pot}}^2(t)\text{sen}\alpha_{\text{pot}}(t)) \right] \right)$$

$$2) \ddot{\mathbf{r}}_{6,0}(t) = \left(\ddot{\mathbf{r}}_{3,0,X}(t) + \left[l_{3,6}(-\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t))\text{sen}(\alpha_{\text{pot}}(t) - \beta_{\text{pot}}(t)) + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{3,6}(-\dot{\alpha}_{\text{pot}}^2(t)\text{cos}(\alpha_{\text{pot}}(t) - \beta_{\text{pot}}(t))) \right], \right.$$

$$\left. \ddot{\mathbf{r}}_{3,0,Y}(t) + l_{3,6}\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t)\text{cos}(\alpha_{\text{pot}}(t) - \beta_{\text{pot}}(t)) + \right)$$

$$+l_{3,6}(\dot{\alpha}_{\text{pot}}(t))^2 \text{sen}(\alpha_{\text{pot}}(t) - \beta_{\text{pot}}(t))$$

$$3) \quad \ddot{r}'_{9,0}(t) = \left(\ddot{r}'_{3,0,X}(t) + l_{3,9}(-\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t)) \text{sen}(\alpha_{\text{pot}}(t) + \beta_{\text{pot}}(t)) + \right. \\ \left. + l_{3,9}(\dot{\alpha}_{\text{pot}}(t))^2 \text{cos}(\alpha_{\text{pot}}(t) - \beta_{\text{pot}}(t)), \right. \\ \left. \ddot{r}'_{3,0,Y} + l_{3,9}(\ddot{\alpha}_{\text{pot}}(t)) \text{cos}(\alpha_{\text{pot}}(t) + \beta_{\text{pot}}(t)) + \right.$$

Paso 76).- La formulación del problema inverso de aceleración es:

“Dados, $\ddot{r}'_{3,0}(t) \in \mathbb{R}^2$, $\ddot{r}'_{6,0}(t) \in \mathbb{R}^2$, $\ddot{r}'_{9,0}(t) \in \mathbb{R}^2$, $l_{3,2}$, $l_{3,2}$, $l_{5,4}$, $l_{6,5}$, $l_{8,7}$, $l_{9,8} \in \mathbb{R}^+$,

$$P(t) = \{P_0(t), P_1(t)\}, \quad \overline{P}(t) = \{P_0(t), -P_1(t)\}, \quad Q(t) = \{Q_0(t), Q_1(t)\}, \\ \overline{Q}(t) = \{Q_0(t), -Q_1(t)\}, \quad R(t) = \{R_0(t), R_1(t)\}, \quad \overline{R}(t) = \{R_0(t), -R_1(t)\}, \quad S(t) = \{S_0(t), S_1(t)\}, \\ \overline{S}(t) = \{S_0(t), -S_1(t)\}, \quad T(t) = \{T_0(t), T_1(t)\}, \quad \overline{T}(t) = \{T_0(t), -T_1(t)\}, \quad U(t) = \{U_0(t), U_1(t)\}, \\ \overline{U}(t) = \{U_0(t), -U_1(t)\}, \quad \text{con} \quad \|P(t)\| = \|Q(t)\| = \|R(t)\| = \|S(t)\| = \|T(t)\| = \|U(t)\| = 1, \quad p = \{p_0, p_1\}, \\ q = \{q_0, q_1\}, \quad r = \{r_0, r_1\}, \quad s = \{s_0, s_1\}, \quad t = \{t_0, t_1\}, \quad u(t) = \{u_0, u_1\}, \quad \text{con} \\ \|p\| = \|q\| = \|r\| = \|s\| = \|t\| = \|u\| = 1, \quad \text{encuentre:} \quad \ddot{P}(t) = \{\ddot{P}_0(t), \ddot{P}_1(t)\}, \quad \ddot{Q}(t) = \{\ddot{Q}_0(t), \ddot{Q}_1(t)\}, \\ \ddot{R}(t) = \{\ddot{R}_0(t), \ddot{R}_1(t)\}, \quad \ddot{S}(t) = \{\ddot{S}_0(t), \ddot{S}_1(t)\}, \quad \ddot{T}(t) = \{\ddot{T}_0(t), \ddot{T}_1(t)\}, \quad \ddot{U}(t) = \{\ddot{U}_0(t), \ddot{U}_1(t)\},$$

tal que las expresiones del paso 75) sean satisfechas y,

$$1) \quad \ddot{P}_0(t)P_0(t) + \dot{P}'_0(t)^2 + \ddot{P}_1(t)P_1(t) + \dot{P}'_1(t)^2 = 0$$

$$2) \quad \ddot{Q}_0(t)P_0(t) + \dot{Q}'_0(t)^2 + \ddot{Q}_1(t)P_1(t) + \dot{Q}'_1(t)^2 = 0$$

$$3) \quad \ddot{R}_0(t)P_0(t) + \dot{R}'_0(t)^2 + \ddot{R}_1(t)P_1(t) + \dot{R}'_1(t)^2 = 0$$

$$4) \quad \ddot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}'_0(t)^2 + \ddot{S}_1(t)S_1(t) + \dot{S}'_1(t)^2 = 0$$

$$5) \quad \ddot{T}_0(t)T_0(t) + \dot{T}_0^2(t) + \ddot{T}_1(t)T_1(t) + \dot{T}_1^2(t) = 0$$

$$6) \quad \ddot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_0^2(t) + \ddot{U}_1(t)U_1(t) + \dot{U}_1^2(t) = 0''$$

3.5.- Modelado y formulación del problema directo de aceleración

En esta sección se usará los pasos del 77) al 83) de la metodología descrita en la sección 3.1 de este capítulo, para modelar y formular el problema directo de aceleración[2].

Paso 77).- Las derivadas con respecto al tiempo $t \in J$ de las ecuaciones del paso 58) son:

$$1) \quad \underline{\ddot{L}}_{2,1}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{3,2}'(t) - [\underline{\ddot{L}}_{3,4}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{6,5}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{3,6}'(t)] = \underline{0}$$

$$2) \quad \underline{\ddot{L}}_{2,1}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{3,2}'(t) - [\underline{\ddot{L}}_{8,7}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{9,8}'(t) + \underline{\ddot{L}}_{3,9}'(t)] = \underline{0}$$

Paso 78).- Las derivadas con respecto al tiempo de las ecuaciones del paso 61) son las siguientes:

$$1) \quad \underline{\ddot{L}}_{3,6}'(t) = l_{3,6} \cdot \underline{\ddot{a}}_1^{v'''}(t)$$

$$2) \quad \underline{\ddot{L}}_{3,9}'(t) = l_{3,9} \cdot \underline{\ddot{a}}_1^{x'}(t)$$

Paso 79).- las ecuaciones del lazo del paso 77) se escriben en términos de los dobles derivados de las bases locales de la manera siguiente:

$$1) \quad l_{2,1} \cdot \ddot{\underline{a}}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \ddot{\underline{a}}_1''(t) - [l_{5,4} \cdot \ddot{\underline{a}}_1'''(t) + l_{6,5} \cdot \ddot{\underline{a}}_1^{V'}(t) + l_{3,6} \cdot \ddot{\underline{a}}_1^{V''}(t)] = 0$$

$$2) \quad l_{2,1} \cdot \ddot{\underline{a}}_1'(t) + l_{3,2} \cdot \ddot{\underline{a}}_1''(t) - [l_{8,7} \cdot \ddot{\underline{a}}_1^V(t) + l_{9,8} \cdot \ddot{\underline{a}}_1^{V'}(t) + l_{3,9} \cdot \ddot{\underline{a}}_1^{X'}(t)] = 0$$

Paso 80).- Las derivadas con respecto al tiempo de la expresiones del paso 63) son:

$$1) \quad \ddot{\underline{a}}_1^{V'''}(t) = W(t) * \ddot{V}(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

$$2) \quad \ddot{\underline{a}}_1^{X'}(t) = X(t) * \ddot{V}(t) * \underline{e}_1^{V''}$$

Paso 81).- Las aceleraciones instantáneas asociadas con las bases locales deformadas son las siguientes:

$$1) \quad \ddot{\underline{a}}_1^{V'''}(t) = W(t) * \ddot{V}(t) * \overline{V(t)} * \overline{W(t)} * \underline{a}_1^{V''}(t)$$

$$2) \quad \ddot{\underline{a}}_1^{X'}(t) = X(t) * \ddot{V}(t) * \overline{V(t)} * \overline{X(t)} * \underline{a}_1^{V''}(t)$$

Paso 82).- Las ecuaciones del paso 79) se escriben en términos de las aceleraciones instantáneas de la manera siguiente:

$$1) \quad l_{2,1} \cdot \left\{ \ddot{P}(t) * \overline{P(t)} * \underline{a}_1'(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \ddot{Q}(t) * \overline{Q(t)} * \underline{a}_1''(t) \right\} - \left[l_{5,4} \cdot \left\{ \ddot{R}(t) * \overline{R(t)} * \underline{a}_1'''(t) \right\} + l_{6,5} \cdot \left\{ \ddot{S}(t) * \overline{S(t)} * \underline{a}_1^{V'}(t) \right\} + \right.$$

$$-l_{3,6} \cdot \left\{ W(t) * \ddot{V}(t) * \overline{V(t)} * \overline{W(t)} * \underline{a}_1^{v''}(t) \right\} = \underline{0}$$

$$2) \quad l_{2,1} \cdot \left\{ \ddot{P}(t) * \overline{P(t)} * \underline{a}_1'(t) \right\} + l_{3,2} \cdot \left\{ \ddot{Q}(t) * \overline{Q(t)} * \underline{a}_1''(t) \right\} - \\ - \left[l_{8,7} \cdot \left\{ \ddot{T}(t) * \overline{T(t)} * \underline{a}_1^v(t) \right\} + l_{9,8} \cdot \left\{ \ddot{U}(t) * \overline{U(t)} * \underline{a}_1^{v'}(t) \right\} + \right. \\ \left. - l_{3,9} \cdot \left\{ X(t) * \ddot{V}(t) * \overline{V(t)} * \overline{X(t)} * \underline{a}_1^{v''}(t) \right\} \right] = \underline{0}$$

Paso 83).- La formulación del problema directo de aceleración es[2]:

$$\text{“Dados, } \ddot{P}(t) = \{ \ddot{P}_0(t), \ddot{P}_1(t) \}, \quad \ddot{R}(t) = \{ \ddot{R}_0(t), \ddot{R}_1(t) \}, \quad \ddot{T}(t) = \{ \ddot{T}_0(t), \ddot{T}_1(t) \}, \quad \text{con}$$

$$\|P(t)\| = \|R(t)\| = \|T(t)\| = 0, \quad l_{2,1}, l_{3,2}, l_{5,4}, l_{6,5}, l_{8,7}, l_{9,8}, l_{pot,3}, l_{3,6}, l_{3,9} \in \mathfrak{R}^+, \quad P(t) = \{ P_0(t), P_1(t) \},$$

$$\overline{P(t)} = \{ P_0(t), -P_1(t) \}, \quad Q(t) = \{ Q_0(t), Q_1(t) \}, \quad \overline{Q(t)} = \{ Q_0(t), -Q_1(t) \},$$

$$R(t) = \{ R_0(t), R_1(t) \}, \quad \overline{R(t)} = \{ R_0(t), -R_1(t) \}, \quad S(t) = \{ S_0(t), S_1(t) \}, \quad \overline{S(t)} = \{ S_0(t), -S_1(t) \},$$

$$T(t) = \{ T_0(t), T_1(t) \}, \quad \overline{T(t)} = \{ T_0(t), -T_1(t) \}, \quad U(t) = \{ U_0(t), U_1(t) \},$$

$$\overline{U(t)} = \{ U_0(t), -U_1(t) \}, \quad V(t) = \{ V_0(t), V_1(t) \}, \quad \overline{V(t)} = \{ V_0(t), -V_1(t) \}, \quad W(t) = \{ W_0(t), W_1(t) \},$$

$$\overline{W(t)} = \{ W_0(t), -W_1(t) \}, \quad X(t) = \{ X_0(t), X_1(t) \}, \quad \overline{X(t)} = \{ X_0(t), -X_1(t) \}, \quad \text{con}$$

$$\|P(t)\| = \|Q(t)\| = \|R(t)\| = \|S(t)\| = \|T(t)\| = \|U(t)\| = \|V(t)\| = \|W(t)\| = \|X(t)\| = 1; \quad p = \{ p_0, p_1 \},$$

$$q = \{ q_0, q_1 \}, \quad r = \{ r_0, r_1 \}, \quad s = \{ s_0, s_1 \}, \quad t = \{ t_0, t_1 \}, \quad u = \{ u_0, u_1 \}, \quad v = \{ v_0, v_1 \}, \quad w = \{ w_0, w_1 \},$$

$$x = \{ x_0, x_1 \}, \text{ con } \|p(t_0)\| = \|q(t_0)\| = \|r(t_0)\| = \|s(t_0)\| = \|t(t_0)\| = \|u(t_0)\| = \|v(t_0)\| = \|w(t_0)\| = \|x(t_0)\| = 1,$$

$$\text{encuentre: } \ddot{r}'_{pot,0}(t) \in \mathfrak{R}^2, \quad \ddot{Q}(t) = \{ \ddot{Q}_0(t), \ddot{Q}_1(t) \}, \quad \ddot{S}(t) = \{ \ddot{S}_0(t), \ddot{S}_1(t) \},$$

$$\ddot{U}(t) = \{ \ddot{U}_0(t), \ddot{U}_1(t) \}, \quad \ddot{V}(t) = \{ \ddot{V}_0(t), \ddot{V}_1(t) \}, \text{ tal que las expresiones del paso 82) sean}$$

satisfechas y,

- 1) $\ddot{Q}_0(t)P_0(t) + \dot{Q}_0^2(t) + \ddot{Q}_1(t)P_1(t) + \dot{Q}_1^2(t) = 0$
- 2) $\ddot{S}_0(t)S_0(t) + \dot{S}_0^2(t) + \ddot{S}_1(t)S_1(t) + \dot{S}_1^2(t) = 0$
- 3) $\ddot{U}_0(t)U_0(t) + \dot{U}_0^2(t) + \ddot{U}_1(t)U_1(t) + \dot{U}_1^2(t) = 0$
- 4) $\ddot{V}_0(t)V_0(t) + \dot{V}_0^2(t) + \ddot{V}_1(t)V_1(t) + \dot{V}_1^2(t) = 0$

3.6.- Programación de los modelos de velocidad

En esta sección se presenta la programación de los modelos de velocidad relacionados con el robot paralelo motivo de estudio en el trabajo. Dicha programación es hecha en la plataforma VISUAL BASIC VERSION 6.0[1].

3.6.1.- Programación del problema de inverso de velocidad

- Definición de variables complejas y con índice de intervalo.

Dim R3d(1, 0 To 100) As Single

Dim R6d(1, 0 To 100) As Single

Dim R9d(1, 0 To 100) As Single

Dim Pd(1, 0 To 100) As Single

Dim Qd(1, 0 To 100) As Single

Dim Rd(1, 0 To 100) As Single

Dim Sd(1, 0 To 100) As Single

Dim Td(1, 0 To 100) As Single

Dim Ud(1, 0 To 100) As Single

- Definición de los vectores temporales para velocidad.

Dim LL1d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL2d(1, 0 To 100) As Single
Dim LL3d(1, 0 To 100) As Single
Dim LL4d(1, 0 To 100) As Single
Dim LL5d(1, 0 To 100) As Single
Dim LL6d(1, 0 To 100) As Single

- Definición de los velocidades angulares a encontrar.

Dim tetha1d(0 To 100) As Single
Dim tetha2d(0 To 100) As Single
Dim tetha3d(0 To 100) As Single
Dim tetha4d(0 To 100) As Single
Dim tetha5d(0 To 100) As Single
Dim tetha6d(0 To 100) As Single

- Definición de la variables complejos conjugados.

Dim Mc(1) As Single
Dim Nc(1) As Single
Dim Pc(1) As Single
Dim Qc(1) As Single
Dim Rc(1) As Single
Dim Sc(1) As Single
Dim Tc(1) As Single
Dim Uc(1) As Single
Dim Vc(1) As Single
Dim Wc(1) As Single
Dim xc(1) As Single

- Definición de las bases móviles.

Dim a11(1) As Single
Dim a21(1) As Single
Dim a12(1) As Single

Dim a22(1) As Single
Dim a17(1) As Single
Dim a27(1) As Single
Dim a18(1) As Single
Dim a28(1) As Single
Dim a19(1) As Single
Dim a29(1) As Single
Dim a13(1) As Single
Dim a23(1) As Single
Dim a14(1) As Single
Dim a24(1) As Single
Dim a15(1) As Single
Dim a25(1) As Single
Dim a16(1) As Single
Dim a26(1) As Single

- Definición de la variable de tiempo.

Dim tiempo As Integer
Dim intervalofinal As Integer

- Genera la tabla de los resultados del modelo de velocidad.

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim i As Integer  
Dim itemp As Integer  
Dim intervalofinal As Integer  
Dim vx, vy, va As Integer  
intervalofinal = Int(Text1.Text)  
vx = Int(Text3.Text)  
vy = Int(Text4.Text)  
va = Int(Text5.Text)
```

```

For i = itemp To intervalofinal + itemp Step 1
    cinematicalInversaVEL vx + 0, vy + 0, va + 0, i
    adodc1.Recordset.AddNew
    adodc1.Recordset("tiempo(S)") = i
    adodc1.Recordset("R3(0)") = R3d(0, i)
    adodc1.Recordset("R3(1)") = R3d(1, i)
    adodc1.Recordset("R6(0)") = R6d(0, i)
    adodc1.Recordset("R6(1)") = R6d(1, i)
    adodc1.Recordset("R9(0)") = R9d(0, i)
    adodc1.Recordset("R9(1)") = R9d(1, i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha1)") = tetha1d(i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha2)") = tetha2d(i)
    adodc1.Recordset("CC2(tetha3)") = tetha3d(i)
    adodc1.Recordset("CC2(tetha4)") = tetha4d(i)
    adodc1.Recordset("CC3(tetha5)") = tetha5d(i)
    adodc1.Recordset("CC3(tetha6)") = tetha6d(i)
    adodc1.Recordset.MoveNext
Next
End Sub

```

- Borra la tabla de los resultados del modelo de velocidad.

```

Private Sub Command2_Click()
    intervalofinal = Int(Text1.Text)
    adodc1.Recordset.MoveLast
    For i = 0 To intervalofinal Step 1
        adodc1.Recordset.MoveFirst
        adodc1.Recordset.Delete adAffectCurrent
    Next
    adodc1.Recordset.Update
End Sub

```

- Sale de la ventana de modelación de posición.

```
Private Sub salir_Click()
```

```
Unload Me
```

```
End Sub
```

- Determinación de los resultados para la cinemática inversa de modelo .

```
Public Sub cinematicaInverzaVEL(x As Single, y As Single, Vangular As Single,
seg As Integer)
```

```
Dim Bpl As Single
```

- Definición de ángulos temporales.

```
Dim angulo1 As Single
```

```
Dim angulo2 As Single
```

- Definición de variables para el modelo.

```
Dim Xpotd(100) As Integer
```

```
Dim Ypotd(100) As Integer
```

```
Dim alfapotd(100) As Integer
```

```
Dim bethapot(100) As Integer
```

- Tiempo donde se evalúa.

```
tiempo = seg
```

```
'Tolerancia
```

```
rango = 5
```

```
'base de referencia
```

```
E1(0) = 1
```

```
E1(1) = 0
```

- Definición del ángulo de la plataforma .

$$\text{alfapotd}(\text{tiempo}) = \text{GtoR}(\text{Vangular})$$

- Coordenadas de referencia.

$$\text{Rpot}(0) = x$$

$$\text{Rpot}(1) = y$$

$$\text{Xpotd}(\text{tiempo}) = \text{Rpot}(0)$$

$$\text{Ypotd}(\text{tiempo}) = \text{Rpot}(1)$$

- Definición de los vectores que componen al robot.

$$\text{Bpl} = \text{GtoR}(30)$$

$$\text{Ipot} = 400$$

$$\text{L36} = \text{Ipot} * 2$$

$$\text{L39} = \text{Ipot} * 2$$

$$\text{L1} = \text{L36}$$

$$\text{L2} = \text{L1}$$

$$\text{L3} = \text{L1}$$

$$\text{L4} = \text{L1}$$

$$\text{L5} = \text{L1}$$

$$\text{L6} = \text{L1}$$

$$\text{L} = 2 * \text{L1}$$

- Modelo referido a P1.

$$\text{p1}(0) = 0$$

$$\text{p1}(1) = 0$$

- Determinación de R3(), R6() y R9() en la configuración no deformada.

$$\text{R3d}(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{Xpotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo} + \text{Ipot} * \text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo}))$$

$$\text{Sin}(\text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo}))$$

$$\text{R3d}(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{Ypotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo} - \text{Ipot} * \text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo}))$$

$$\text{Cos}(\text{alfapotd}(\text{tiempo}) * \text{tiempo}))$$

$$R6d(0, tiempo) = \text{Int}(R3d(0, tiempo) - L36 * \text{alfapotd}(tiempo) * \text{Sin}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo - Bpl))$$

$$R6d(1, tiempo) = \text{Int}(R3d(1, tiempo) + L36 * \text{alfapotd}(tiempo) * \text{Cos}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo - Bpl))$$

$$\text{Cos}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo - Bpl))$$

$$R9d(0, tiempo) = \text{Int}(R3d(0, tiempo) - L36 * \text{alfapotd}(tiempo) * \text{Sin}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo + Bpl))$$

$$R9d(1, tiempo) = \text{Int}(R3d(1, tiempo) + L36 * \text{alfapotd}(tiempo) * \text{Cos}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo + Bpl))$$

$$\text{Cos}(\text{alfapotd}(tiempo) * tiempo + Bpl))$$

- Se hace un llamado a la función de la cinemática inversa del modelo de velocidad para cadena CC1.

cadenacc1vel

- Se hace un llamado a la función de la cinemática inversa del modelo de velocidad para cadena CC2.

cadenacc2vel

- Se hace un llamado a la función de la cinemática inversa del modelo de velocidad para cadena CC3.

cadenacc3vel

End Sub

- Función de la cinemática inversa del modelo de velocidad de cadena CC1.

Private Sub cadenacc1vel()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim LL1dt(1) As Single

Dim LL2dt(1) As Single

- Bandera de estado de solución

banderacc1 = True

If tiempo = 0 Then Exit Sub

- Determinación de los complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Pc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Pc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Pd(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Pd(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$Q(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Qc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Qc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Qd(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Qd(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$a11(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$a11(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

$$a12(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(0)$$

$$a12(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

- Determinación de los vectores L1d,L2d.

$$LL1dt(0) = \text{Int}(L1 * Pd(0, \text{tiempo}) * Pc(0) * a11(0))$$

$$LL1dt(1) = \text{Int}(L1 * Pd(1, \text{tiempo}) * Pc(1) * a11(1))$$

$$LL2dt(0) = \text{Int}(L2 * Qd(0, \text{tiempo}) * Qc(0) * a12(0))$$

$$LL2dt(1) = \text{Int}(L2 * Qd(1, \text{tiempo}) * Qc(1) * a12(1))$$

If (R3d(0, tiempo) + rango > LL1dt(0) + LL2dt(0) And R3d(1, tiempo) + rango > LL1dt(1) + LL2dt(1)) And (R3d(0, tiempo) - rango < LL1dt(0) + LL2dt(0) And R3d(1, tiempo) - rango < LL1dt(1) + LL2dt(1)) Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

tetha1d(tiempo) = angulo1 / tiempo

tetha2d(tiempo) = angulo2 / tiempo

LL1d(0, tiempo) = Int(L1 * Pd(0, tiempo) * Pc(0) * a11(0))

LL1d(1, tiempo) = Int(L1 * Pd(1, tiempo) * Pc(1) * a11(1))

LL2d(0, tiempo) = Int(L2 * Qd(0, tiempo) * Qc(0) * a12(0))

LL2d(1, tiempo) = Int(L2 * Qd(1, tiempo) * Qc(1) * a12(1))

Exit Sub

End If

Next

Next

End Sub

- Función de la cinemática inversa del modelo de velocidad de cadena CC2.

Private Sub cadenacc2vel()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim LL3dt(1) As Single

Dim LL4dt(1) As Single

If tiempo = 0 Then Exit Sub

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

R(0) = Cos(GtoR(angulo1))

R(1) = Sin(GtoR(angulo1))

Rc(0) = Cos(GtoR(angulo1))

Rc(1) = -1 * Sin(GtoR(angulo1))

Rd(0, tiempo) = (GtoR(angulo1) / tiempo) * Sin(GtoR(angulo1))

Rd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

s(0) = Cos(GtoR(angulo2))

$$s(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$\text{Sc}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$\text{Sc}(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$\text{Sd}(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$\text{Sd}(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$a13(0) = \text{ropq}(\text{R}(), \text{E1}()).x(0)$$

$$a13(1) = \text{ropq}(\text{R}(), \text{E1}()).x(1)$$

$$a14(0) = \text{ropq}(s(), \text{E1}()).x(0)$$

$$a14(1) = \text{ropq}(s(), \text{E1}()).x(1)$$

- Determinación de los vectores L1d,L2d.

$$\text{LL3dt}(0) = \text{Int}(\text{L3} * \text{Rd}(0, \text{tiempo}) * \text{Rc}(0) * a13(0))$$

$$\text{LL3dt}(1) = \text{Int}(\text{L3} * \text{Rd}(1, \text{tiempo}) * \text{Rc}(1) * a13(1))$$

$$\text{LL4dt}(0) = \text{Int}(\text{L4} * \text{Sd}(0, \text{tiempo}) * \text{Sc}(0) * a14(0))$$

$$\text{LL4dt}(1) = \text{Int}(\text{L4} * \text{Sd}(0, \text{tiempo}) * \text{Sc}(0) * a14(1))$$

If (R6d(0, tiempo) + rango > LL3dt(0) + LL4dt(0) And R6d(1, tiempo) + rango > LL3dt(1) + LL4dt(1)) And (R6d(0, tiempo) - rango < LL3dt(0) + LL4dt(0) And R6d(1, tiempo) - rango < LL3dt(1) + LL4dt(1)) Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha3d}(\text{tiempo}) = \text{angulo1} / \text{tiempo}$$

$$\text{tetha4d}(\text{tiempo}) = \text{angulo2} / \text{tiempo}$$

- Determinación de la condición de salida del ciclo.

$$\text{LL3d}(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{L3} * \text{Rd}(0, \text{tiempo}) * \text{Rc}(0) * a13(0))$$

$$\text{LL3d}(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{L3} * \text{Rd}(1, \text{tiempo}) * \text{Rc}(1) * a13(1))$$

$$\text{LL4d}(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{L4} * \text{Sd}(0, \text{tiempo}) * \text{Sc}(0) * a14(0))$$

$$\text{LL4d}(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(\text{L4} * \text{Sd}(0, \text{tiempo}) * \text{Sc}(1) * a14(1))$$

Exit Sub

End If

Next

Next

End Sub

- Función de la cinemática inversa del modelo de velocidad de cadena CC3.

Private Sub cadenacc3vel()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim LL5dt(1) As Single

Dim LL6dt(1) As Single

If tiempo = 0 Then Exit Sub

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

$$T(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$T(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Tc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Tc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Td(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Td(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$U(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$U(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Uc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Uc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Ud(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Ud(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$a15(0) = \text{ropq}(T(), E1()).x(0)$$

$$a15(1) = \text{ropq}(T(), E1()).x(1)$$

$$a16(0) = \text{ropq}(U(), E1()).x(0)$$

$$a16(1) = \text{ropq}(U(), E1()).x(1)$$

- Determinación de los vectores L5d,L6d.

$$LL5dt(0) = \text{Int}(L5 * Td(0, tiempo) * Tc(0) * a15(0))$$

$$LL5dt(1) = \text{Int}(L5 * Td(1, tiempo) * Tc(1) * a15(1))$$

$$LL6dt(0) = \text{Int}(L6 * Ud(0, tiempo) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6dt(1) = \text{Int}(L6 * Ud(0, tiempo) * Uc(1) * a16(1))$$

- Determinación de la condición de salida.

If (R9d(0, tiempo) + rango > LL5dt(0) + LL6dt(0) And R9d(1, tiempo) + rango > LL5dt(1) + LL6dt(1)) And (R9d(0, tiempo) - rango < LL5dt(0) + LL6dt(0) And R9d(1, tiempo) - rango < LL5dt(1) + LL6dt(1)) Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha5d}(\text{tiempo}) = \text{angulo1} / \text{tiempo}$$

$$\text{tetha6d}(\text{tiempo}) = \text{angulo2} / \text{tiempo}$$

$$LL5d(0, tiempo) = \text{Int}(L5 * Td(0, tiempo) * Tc(0) * a15(0))$$

$$LL5d(1, tiempo) = \text{Int}(L5 * Td(1, tiempo) * Tc(1) * a15(1))$$

$$LL6d(0, tiempo) = \text{Int}(L6 * Ud(0, tiempo) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6d(1, tiempo) = \text{Int}(L6 * Ud(0, tiempo) * Uc(1) * a16(1))$$

Exit Sub

End If

Next

Next

End Sub

El ejecutar el programa anterior da como resultado la salida gráfica que se muestra en la figura siguiente, donde se dan los valores de la velocidades x, y, theta pot y la solución al modelo permite mostrar en una tabla las velocidades angulares de cada eslabón que compone el robot.

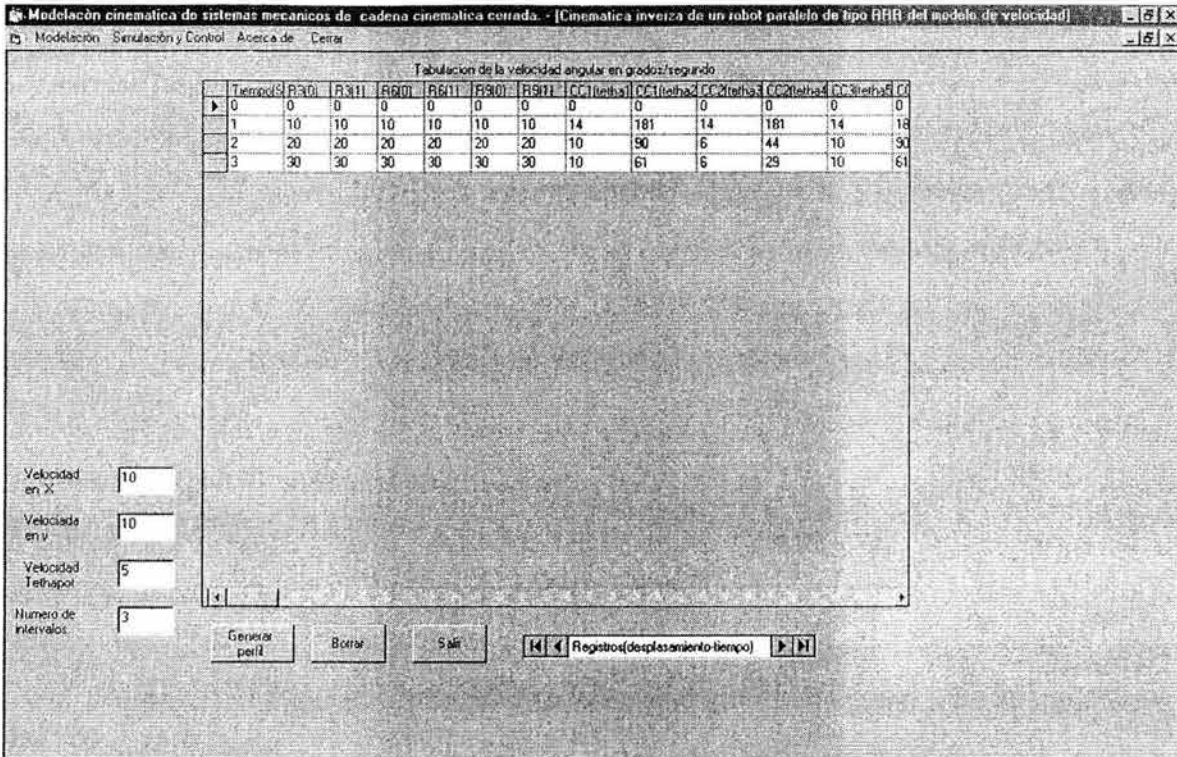


Figura 3.1 Interfase gráfica de usuario de la cinemática inversa del modelo de velocidad del robot paralelo.

3.6.2.- Programación del problema directo de velocidad

- Definición de variables complejas y con índice de intervalo.

Dim R3d(1, 0 To 100) As Single

Dim R6d(1, 0 To 100) As Single

Dim R9d(1, 0 To 100) As Single

Dim Pd(1, 0 To 100) As Single

Dim Qd(1, 0 To 100) As Single

Dim Rd(1, 0 To 100) As Single

Dim Sd(1, 0 To 100) As Single

Dim Td(1, 0 To 100) As Single

Dim Ud(1, 0 To 100) As Single

Dim Vd(1, 0 To 100) As Single

- Definición de los vectores temporales para velocidad.

Dim LL1d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL2d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL3d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL4d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL5d(1, 0 To 100) As Single

Dim LL6d(1, 0 To 100) As Single

- Definición de los velocidades angulares a encontrar.

Dim tetha1d(0 To 100) As Single

Dim tetha2d(0 To 100) As Single

Dim tetha3d(0 To 100) As Single

Dim tetha4d(0 To 100) As Single

Dim tetha5d(0 To 100) As Single

Dim tetha6d(0 To 100) As Single

Dim tethapotd(0 To 100) As Single

- Definición de la variable de tiempo.

Dim tiempo As Integer

Dim intervalofinal As Integer

- Definición de los complejos conjugados.

Dim Mc(1) As Single

Dim Nc(1) As Single

Dim Pc(1) As Single

Dim Qc(1) As Single

Dim Rc(1) As Single

Dim Sc(1) As Single

Dim Tc(1) As Single

Dim Uc(1) As Single
Dim Vc(1) As Single
Dim Wc(1) As Single
Dim xc(1) As Single

- Definición de las bases móviles rotadas.

Dim a11(1) As Single
Dim a21(1) As Single
Dim a12(1) As Single
Dim a22(1) As Single
Dim a17(1) As Single
Dim a27(1) As Single
Dim a18(1) As Single
Dim a28(1) As Single
Dim a19(1) As Single
Dim a29(1) As Single
Dim a13(1) As Single
Dim a23(1) As Single
Dim a14(1) As Single
Dim a24(1) As Single
Dim a15(1) As Single
Dim a25(1) As Single
Dim a16(1) As Single
Dim a26(1) As Single
Dim a36(1) As Single
Dim a39(1) As Single

- Banderas de estado de solución de cadenas cinemáticas.

Dim banderacc1, banderacc2, banderacc3 As Boolean
Dim incremento As Integer

- Determinación de la velocidad en base a la cinemática directa del robot.

Public Sub cinematicaDirectaVel(vangulo1 As Single, vangulo3 As Single, vangulo6 As Single, tiempo As Integer)

- Definición de ángulos temporales.

Dim vangulot1 As Single

Dim vangulot2 As Single

Dim vangulot3 As Single

Dim vangulot4 As Single

- Elementos temporales de solución.

Dim e36(1) As Single

Dim e39(1) As Single

Dim epot(1) As Single

Dim tem(1) As Single

Dim LL36t(1) As Single

Dim LL39t(1) As Single

Dim solucion(1) As Single

Dim incremento As Single

incremento = 0.9

- Margen de tolerancia.

rango = 50

- Formulación del problema dados.

tetha1d(tiempo) = vangulo1

tetha3d(tiempo) = vangulo3

$$\text{tetha6d}(\text{tiempo}) = \text{vangulo6}$$

- Base de referencia.

$$E1(0) = 1$$

$$E1(1) = 0$$

- Vectores que componen al robot.

$$Bpl = \text{GtoR}(30)$$

$$lpot = 400$$

$$L36 = lpot * 2$$

$$L39 = lpot * 2$$

$$L1 = L36$$

$$L2 = L1$$

$$L3 = L1$$

$$L4 = L1$$

$$L5 = L1$$

$$L6 = L1$$

$$L = 2 * L1$$

- Complejos X y W.

$$x(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(150))$$

$$x(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(150))$$

$$W(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(210))$$

$$W(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(210))$$

- Orientación del eslabón activo CC1 referido a P1.

$$\text{tetha1d}(\text{tiempo}) = \text{vangulo1}$$

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

$$Pc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

$$Pc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

$$Pd(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{vangulo1})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

$$Pd(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{vangulo1})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo1} * \text{tiempo}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$a11(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$a11(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

- Vector de L1.

$$L11(0) = \text{Int}(L1 * Pd(0, \text{tiempo}) * Pc(0) * a11(0))$$

$$L11(1) = \text{Int}(L1 * Pd(1, \text{tiempo}) * Pc(1) * a11(1))$$

- Tierra de cc2.

$$L14(0) = L * \text{Cos}(\text{GtoR}(60))$$

$$L14(1) = L * \text{Sin}(\text{GtoR}(60))$$

- Orientación del vector.

$$\text{tetha3d}(\text{tiempo}) = \text{vangulo3}$$

$$R(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

$$R(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

$$Rc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

$$Rc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

$$Rd(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{vangulo3})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

$$Rd(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{vangulo3})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo3} * \text{tiempo}))$$

- Bases móviles.

$$a13(0) = \text{ropq}(R(), E1()).x(0)$$

$$a13(1) = \text{ropq}(R(), E1()).x(1)$$

- Determinación de vector de L1.

$$L33(0) = \text{Int}(L3 * \text{Rd}(0, \text{tiempo}) * \text{Rc}(0) * a13(0))$$

$$L33(1) = \text{Int}(L3 * \text{Rd}(1, \text{tiempo}) * \text{Rc}(1) * a13(1))$$

- Orientación del eslabón activo de CC3.

$$\text{tetha6d}(\text{tiempo}) = \text{vangulo6}$$

$$T(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

$$T(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Tc}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Tc}(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Td}(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{vangulo6})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Td}(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{vangulo6})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulo6} * \text{tiempo}))$$

- Bases móviles.

$$a15(0) = \text{ropq}(T(), E1()).x(0)$$

$$a15(1) = \text{ropq}(T(), E1()).x(1)$$

- Vector de L1.

$$L55(0) = \text{Int}(L5 * \text{Td}(0, \text{tiempo}) * \text{Tc}(0) * a15(0))$$

$$L55(1) = \text{Int}(L5 * \text{Td}(1, \text{tiempo}) * \text{Tc}(1) * a15(1))$$

- Tierra de cc3.

$$L17(0) = -1 * L * \text{Cos}(\text{GtoR}(60))$$

$$L17(1) = L * \text{Sin}(\text{GtoR}(60))$$

- Formulación de la ecuación $I21+I32-(L54+L64+L36)=0$.

For vangulot1 = 6 To 360 Step incremento

$$Q(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulot1} * \text{tiempo}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot1} * \text{tiempo}))$$

$$Qc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulot1} * \text{tiempo}))$$

$$Qc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot1} * \text{tiempo}))$$

$$Qd(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{vangulot1})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot1} * \text{tiempo}))$$

$$Qd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(vangulot1)) * Cos(GtoR(vangulot1 * tiempo))$$

$$a12(0) = ropq(Q(), E1()).x(0)$$

$$a12(1) = ropq(Q(), E1()).x(1)$$

$$LL2t(0) = Int(L2 * Qd(0, tiempo) * Qc(0) * a12(0))$$

$$LL2t(1) = Int(L2 * Qd(1, tiempo) * Qc(1) * a12(1))$$

For vangulot2 = 6 To 360 Step incremento

$$s(0) = Cos(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$s(1) = Sin(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$Sc(0) = Cos(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$Sc(1) = -1 * Sin(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$Sd(0, tiempo) = (GtoR(vangulot2)) * Sin(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$Sd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(vangulot2)) * Cos(GtoR(vangulot2 * tiempo))$$

$$a14(0) = ropq(s(), E1()).x(0)$$

$$a14(1) = ropq(s(), E1()).x(1)$$

$$LL4t(0) = Int(L4 * Sd(0, tiempo) * Sc(0) * a14(0))$$

$$LL4t(1) = Int(L4 * Sd(1, tiempo) * Sc(1) * a14(1))$$

For vangulot3 = 6 To 360 Step incremento

$$V(0) = Cos(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$V(1) = Sin(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$Vc(0) = Cos(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$Vc(1) = -1 * Sin(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$Vd(0, tiempo) = (GtoR(vangulot3)) * Sin(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$Vd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(vangulot3)) * Cos(GtoR(vangulot3 * tiempo))$$

$$tem(0) = ropq(x(), V()).x(0)$$

$$tem(1) = ropq(x(), V()).x(1)$$

$$a36(0) = ropq(tem(), E1()).x(0)$$

$$a36(1) = ropq(tem(), E1()).x(1)$$

$$LL36t(0) = Int(L36 * Vd(0, tiempo) * Vc(0) * a36(0))$$

$$LL36t(1) = Int(L36 * Vd(1, tiempo) * Vc(1) * a36(1))$$

- Verificación de la solución de la ecuación $L11+L22-(L14+L33+L44+L36)=0$.

$$\text{solucion}(0) = L11(0) + LL2t(0) - (L33(0) + LL4t(0) + LL36t(0))$$

$$\text{solucion}(1) = L11(1) + LL2t(1) - (L33(1) + LL4t(1) + LL36t(1))$$

$$\text{If } ((\text{solucion}(0) + \text{rango} > 0) \text{ And } (\text{solucion}(1) + \text{rango} > 0) \text{ And } (\text{solucion}(0)$$

- rango < 0) And (solucion(1) - rango < 0)) Then

For vangulot4 = 0 To 360 Step 0.9

$$U(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} * \text{tiempo}))$$

$$U(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} * \text{tiempo}))$$

$$Uc(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} * \text{tiempo}))$$

$$Uc(1) = -1 * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} * \text{tiempo}))$$

$$Ud(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{vangulot4})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} * \text{tiempo}))$$

$$Ud(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{vangulot4})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{vangulot4} *$$

tiempo))

$$a16(0) = \text{ropq}(U(), E1()).x(0)$$

$$a16(1) = \text{ropq}(U(), E1()).x(1)$$

$$LL6t(0) = \text{Int}(L6 * Ud(0, \text{tiempo}) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6t(1) = \text{Int}(L6 * Ud(1, \text{tiempo}) * Uc(1) * a16(1))$$

- Vector L39 temporal.

$$\text{tem}(0) = \text{ropq}(W(), V()).x(0)$$

$$\text{tem}(1) = \text{ropq}(W(), V()).x(1)$$

$$a39(0) = \text{ropq}(\text{tem}(), E1()).x(0)$$

$$a39(1) = \text{ropq}(\text{tem}(), E1()).x(1)$$

$$LL39t(0) = \text{Int}(L39 * Vd(0, \text{tiempo}) * Vc(0) * a39(0))$$

$$LL39t(1) = \text{Int}(L39 * Vd(1, \text{tiempo}) * Vc(1) * a39(1))$$

- Verificación de la solución de la ecuación $L11+L22-(L17+L55+L66+L39)=0$.

$$\text{solucion}(0) = L11(0) + LL2t(0) - (L55(0) + LL6t(0) + LL39t(0))$$

$$\text{solucion}(1) = L11(1) + LL2t(1) - (L55(1) + LL6t(1) + LL39t(1))$$

$$\text{If } (\text{solucion}(0) + \text{rango} > 0 \text{ And } \text{solucion}(1) + \text{rango} > 0) \text{ And}$$

(solucion(0) - rango < 0 And solucion(1) - rango < 0) Then

- Determinación de los velocidades de las rotaciones de los vectores.

$$\text{tetha2d}(\text{tiempo}) = \text{vangulot1}$$

$$\text{tetha4d}(\text{tiempo}) = \text{vangulot2}$$

$$\text{tethapotd}(\text{tiempo}) = \text{vangulot3}$$

$$\text{tetha5d}(\text{tiempo}) = \text{vangulot4}$$

$$\text{LL2d}(0, \text{tiempo}) = \text{LL2t}(0)$$

$$\text{LL2d}(1, \text{tiempo}) = \text{LL2t}(1)$$

$$\text{LL4d}(0, \text{tiempo}) = \text{LL4t}(0)$$

$$\text{LL4d}(1, \text{tiempo}) = \text{LL4t}(1)$$

$$\text{LL6d}(0, \text{tiempo}) = \text{LL6t}(0)$$

$$\text{LL6d}(1, \text{tiempo}) = \text{LL6t}(1)$$

$$\text{R3d}(0, \text{tiempo}) = (\text{L11}(0) + \text{LL2d}(0, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L11}(0) + \text{LL2d}(0, \text{tiempo}))$$

$$\text{R3d}(1, \text{tiempo}) = (\text{L11}(1) + \text{LL2d}(1, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L11}(1) + \text{LL2d}(1, \text{tiempo}))$$

$$\text{R6d}(0, \text{tiempo}) = (\text{L33}(0) + \text{LL4d}(0, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L33}(0) + \text{LL4d}(0, \text{tiempo}))$$

$$\text{R6d}(1, \text{tiempo}) = (\text{L33}(1) + \text{LL4d}(1, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L33}(1) + \text{LL4d}(1, \text{tiempo}))$$

$$\text{R9d}(0, \text{tiempo}) = (\text{L55}(0) + \text{LL6d}(0, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L55}(0) + \text{LL6d}(0, \text{tiempo}))$$

$$\text{R9d}(1, \text{tiempo}) = (\text{L55}(1) + \text{LL6d}(1, \text{Abs}(\text{tiempo} - 1))) - (\text{L55}(1) + \text{LL6d}(1, \text{tiempo}))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados Q, S, U Y V.

'If ((Q(0) * Q(0) + Q(1) * Q(1) = 1) And (S(0) * S(0) + S(1) * S(1) = 1) And (U(0) * U(0) + U(1) * U(1) = 1) And (V(0) * V(0) + V(1) * V(1) = 1)) Then

Exit Sub

'End If


```

        End If
    Next
End If
Next
Next
Next
Next
MsgBox (" no se encontro soluciòn ")
End Sub

```

- Genera la tabla de los resultados del modelo de velocidad.

```

Private Sub generar_Click()
Dim i As Integer
Dim intervalofinal As Integer
Dim vx, vy, va As Integer

va1 = Int(Text3.Text)
va2 = Int(Text4.Text)
va3 = Int(Text5.Text)
intervalofinal = Int(Text1.Text)
For i = 0 To intervalofinal Step 1
    cinematicaDirectaVel va1 + 0, va2 + 0, va3 + 0, i
    adodc1.Recordset.AddNew
    adodc1.Recordset("tiempo(S)") = i
    adodc1.Recordset("R3(0)") = R3d(0, i)
    adodc1.Recordset("R3(1)") = R3d(1, i)
    adodc1.Recordset("R6(0)") = R6d(0, i)
    adodc1.Recordset("R6(1)") = R6d(1, i)
    adodc1.Recordset("R9(0)") = R9d(0, i)
    adodc1.Recordset("R9(1)") = R9d(1, i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha1)") = tetha1d(i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha2)") = tetha2d(i)

```

```

adodc1.Recordset("CC2(tetha3)") = tetha3d(i)
adodc1.Recordset("CC2(tetha4)") = tetha4d(i)
adodc1.Recordset("CC3(tetha5)") = tetha5d(i)
adodc1.Recordset("CC3(tetha6)") = tetha6d(i)
adodc1.Recordset.MoveNext

```

```
Next
```

```
End Sub
```

- Borra los resultados de la tabla.

```

Private Sub borrar_Click()
intervalofinal = Int(Text1.Text)
adodc1.Recordset.MoveLast
For i = 0 To intervalofinal Step 1
    adodc1.Recordset.MoveFirst
    adodc1.Recordset.Delete adAffectCurrent
Next
adodc1.Recordset.Update
End Sub

```

- Sale de la ventana

```

Private Sub salir_Click()
Unload Me
End Sub

```

El ejecutar el programa descrito anteriormente se obtiene como resultado la salida gráfica que se muestra en la figura siguiente. En dicha salida grafica se dan los valores de las velocidades angulares de los eslabones activos de las cadenas cinemáticas CC1, CC2 y CC3 del robot y se determinan las velocidades angulares de los puntos X_{pot} , Y_{pot} , θ_{pot} , que representan la posición del efector final $P_{ot} \in P_L$ y la solución es mostrada mediante una tabla.

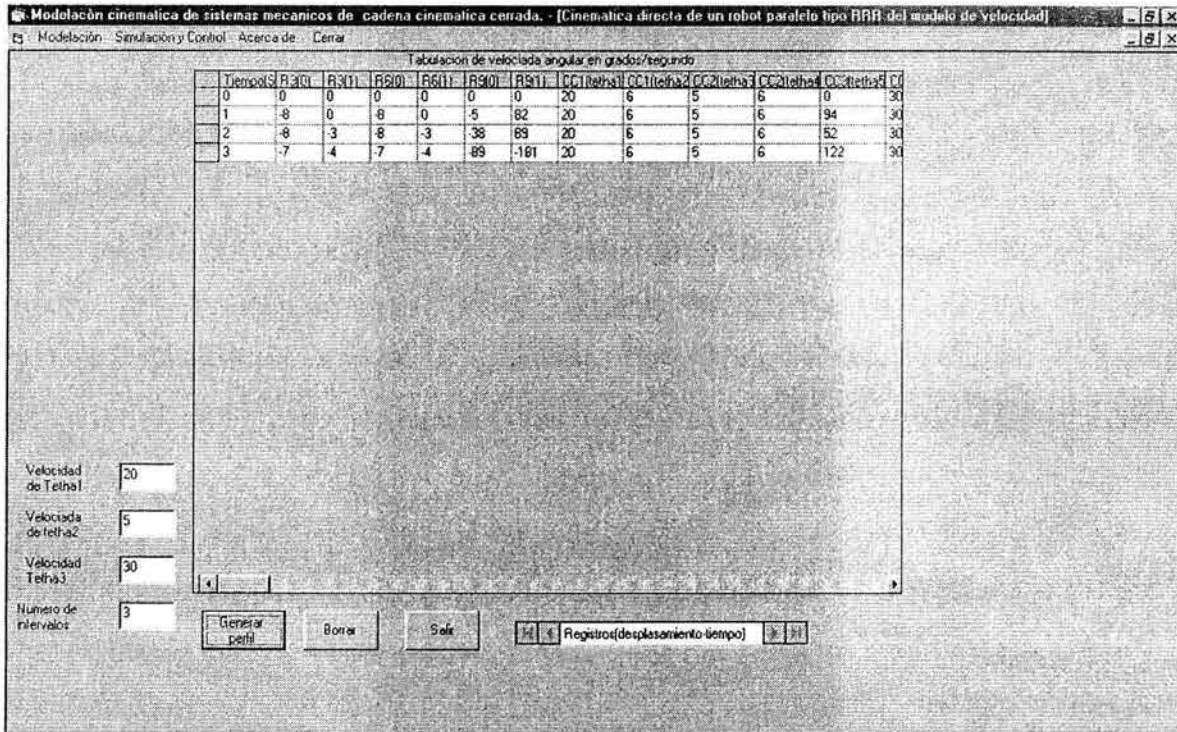


Figura 3.2 Interfase gráfica de usuario de la cinemática directa del modelo de velocidad del robot paralelo.

3.7.- Programación de los modelos de aceleración

Se presenta en esta sección la programación de los modelos de aceleración relacionados con el robot paralelo. Dicha programación es realizada con la plataforma VISUAL BASIC V6.

3.7.1.- Programación del problema inverso de aceleración

- Definición de variables complejas y con índice de intervalo.

Dim R3dd(1, 0 To 100) As Single

Dim R6dd(1, 0 To 100) As Single

Dim R9dd(1, 0 To 100) As Single

Dim Pdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Qdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Rdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Sdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Tdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Udd(1, 0 To 100) As Single

- Vectores temporales para velocidad.

Dim LL1dd(1, 0 To 100) As Single

Dim LL2dd(1, 0 To 100) As Single

Dim LL3dd(1, 0 To 100) As Single

Dim LL4dd(1, 0 To 100) As Single

Dim LL5dd(1, 0 To 100) As Single

Dim LL6dd(1, 0 To 100) As Single

- Velocidades angulares a encontrar.

Dim tetha1dd(0 To 100) As Single

Dim tetha2dd(0 To 100) As Single

Dim tetha3dd(0 To 100) As Single

Dim tetha4dd(0 To 100) As Single

Dim tetha5dd(0 To 100) As Single

Dim tetha6dd(0 To 100) As Single

- Complejos.

Dim Pc(1) As Single

Dim Qc(1) As Single

Dim Rc(1) As Single

Dim Sc(1) As Single

Dim Tc(1) As Single

Dim Uc(1) As Single

- Bases móviles.

Dim a11(1) As Single

Dim a21(1) As Single

Dim a12(1) As Single

Dim a22(1) As Single

Dim a17(1) As Single

Dim a27(1) As Single

Dim a18(1) As Single

Dim a28(1) As Single

Dim a19(1) As Single

Dim a29(1) As Single

Dim a13(1) As Single

Dim e23(1) As Single

Dim a14(1) As Single

Dim a24(1) As Single

```
Dim a15(1) As Single
Dim a25(1) As Single
Dim a16(1) As Single
Dim a26(1) As Single
```

- Variable de tiempo.

```
Dim tiempo As Integer
```

```
Dim intervalofinal As Integer
```

- Genera la tabla de los resultados del modelo de velocidad.

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim intervalofinal As Integer
```

```
Dim vx, vy, va As Integer
```

```
intervalofinal = Int(Text1.Text)
```

```
Ax = Int(Text3.Text)
```

```
Ay = Int(Text4.Text)
```

```
Aa = Int(Text5.Text)
```

```
For i = 0 To intervalofinal Step 1
```

```
    cinematicalInversaACEL Ax + 0, Ay + 0, Aa + 0, i
```

```
    adodc1.Recordset.AddNew
```

```
    adodc1.Recordset("tiempo(S)") = i
```

```
    adodc1.Recordset("R3d(0)") = R3dd(0, i)
```

```
    adodc1.Recordset("R3d(1)") = R3dd(1, i)
```

```
    adodc1.Recordset("R6d(0)") = R6dd(0, i)
```

```
    adodc1.Recordset("R6d(1)") = R6dd(1, i)
```

```
    adodc1.Recordset("R9d(0)") = R9dd(0, i)
```

```
    adodc1.Recordset("R9d(1)") = R9dd(1, i)
```

```
    adodc1.Recordset("CC1(tetha1d)") = tetha1dd(i)
```

```
    adodc1.Recordset("CC1(tetha2d)") = tetha2dd(i)
```

```
    adodc1.Recordset("CC2(tetha3d)") = tetha3dd(i)
```

```
adodc1.Recordset("CC2(tetha4d)") = tetha4dd(i)
adodc1.Recordset("CC3(tetha5d)") = tetha5dd(i)
adodc1.Recordset("CC3(tetha6d)") = tetha6dd(i)
adodc1.Recordset.MoveNext
```

Next

End Sub

- Borra los resultados de la tabla.

```
Private Sub Command2_Click()
intervalofinal = Int(Text1.Text)
adodc1.Recordset.MoveFirst
For i = 0 To intervalofinal Step 1
    adodc1.Recordset.MoveLast
    adodc1.Recordset.Delete adAffectCurrent
```

Next

```
adodc1.Recordset.Update
```

End Sub

- Sale de la ventana de modelación .

```
Private Sub salir_Click()
Unload Me
End Sub
```

- Determinación de la aceleración de la cinemática inversa del robo.t

```
Public Sub cinematicaInversaACEL(x As Single, y As Single, Aangular As Single,
seg As Integer)
```

- Ángulos de referencia bpl de PL.

```
Dim Bpl As Single
```

- Ángulos temporales

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

- Definición de variables para el modelo

Dim Xpotdd(100) As Integer

Dim Ypotdd(100) As Integer

Dim alfapotdd(100) As Integer

Dim bethapot(100) As Integer

'tiempo donde se evalua

tiempo = seg

'Tolerancia

rango = 5

- Base de referencia.

$E1(0) = 1$

$E1(1) = 0$

- Definición de alfapot.

$\text{alfapotdd}(\text{tiempo}) = \text{GtoR}(\text{Aangular})$

- Coordenada de referencia.

$\text{Rpot}(0) = x$

$\text{Rpot}(1) = y$

$\text{Xpotdd}(\text{tiempo}) = \text{Rpot}(0)$

$\text{Ypotdd}(\text{tiempo}) = \text{Rpot}(1)$

- Definición de vectores.

$\text{Bpl} = \text{GtoR}(30)$

$\text{lpot} = 400$

$\text{L36} = \text{lpot} * 2$

$\text{L39} = \text{lpot} * 2$

$$L1 = L36$$

$$L2 = L1$$

$$L3 = L1$$

$$L4 = L1$$

$$L5 = L1$$

$$L6 = L1$$

$$L = 2 * L1$$

- Modelo referido a P1.

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

- R3, R6 y R9 en la configuración no deformada.

$$R3dd(0, tiempo) = \text{Int}(Xpotdd(tiempo) * tiempo - (lpot * -1 * alfapotdd(tiempo) * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo) + lpot * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo)))$$

$$R3dd(1, tiempo) = \text{Int}(Ypotdd(tiempo) * tiempo - (lpot * alfapotdd(tiempo) * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo) + lpot * -1 * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo)))$$

$$R6dd(0, tiempo) = \text{Int}(R3dd(0, tiempo) - (L36 * -1 * alfapotdd(tiempo) * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) - Bpl) + L36 * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo - Bpl)))$$

$$R6dd(1, tiempo) = \text{Int}(R3dd(0, tiempo) + (L36 * alfapotdd(tiempo) * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo - Bpl) + L36 * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo - Bpl)))$$

$$R9dd(0, tiempo) = \text{Int}(R3dd(0, tiempo) + (L39 * -1 * alfapotdd(tiempo) * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo + Bpl) + L39 * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo - Bpl)))$$

$$R9dd(1, tiempo) = \text{Int}(R3dd(0, tiempo) + (L39 * alfapotdd(tiempo) * \text{Cos}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo + Bpl) + L39 * alfapotdd(tiempo) * tiempo * alfapotdd(tiempo) * tiempo * \text{Sin}(alfapotdd(tiempo) * tiempo * tiempo + Bpl)))$$

- Llamada a la función de la cinemática inversa del modelo de aceleración para cadena CC1.

cadenacc1ACEL

- Llamada a la función de la cinemática inversa del modelo de aceleración para cadena CC2.

cadenacc2ACEL

- Llamada a la función de la cinemática inversa del modelo de aceleración para cadena CC3.

cadenacc3ACEL

End Sub

- Función de la cinemática inversa del modelo de velocidad de cadena CC1.

Private Sub cadenacc1ACEL()

- Ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim LL1ddt(1) As Single

Dim LL2ddt(1) As Single

- Bandera de estado de solución.

banderacc1 = True

If tiempo = 0 Then Exit Sub

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

P(0) = Cos(GtoR(angulo1))

P(1) = Sin(GtoR(angulo1))

Pdd(0, tiempo) = (GtoR(angulo1) / tiempo * tiempo) * Sin(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * (GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

$$P_{dd}(1, \text{tiempo}) = (-1 * G_{toR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo} * \text{tiempo}) * \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo1})) - \\ (G_{toR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * (G_{toR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulo1})) - \\ (G_{toR}(\text{angulo1}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo1}))$$

$$P_c(0) = P(0)$$

$$P_c(1) = -1 * P(1)$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$Q(0) = \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo2}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulo2}))$$

$$Q_{dd}(0, \text{tiempo}) = (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo} * \text{tiempo}) * \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulo2})) - \\ (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo2}))$$

$$Q_{dd}(1, \text{tiempo}) = (-1 * G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo} * \text{tiempo}) * \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo2})) \\ - (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulo2})) - \\ (G_{toR}(\text{angulo2}) / \text{tiempo}) * \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulo2}))$$

$$Q_c(0) = Q(0)$$

$$Q_c(1) = -1 * Q(1)$$

- Determinación de las bases móviles.

$$a_{11}(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$a_{11}(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

$$a_{12}(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(0)$$

$$a_{12}(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

- Determinación de L1dd,L2dd.

$$LL1ddt(0) = \text{Int}(L1 * P_{dd}(0, \text{tiempo}) * P_c(0) * a_{11}(0))$$

$$LL1ddt(1) = \text{Int}(L1 * P_{dd}(1, \text{tiempo}) * P_c(1) * a_{11}(1))$$

$$LL2ddt(0) = \text{Int}(L2 * Q_{dd}(0, \text{tiempo}) * Q_c(0) * a_{12}(0))$$

$$LL2ddt(1) = \text{Int}(L2 * Q_{dd}(1, \text{tiempo}) * Q_c(1) * a_{12}(1))$$

- Determinación de la condición R3

```
If (R3dd(0, tiempo) + rango > LL1ddt(0) + LL2ddt(0) And R3dd(1, tiempo) +
rango > LL1ddt(1) + LL2ddt(1)) And (R3dd(0, tiempo) - rango < LL1ddt(0) +
LL2ddt(0) And R3dd(1, tiempo) - rango < LL1ddt(1) + LL2ddt(1)) Then
```

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

```
tetha1dd(tiempo) = angulo1 / tiempo * tiempo
```

```
tetha2dd(tiempo) = angulo2 / tiempo * tiempo
```

```
LL1dd(0, tiempo) = Int(L1 * Pdd(0, tiempo) * Pc(0) * a11(0))
```

```
LL1dd(1, tiempo) = Int(L1 * Pdd(1, tiempo) * Pc(1) * a11(1))
```

```
LL2dd(0, tiempo) = Int(L2 * Qdd(0, tiempo) * Qc(0) * a12(0))
```

```
LL2dd(1, tiempo) = Int(L2 * Qdd(0, tiempo) * Qc(1) * a12(1))
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
Next
```

```
Next
```

```
banderacc1 = False
```

```
End Sub
```

- Función de la cinemática directa del modelo de velocidad de cadena CC2.

```
Private Sub cadenacc2ACEL()
```

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

```
Dim angulo1 As Single
```

```
Dim angulo2 As Single
```

```
Dim LL3ddt(1) As Single
```

```
Dim LL4ddt(1) As Single
```

- Bandera de estado de solución.

banderacc2 = True

If tiempo = 0 Then Exit Sub

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

R(0) = Cos(GtoR(angulo1))

R(1) = Sin(GtoR(angulo1))

Rdd(0, tiempo) = (GtoR(angulo1) / tiempo * tiempo) * Sin(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * (GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

Rdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(angulo1) / tiempo * tiempo) * Cos(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * (GtoR(angulo1) / tiempo) * Sin(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

Rc(0) = R(0)

Rc(1) = -1 * R(1)

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

s(0) = Cos(GtoR(angulo2))

s(1) = Sin(GtoR(angulo2))

Sdd(0, tiempo) = (GtoR(angulo2) / tiempo * tiempo) * Sin(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * (GtoR(angulo2) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo2))

Sdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(angulo2) / tiempo * tiempo) * Cos(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * (GtoR(angulo2) / tiempo) * Sin(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo2))

Sc(0) = Q(0)

Sc(1) = -1 * Q(1)

- Bases móviles.

a13(0) = ropq(R(), E1()).x(0)

a13(1) = ropq(R(), E1()).x(1)

a14(0) = ropq(s(), E1()).x(0)

a14(1) = ropq(s(), E1()).x(1)

- determinacion de L3dd, L4dd.

$$LL3ddt(0) = \text{Int}(L3 * Rdd(0, \text{tiempo}) * Rc(0) * a13(0))$$

$$LL3ddt(1) = \text{Int}(L3 * Rdd(1, \text{tiempo}) * Rc(1) * a13(1))$$

$$LL4ddt(0) = \text{Int}(L4 * Sdd(0, \text{tiempo}) * Sc(0) * a14(0))$$

$$LL4ddt(1) = \text{Int}(L4 * Sdd(0, \text{tiempo}) * Sc(1) * a14(1))$$

- Verificación de la condición R6.

If (R6dd(0, tiempo) + rango > LL3ddt(0) + LL4ddt(0) And R6dd(1, tiempo) + rango > LL3ddt(1) + LL4ddt(1)) And (R6dd(0, tiempo) - rango < LL3ddt(0) + LL4ddt(0) And R6dd(1, tiempo) - rango < LL3ddt(1) + LL4ddt(1)) Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha3dd}(\text{tiempo}) = \text{angulo1} / \text{tiempo} * \text{tiempo}$$

$$\text{tetha4dd}(\text{tiempo}) = \text{angulo2} / \text{tiempo} * \text{tiempo}$$

$$LL3dd(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(L3 * Rdd(0, \text{tiempo}) * Rc(0) * a13(0))$$

$$LL3dd(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(L3 * Rdd(1, \text{tiempo}) * Rc(1) * a13(1))$$

$$LL4dd(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(L4 * Sdd(0, \text{tiempo}) * Sc(0) * a14(0))$$

$$LL4dd(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(L4 * Sdd(0, \text{tiempo}) * Sc(1) * a14(1))$$

Exit Sub

End If

Next

Next

banderacc1 = False

End Sub

- Función de la cinemática inversa del modelo de aceleración de cadena CC3.

Private Sub cadenacc3ACEL()

- Ángulos temporales para encontrar la solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim LL5ddt(1) As Single

Dim LL6ddt(1) As Single

- Bandera de estado de solución.

banderacc3 = True

If tiempo = 0 Then Exit Sub

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

T(0) = Cos(GtoR(angulo1))

T(1) = Sin(GtoR(angulo1))

Tdd(0, tiempo) = (GtoR(angulo1) / tiempo * tiempo) * Sin(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * (GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

Tdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(angulo1) / tiempo * tiempo) * Cos(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * (GtoR(angulo1) / tiempo) * Sin(GtoR(angulo1)) -
(GtoR(angulo1) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo1))

Tc(0) = R(0)

Tc(1) = -1 * R(1)

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

U(0) = Cos(GtoR(angulo2))

U(1) = Sin(GtoR(angulo2))

Udd(0, tiempo) = (GtoR(angulo2) / tiempo * tiempo) * Sin(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * (GtoR(angulo2) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo2))

Udd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(angulo2) / tiempo * tiempo) * Cos(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * (GtoR(angulo2) / tiempo) * Sin(GtoR(angulo2)) -
(GtoR(angulo2) / tiempo) * Cos(GtoR(angulo2))

Uc(0) = Q(0)

Uc(1) = -1 * Q(1)

- Bases móviles.

a15(0) = ropq(T(), E1()).x(0)

a15(1) = ropq(T(), E1()).x(1)

a16(0) = ropq(U(), E1()).x(0)

a16(1) = ropq(U(), E1()).x(1)

- Determinación de L5dd,L6dd.

$$LL5ddt(0) = \text{Int}(L5 * Tdd(0, \text{tiempo}) * Tc(0) * a15(0))$$

$$LL5ddt(1) = \text{Int}(L5 * Tdd(1, \text{tiempo}) * Tc(1) * a15(1))$$

$$LL6ddt(0) = \text{Int}(L6 * Udd(0, \text{tiempo}) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6ddt(1) = \text{Int}(L6 * Udd(0, \text{tiempo}) * Uc(1) * a16(1))$$

- Determinación de la condición R9.

If (R9dd(0, tiempo) + rango > LL5ddt(0) + LL6ddt(0) And R9dd(1, tiempo) +
 rango > LL5ddt(1) + LL6ddt(1)) And (R9dd(0, tiempo) - rango < LL5ddt(0) +
 LL6ddt(0) And R9dd(1, tiempo) - rango < LL5ddt(1) + LL6ddt(1)) Then

- Ángulos para las cadenas cinemáticas.

$$\text{tetha5dd}(\text{tiempo}) = \text{angulo1} / \text{tiempo} * \text{tiempo}$$

$$\text{tetha6dd}(\text{tiempo}) = \text{angulo2} / \text{tiempo} * \text{tiempo}$$

- Determinación de la condición.

$$LL5dd(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(L5 * Tdd(0, \text{tiempo}) * Tc(0) * a15(0))$$

$$LL5dd(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(L5 * Tdd(1, \text{tiempo}) * Tc(1) * a15(1))$$

$$LL6dd(0, \text{tiempo}) = \text{Int}(L6 * Udd(0, \text{tiempo}) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6dd(1, \text{tiempo}) = \text{Int}(L6 * Udd(0, \text{tiempo}) * Uc(1) * a16(1))$$

Exit Sub

End If

Next

Next

banderacc3 = False

End Sub

El ejecutar el programa anterior da como resultado la salida gráfica que se muestra en la figura siguiente, donde se dan los valores de la aceleración x, y, theta pot y la solución al modelo permite mostrar en una tabla las aceleraciones angulares de cada eslabón que compone el robot

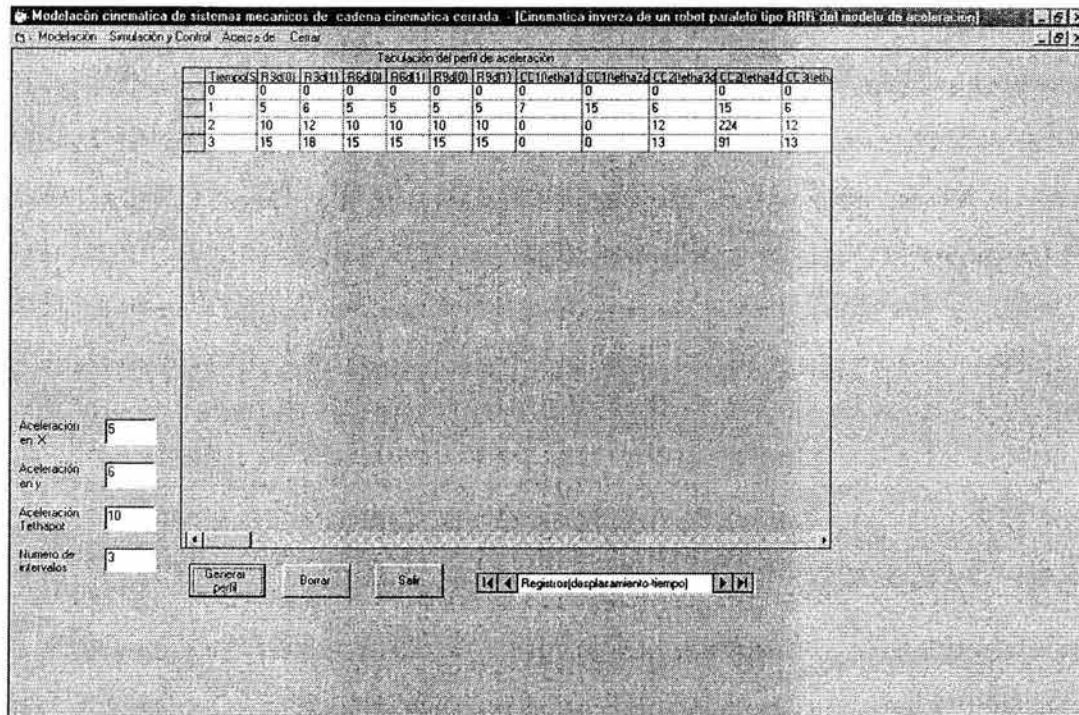


Figura 3.3 Interfase gráfica de usuario de la cinemática inversa del modelo de aceleración del robot paralelo.

3.7.2.- Programación del problema directo de aceleración

- Definición de variables complejas y con índice de intervalo.

Dim R3dd(1, 0 To 100) As Single

Dim R6dd(1, 0 To 100) As Single

Dim R9dd(1, 0 To 100) As Single

Dim Pdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Qdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Rdd(1, 0 To 100) As Single

Dim Sdd(1, 0 To 100) As Single
Dim Tdd(1, 0 To 100) As Single
Dim Udd(1, 0 To 100) As Single
Dim Vdd(1, 0 To 100) As Single
Dim Pc(1) As Single
Dim Qc(1) As Single
Dim Rc(1) As Single
Dim Sc(1) As Single
Dim Tc(1) As Single
Dim Uc(1) As Single
Dim Vc(1) As Single

- Vectores temporales para velocidad.

Dim LL1dd(1, 0 To 100) As Single
Dim LL2dd(1, 0 To 100) As Single
Dim LL3dd(1, 0 To 100) As Single
Dim LL4dd(1, 0 To 100) As Single
Dim LL5dd(1, 0 To 100) As Single
Dim LL6dd(1, 0 To 100) As Single
Dim L11dd(1) As Single
Dim L33dd(1) As Single
Dim L55dd(1) As Single
Dim LL2ddt(1) As Single
Dim LL4ddt(1) As Single
Dim LL6ddt(1) As Single
Dim LL36ddt(1) As Single
Dim LL39ddt(1) As Single

- Velocidades angulares a encontrar.

Dim tetha1dd(0 To 100) As Single
Dim tetha2dd(0 To 100) As Single

Dim tetha3dd(0 To 100) As Single
Dim tetha4dd(0 To 100) As Single
Dim tetha5dd(0 To 100) As Single
Dim tetha6dd(0 To 100) As Single
Dim tethapotdd(0 To 100) As Single

- Bases móviles.

Dim a11(1) As Single
Dim a21(1) As Single
Dim a12(1) As Single
Dim a22(1) As Single
Dim a17(1) As Single
Dim a27(1) As Single
Dim a18(1) As Single
Dim a28(1) As Single
Dim a19(1) As Single
Dim a29(1) As Single
Dim a13(1) As Single
Dim e23(1) As Single
Dim a14(1) As Single
Dim a24(1) As Single
Dim a15(1) As Single
Dim a25(1) As Single
Dim a16(1) As Single
Dim a26(1) As Single

- Variable de tiempo.

Dim tiempo As Integer
Dim intervalofinal As Integer

- Banderas de estado de solución inversa de cadenas cinemáticas.

Dim banderacc1, banderacc2, banderacc3 As Boolean

Dim incremento As Integer

- Determinación de la aceleración en base a la cinemática directa del robot.

Public Sub cinematicaDirectaACEL(Aangulo1 As Single, Aangulo3 As Single, Aangulo6 As Single, tiempo As Integer)

- Ángulos temporales.

Dim Aangulot1 As Single

Dim Aangulot2 As Single

Dim Aangulot3 As Single

Dim Aangulot4 As Single

- Definición de los elementos temporales de solución.

Dim a36(1) As Single

Dim a39(1) As Single

Dim apot(1) As Single

Dim tem(1) As Single

Dim LL36t(1) As Single

Dim LL39t(1) As Single

Dim solucion(1) As Single

Dim incremento As Single

Dim xt(1) As Single

Dim wt(1) As Single

- Dato que depende de la resolución sistema.

incremento = 0.9

- Margen de tolerancia en la solución.

rango = 50

- Formulación del problema dados.

tetha1dd(tiempo) = Aangulo1

tetha3dd(tiempo) = Aangulo3

tetha6dd(tiempo) = Aangulo6

- Base de referencia.

E1(0) = 1

E1(1) = 0

- Definición de los vectores que componen al robot.

Bpl = GtoR(30)

lpot = 400

L36 = lpot * 2

L39 = lpot * 2

L1 = L36

L2 = L1

L3 = L1

L4 = L1

L5 = L1

L6 = L1

L = 2 * L1

- Definición de los complejos X y W.

xt(0) = Cos(GtoR(150))

xt(1) = Sin(GtoR(150))

wt(0) = Cos(GtoR(210))

wt(1) = Sin(GtoR(210))

- Determinación de la orientación del eslabón activo CC1 referido a P1.

$$\text{tetha1dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulo1}$$

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Pdd}(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{Aangulo1})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo1}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulo1}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Pdd}(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{Aangulo1})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo1}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulo1}) * \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo1}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo1} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$Pc(0) = P(0)$$

$$Pc(1) = -1 * P(1)$$

- Bases móviles.

$$a11(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$a11(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

- Vector de L1.

$$L11dd(0) = \text{Int}(L1 * \text{Pdd}(0, \text{tiempo}) * Pc(0) * a11(0))$$

$$L11dd(1) = \text{Int}(L1 * \text{Pdd}(1, \text{tiempo}) * Pc(1) * a11(1))$$

- Tierra de cc2.

$$L14(0) = L * \text{Cos}(\text{GtoR}(60))$$

$$L14(1) = L * \text{Sin}(\text{GtoR}(60))$$

- Orientación del vector.

$$\text{tetha3dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulo3}$$

$$R(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$R(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Rdd}(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{Aangulo3})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo3}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulo3}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Rdd}(1, \text{tiempo}) = (-1 * \text{GtoR}(\text{Aangulo3})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo3}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulo3}) * \text{tiempo}) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo3}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$Rc(0) = R(0)$$

$$Rc(1) = -1 * R(1)$$

- Bases móviles

$$a13(0) = \text{ropq}(R(), E1()).x(0)$$

$$a13(1) = \text{ropq}(R(), E1()).x(1)$$

- Vector de L1.

$$L33dd(0) = \text{Int}(L3 * \text{Rdd}(0, \text{tiempo}) * Pc(0) * a13(0))$$

$$L33dd(1) = \text{Int}(L3 * \text{Rdd}(1, \text{tiempo}) * Pc(1) * a13(1))$$

- Determinación de la orientación del eslabón activo de CC3.

$$\text{tetha6dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulo6}$$

$$T(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo6} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$T(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo6} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\text{Tdd}(0, \text{tiempo}) = (\text{GtoR}(\text{Aangulo6})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulo6} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulo6}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulo6}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulo6} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$Tdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(Aangulo6)) * Cos(GtoR(Aangulo6 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulo6) * tiempo) * (GtoR(Aangulo6) * tiempo) * Sin(GtoR(Aangulo6 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulo6 * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulo6 * tiempo * tiempo)))$$

$$Tc(0) = T(0)$$

$$Tc(1) = -1 * T(1)$$

- Bases móviles.

$$a15(0) = ropq(T(), E1()).x(0)$$

$$a15(1) = ropq(T(), E1()).x(1)$$

- Determinación de vector de L1.

$$L55dd(0) = Int(L5 * Tdd(0, tiempo) * Tc(0) * a15(0))$$

$$L55dd(1) = Int(L5 * Tdd(1, tiempo) * Tc(1) * a15(1))$$

- Determinación de la tierra de cc3.

$$L17(0) = -1 * L * Cos(GtoR(60))$$

$$L17(1) = L * Sin(GtoR(60))$$

- Formulación de la ecuación $|I21+I32-(L54+L64+L36)=0$.

For Angulot1 = 6 To 360 Step incremento

$$Q(0) = Cos(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo))$$

$$Q(1) = Sin(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo))$$

$$Qdd(0, tiempo) = (GtoR(Aangulot1)) * Sin(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot1) * tiempo) * (GtoR(Aangulot1) * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo))$$

$$Qdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(Aangulot1)) * Cos(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot1 * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot1 * tiempo * tiempo)))$$

$$Qc(0) = T(0)$$

$$Qc(1) = -1 * T(1)$$

$$a12(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(0)$$

$$a12(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

$$LL2ddt(0) = \text{Int}(L2 * Qdd(0, \text{tiempo}) * Qc(0) * a12(0))$$

$$LL2ddt(1) = \text{Int}(L2 * Qdd(1, \text{tiempo}) * Qc(1) * a12(1))$$

- Vector L44 temporal.

For Aangulot2 = 6 To 360 Step incremento

$$s(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$s(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$\begin{aligned} \text{Sdd}(0, \text{tiempo}) &= (\text{GtoR}(\text{Aangulot2})) * \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) \\ &- (\text{GtoR}(\text{Aangulot2}) * \text{tiempo}) * (\text{GtoR}(\text{Aangulot2}) * \text{tiempo}) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \\ &\text{tiempo} * \text{tiempo})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sdd}(1, \text{tiempo}) &= (-1 * \text{GtoR}(\text{Aangulot2})) * \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \\ &\text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \text{tiempo})) - (\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo}) * \\ &\text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulot2} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))) \end{aligned}$$

$$Sc(0) = T(0)$$

$$Sc(1) = -1 * T(1)$$

$$a14(0) = \text{ropq}(s(), E1()).x(0)$$

$$a14(1) = \text{ropq}(s(), E1()).x(1)$$

$$LL4ddt(0) = \text{Int}(L4 * \text{Sdd}(0, \text{tiempo}) * Sc(0) * a14(0))$$

$$LL4ddt(1) = \text{Int}(L4 * \text{Sdd}(1, \text{tiempo}) * Sc(1) * a14(1))$$

- Vector L36 temporal.

For Aangulot3 = 6 To 360 Step incremento

$$V(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{Aangulot3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

$$V(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{Aangulot3} * \text{tiempo} * \text{tiempo}))$$

Vdd(0, tiempo) = (GtoR(Aangulot3)) * Sin(GtoR(Aangulot3 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot3) * tiempo) * (GtoR(Aangulot3) * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot3 * tiempo * tiempo))

Vdd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(Aangulot3)) * Cos(GtoR(Aangulot3 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot3 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot3 * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot3 * tiempo * tiempo)))

Vc(0) = T(0)

Vc(1) = -1 * T(1)

tem(0) = ropq(xt(), V()).x(0)

tem(1) = ropq(xt(), V()).x(1)

a36(0) = ropq(tem(), E1()).x(0)

a36(1) = ropq(tem(), E1()).x(1)

LL36ddt(0) = Int(L36 * Vdd(0, tiempo) * Vc(0) * a36(0))

LL36ddt(1) = Int(L36 * Vdd(1, tiempo) * Vc(1) * a36(1))

'Verificaciòn de la solucion de la ecuacion L11+L22-(L14+L33+L44+L36)=0

solucion(0) = L11dd(0) + LL2ddt(0) - (L33dd(0) + LL4ddt(0) + LL36ddt(0))

solucion(1) = L11dd(1) + LL2ddt(1) - (L33dd(1) + LL4ddt(1) + LL36ddt(1))

If ((solucion(0) + rango > 0) And (solucion(1) + rango > 0) And (solucion(0) - rango < 0) And (solucion(1) - rango < 0)) Then

For Aangulot4 = 0 To 360 Step 0.9

U(0) = Cos(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo))

U(1) = Sin(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo))

Udd(0, tiempo) = (GtoR(Aangulot4)) * Sin(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot4) * tiempo) * (GtoR(Aangulot4) * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo))

Udd(1, tiempo) = (-1 * GtoR(Aangulot4)) * Cos(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo)) - (GtoR(Aangulot4 * tiempo) * Cos(GtoR(Aangulot4 * tiempo * tiempo)))

Uc(0) = T(0)

Uc(1) = -1 * T(1)

a16(0) = ropq(U(), E1()).x(0)

$$a16(1) = \text{ropq}(U(), E1()).x(1)$$

$$LL6ddt(0) = \text{Int}(L6 * Udd(0, \text{tiempo}) * Uc(0) * a16(0))$$

$$LL6ddt(1) = \text{Int}(L6 * Udd(1, \text{tiempo}) * Uc(c) * a16(1))$$

- Vector L39 temporal.

$$\text{tem}(0) = \text{ropq}(wt(), V()).x(0)$$

$$\text{tem}(1) = \text{ropq}(wt(), V()).x(1)$$

$$a39(0) = \text{ropq}(\text{tem}(), E1()).x(0)$$

$$a39(1) = \text{ropq}(\text{tem}(), E1()).x(1)$$

$$LL39ddt(0) = \text{Int}(L39 * Vdd(0, \text{tiempo}) * Vc(0) * a39(0))$$

$$LL39ddt(1) = \text{Int}(L39 * Vdd(1, \text{tiempo}) * Vc(1) * a39(1))$$

- Verificación de la solución de la ecuación $L11+L22-(L17+L55+L66+L39)=0$.

$$\text{solucion}(0) = L11dd(0) + LL2ddt(0) - (L55dd(0) + LL6ddt(0) + LL39ddt(0))$$

$$\text{solucion}(1) = L11dd(1) + LL2ddt(1) - (L55dd(1) + LL6ddt(1) + LL39ddt(1))$$

If (solucion(0) + rango > 0 And solucion(1) + rango > 0) And (solucion(0) - rango < 0 And solucion(1) - rango < 0) Then

- Velocidades de las rotaciones de los vectores.

$$\text{tetha2dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulot1}$$

$$\text{tetha4dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulot2}$$

$$\text{tethapotdd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulot3}$$

$$\text{tetha5dd}(\text{tiempo}) = \text{Aangulot4}$$

- Determinación de las velocidades de las rotaciones de los vectores.

$$LL2dd(0, tiempo) = LL2ddt(0)$$

$$LL2dd(1, tiempo) = LL2ddt(1)$$

$$LL4dd(0, tiempo) = LL4ddt(0)$$

$$LL4dd(1, tiempo) = LL4ddt(1)$$

$$LL6dd(0, tiempo) = LL6ddt(0)$$

$$LL6dd(1, tiempo) = LL6ddt(1)$$

$$R3dd(0, tiempo) = (L11dd(0) + LL2dd(0, Abs(tiempo - 1))) - (L11dd(0) + LL2dd(0, tiempo))$$

$$R3dd(1, tiempo) = (L11dd(1) + LL2dd(1, Abs(tiempo - 1))) - (L11dd(1) + LL2dd(1, tiempo))$$

$$R6dd(0, tiempo) = (L33dd(0) + LL4dd(0, Abs(tiempo - 1))) - (L33dd(0) + LL4dd(0, tiempo))$$

$$R6dd(1, tiempo) = (L33dd(1) + LL4dd(1, Abs(tiempo - 1))) - (L33dd(1) + LL4dd(1, tiempo))$$

$$R9dd(0, tiempo) = (L55dd(0) + LL6dd(0, Abs(tiempo - 1))) - (L55dd(0) + LL6dd(0, tiempo))$$

$$R9dd(1, tiempo) = (L55dd(1) + LL6dd(1, Abs(tiempo - 1))) - (L55dd(1) + LL6dd(1, tiempo))$$

Exit Sub

End If

Next

End If

Next

Next

Next

MsgBox (" no se encontro solución ")

End Sub

- Genera la tabla de los resultados del modelo de velocidad.

Private Sub generar_Click()

```
Dim i As Integer
Dim intervalofinal As Integer
Dim Ax, Ay, Aa As Integer
```

```
Aa1 = Int(Text3.Text)
Aa2 = Int(Text4.Text)
Aa3 = Int(Text5.Text)
intervalofinal = Int(Text1.Text)
For i = 0 To intervalofinal Step 1
    cinematicaDirectaACEL Aa1 + 0, Aa2 + 0, Aa3 + 0, i
    adodc1.Recordset.AddNew
    adodc1.Recordset("tiempo(S)") = i
    adodc1.Recordset("R3dd(0)") = R3dd(0, i)
    adodc1.Recordset("R3dd(1)") = R3dd(1, i)
    adodc1.Recordset("R6dd(0)") = R6dd(0, i)
    adodc1.Recordset("R6dd(1)") = R6dd(1, i)
    adodc1.Recordset("R9dd(0)") = R9dd(0, i)
    adodc1.Recordset("R9dd(1)") = R9dd(1, i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha1dd)") = tetha1dd(i)
    adodc1.Recordset("CC1(tetha2dd)") = tetha2dd(i)
    adodc1.Recordset("CC2(tetha3dd)") = tetha3dd(i)
    adodc1.Recordset("CC2(tetha4dd)") = tetha4dd(i)
    adodc1.Recordset("CC3(tetha5dd)") = tetha5dd(i)
    adodc1.Recordset("CC3(tetha6dd)") = tetha6dd(i)
    adodc1.Recordset.MoveNext
Next
End Sub
```

- Borra los resultados de la tabla.

```
Private Sub borrar_Click()
intervalofinal = Int(Text1.Text)
```

```

adodc1.Recordset.MoveLast
For i = 0 To intervaloFinal Step 1
    adodc1.Recordset.MoveFirst
    adodc1.Recordset.Delete adAffectCurrent
Next
adodc1.Recordset.Update
End Sub

```

El ejecutar el programa descrito anteriormente se obtiene como resultado la salida gráfica que se muestra en la figura siguiente. En dicha salida grafica se dan los valores de las aceleraciones angulares de los eslabones activos de las cadenas cinemáticas CC1, CC2 y CC3 del robot y se determinan las aclaraciones angulares de los puntos X_{pot} , Y_{pot} , θ_{pot} , que representan la posición del efector final $P_{ot} \in P_L$ la solución es mostrada mediante una tabla y almacenada en una base de datos para aplicaciones.

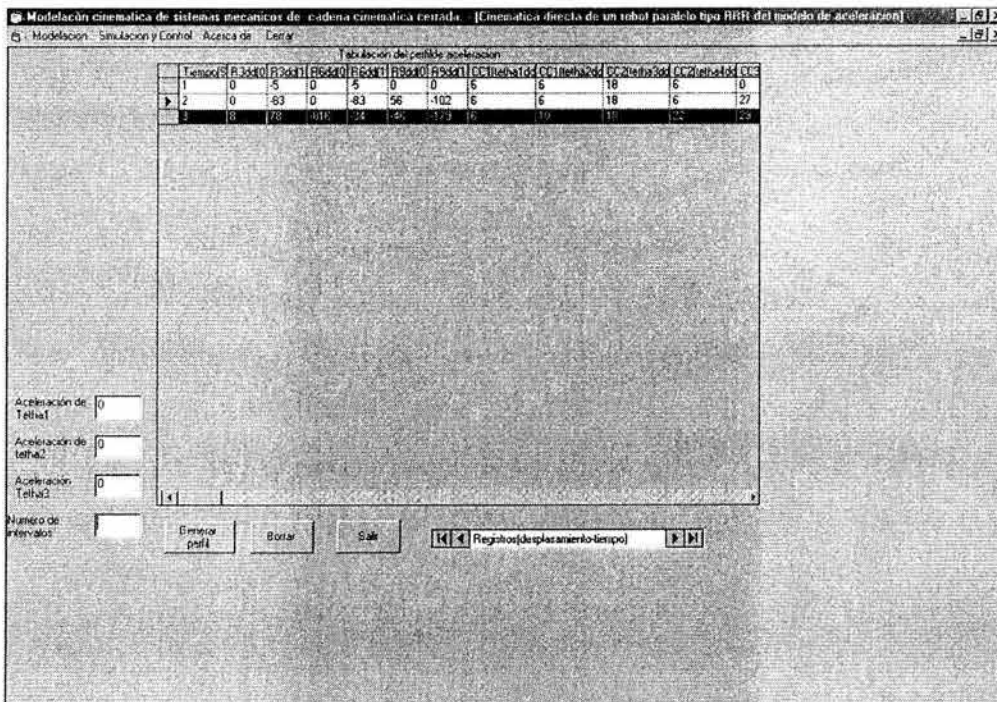


Figura 3.4 Interfase gráfica de usuario de la cinemática directa del modelo de aceleración del robot paralelo.

CAPÍTULO 4

Metodología para sintetizar un mecanismo de cuatro barras: 4 puntos de precisión para conducción de cuerpo rígido

Introducción.- En este capítulo se presenta la metodología para analizar y modelar el proceso de síntesis un mecanismo de 4 barras: conducción de cuerpo rígido, 4 puntos de precisión. Dicho mecanismo fue modelado en [3]. En este trabajo de tesis, al igual que los capítulos anteriores, se propone y aplica la metodología para modelar y programar en VISUAL BASIC V6 [1] el problema de síntesis.

4.1 Metodología

Paso 1) Definir el problema y sus restricciones [3].

Paso 2) Caracterizar el mecanismo, asociando por cada punto de precisión, una configuración. Representar el mecanismo en términos de sus eslabones, juntas y restricciones de configuración.

Paso 3) Definir vectores de posición sobre las configuraciones de los mecanismos.

Paso 4) Construir las ecuaciones de posición relativas a los posicionamiento de los mecanismos en los pivotes y con los puntos de precisión.

Paso 5) Definir sistemas locales sobre las configuraciones de los mecanismos y definir los vectores de posición en términos de dichos sistemas locales, así como las restricciones dimensionales.

Paso 6) Escribir las ecuaciones del paso 4) en términos de los sistemas locales.

Paso 7) Escribir las rotaciones de las bases locales en términos de los números complejos usando la rotación usual y en referencia al sistema inercial fijo.

Paso 8) Escribir las ecuaciones del paso 6) en términos de los complejos y la base inercial.

Paso 9) Definir las relaciones geométricas entre los complejos de norma unitaria y las rotaciones, así como las ecuaciones de norma unitaria.

Paso 10) Usar las restricciones de cuerpo rígido y control del área de trabajo para encontrar relaciones angulares.

Paso 11) Definir el problema de síntesis.

4.2 Modelación del mecanismo de cuatro barras

En esta sección se aplican los pasos de la metodología descrita en la sección anterior para modelar el problema de síntesis para conducción de cuerpo rígido, cuatro puntos de precisión [3].

Paso 1) El problema por solucionar en este capítulo y sus restricciones es:

“Una banda (B_1) transporta una caja “C” del punto “a” al punto “b” como se muestra en la figura 4.1. La caja deberá localizarse en un tiempo $t \in \mathfrak{R}^+$ en el punto “f” situado en la banda (B_2) pasando por dos puntos intermedios llamados

“d” y “e”. Se asume que el transporte de “C” de banda a banda será por medio de un mecanismo plano de cuatro barras”.

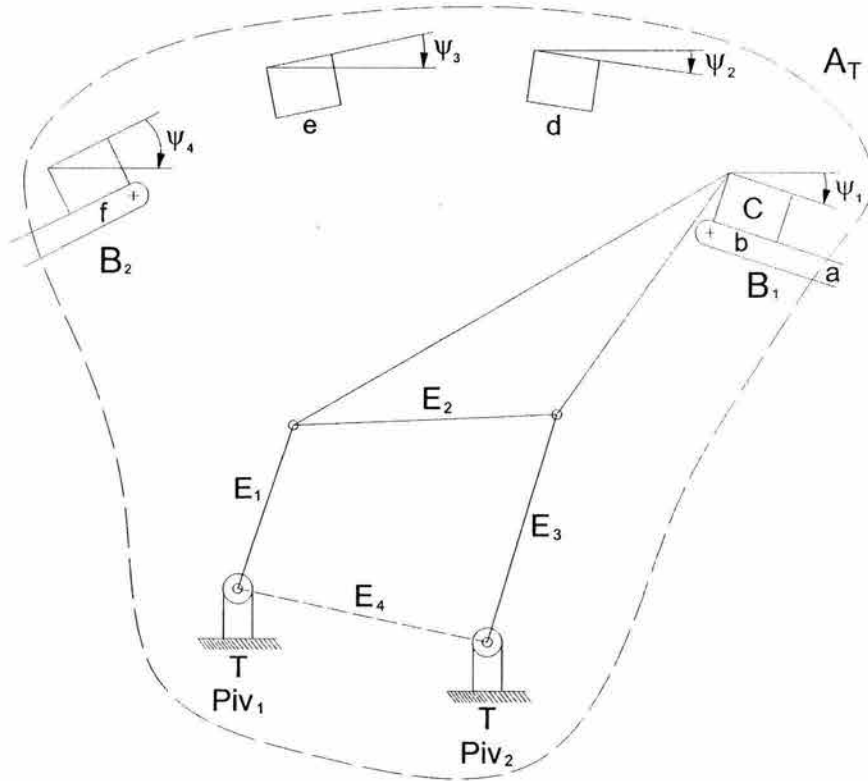


Figura 4.1. Caracterización del problema

La caja “C”, además de pasar por los puntos b, d, e y f, deberá satisfacer las orientaciones $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4 \in \mathfrak{R}$ y el área de trabajo.

Las restricciones del problema son [3]:

- 1) Las coordenadas de los pivotes Piv 1 y Piv 2 mostrados en la figura anterior son fijas y conocidas.
- 2) La caja “C” es rígida.
- 3) No se considera el movimiento de las bandas y el análisis se centra en los puntos b, d, e y f.

- 4) El mecanismo no debe salir del área de trabajo.
- 5) La configuración del eslabón acoplador es arbitraria.
- 6) Las orientaciones del eslabón acoplador deben satisfacer los desplazamientos angulares $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4 \in \mathfrak{R}$.

Paso 2) Caracterizar el mecanismo asociando por cada punto de precisión una configuración, representar el mecanismo en términos de sus eslabones, juntas y restricciones de configuración.

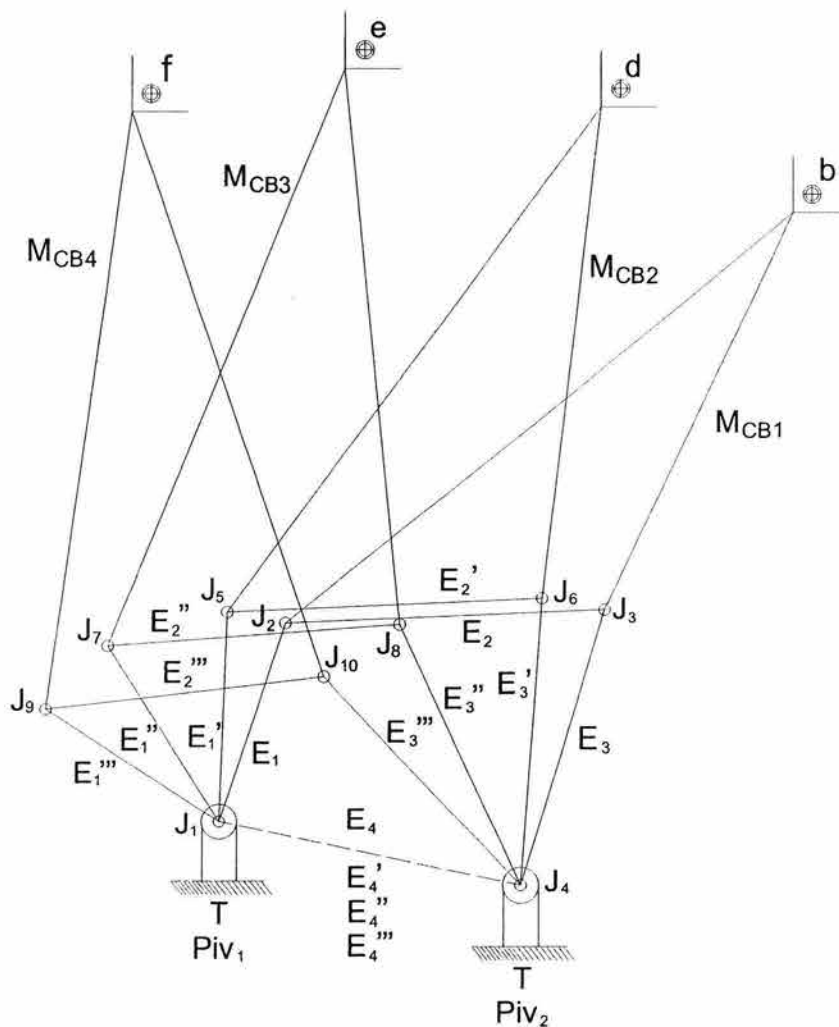


Figura 4.2. Configuraciones de mecanismos

- Configuraciones en términos de los eslabones:

$$M_{CB1} = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_4$$

$$M_{CB2} = E_1' \cup E_2' \cup E_3' \cup E_4'$$

$$M_{CB3} = E_1'' \cup E_2'' \cup E_3'' \cup E_4''$$

$$M_{CB4} = E_1''' \cup E_2''' \cup E_3''' \cup E_4'''$$

- Caracterización de juntas:

$$\begin{array}{ll}
 (M_{CB1}) & J_1 = E_1 \cap E_4 \quad , \quad J_2 = E_1 \cap E_2 \\
 & J_3 = E_2 \cap E_3 \quad , \quad J_4 = E_3 \cap E_4 \\
 (M_{CB2}) & J_1' = E_1' \cap E_4' \quad , \quad J_2' = E_1' \cap E_2' \\
 & J_3' = E_2' \cap E_3' \quad , \quad J_4' = E_3' \cap E_4' \\
 (M_{CB3}) & J_1'' = E_1'' \cap E_4'' \quad , \quad J_2'' = E_1'' \cap E_2'' \\
 & J_3'' = E_2'' \cap E_3'' \quad , \quad J_4'' = E_3'' \cap E_4'' \\
 (M_{CB4}) & J_1''' = E_1''' \cap E_4''' \quad , \quad J_2''' = E_1''' \cap E_2''' \\
 & J_3''' = E_2''' \cap E_3''' \quad , \quad J_4''' = E_3''' \cap E_4'''
 \end{array}$$

Restricciones de las configuraciones:

$$E_4 = E_4' = E_4'' = E_4'''$$

$$J_1 = J_1' = J_1'' = J_1'''$$

$$J_4 = J_4' = J_4'' = J_4'''$$

Paso 3) Los vectores de posición se definen de la manera siguiente:

$$\begin{array}{ll}
 (M_{CB1}) & \underline{L}_{2,1} = 2 - 1 \quad , \quad \underline{L}_{b,2} = b - 2 \\
 & \underline{L}_{b,3} = b - 3 \quad , \quad \underline{L}_{3,4} = 3 - 4
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 (M_{CB2}) \quad & \underline{L}_{5,1} = 5 - 1 \quad , \quad \underline{L}_{d,5} = d - 5 \\
 & \underline{L}_{d,6} = d - 6 \quad , \quad \underline{L}_{6,4} = 6 - 4 \\
 (M_{CB3}) \quad & \underline{L}_{7,1} = 7 - 1 \quad , \quad \underline{L}_{e,7} = e - 7 \\
 & \underline{L}_{e,8} = e - 8 \quad , \quad \underline{L}_{8,4} = 8 - 4 \\
 (M_{CB4}) \quad & \underline{L}_{9,1} = 9 - 1 \quad , \quad \underline{L}_{f,9} = f - 9 \\
 & \underline{L}_{f,10} = f - 10 \quad , \quad \underline{L}_{10,4} = 10 - 4
 \end{aligned}$$

Los vectores de posición que localizan los puntos “d”, “e” y “f” desde el punto “b” se definen de la manera siguiente [3]:

$$\begin{aligned}
 \underline{r}_{d,b} &= d - b \\
 \underline{r}_{e,b} &= e - b \\
 \underline{r}_{f,b} &= f - b
 \end{aligned}$$

Paso 4) Construir las ecuaciones de posición relativas a los posicionamiento de los mecanismos en los pivotes y con los puntos de precisión.

$$\begin{aligned}
 (\text{Piv 1}) \quad & \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{b,2} + \underline{r}_{d,b} = \underline{L}_{5,1} + \underline{L}_{d,5} \\
 & \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{b,2} + \underline{r}_{e,b} = \underline{L}_{7,1} + \underline{L}_{e,7} \\
 & \underline{L}_{2,1} + \underline{L}_{b,2} + \underline{r}_{f,b} = \underline{L}_{9,1} + \underline{L}_{f,9} \\
 \\
 (\text{Piv 2}) \quad & \underline{L}_{3,4} + \underline{L}_{b,3} + \underline{r}_{d,b} = \underline{L}_{6,4} + \underline{L}_{d,6} \\
 & \underline{L}_{3,4} + \underline{L}_{b,3} + \underline{r}_{e,b} = \underline{L}_{8,4} + \underline{L}_{e,8} \\
 & \underline{L}_{3,4} + \underline{L}_{b,3} + \underline{r}_{f,b} = \underline{L}_{10,4} + \underline{L}_{f,10}
 \end{aligned}$$

Paso 5) Los sistemas locales definidos sobre las configuraciones de los mecanismos se muestran en la figura siguiente:

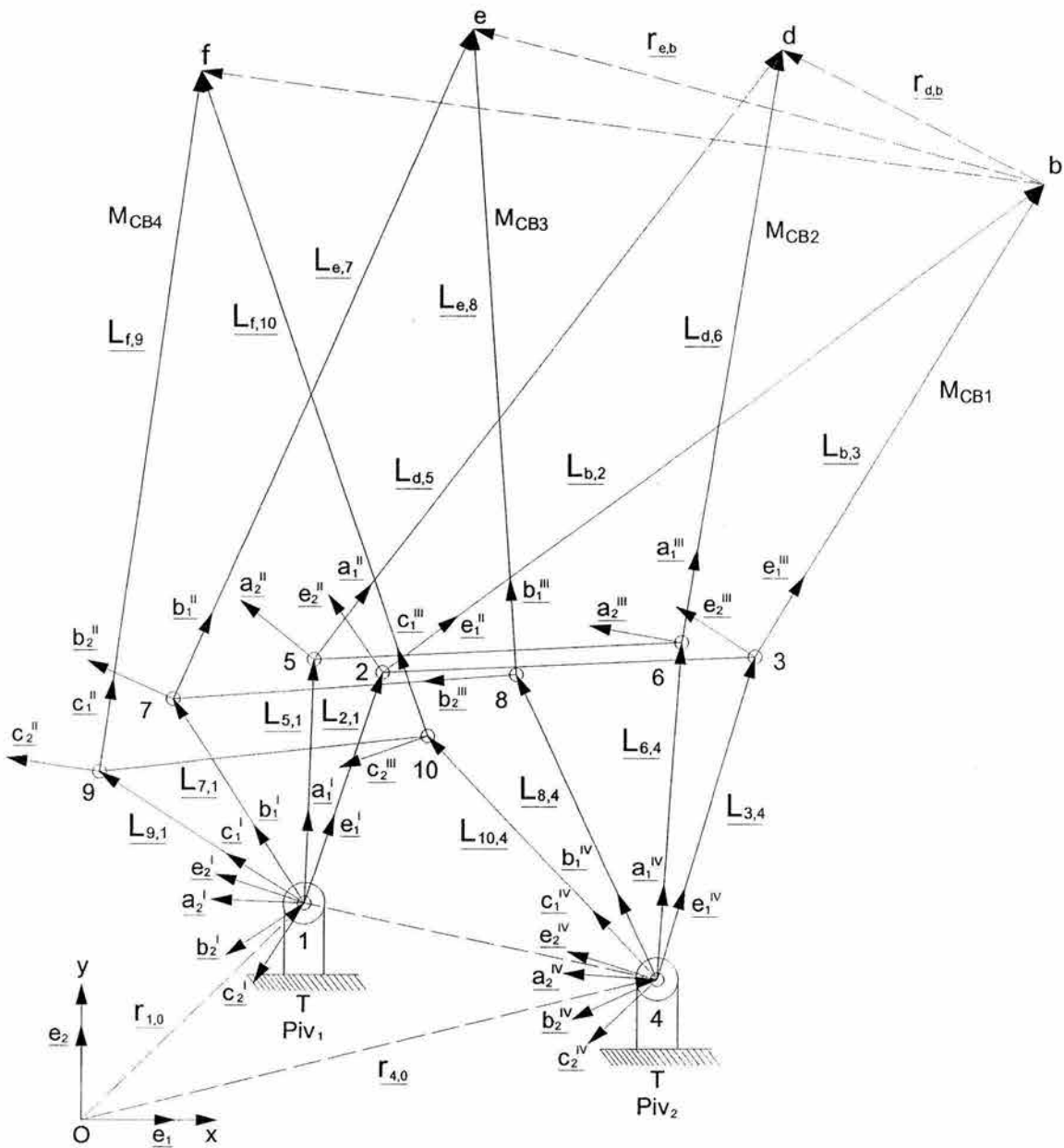


Figura 4.3. Asociación de bases locales a los mecanismos

Los vectores de posición se escriben en términos de las bases locales de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 (M_{CB1}) \quad \underline{L}_{2,1} &= l_{2,1} \cdot \underline{e}_1^I \\
 \underline{L}_{b,2} &= l_{b,2} \cdot \underline{e}_1^{II}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \underline{L}_{b,3} = l_{b,3} \cdot \underline{e}_1^{\text{III}} \\
& \underline{L}_{3,4} = l_{3,4} \cdot \underline{e}_1^{\text{IV}} \\
(\text{M}_{\text{CB2}}) \quad & \underline{L}_{5,1} = l_{5,1} \cdot \underline{a}_1^{\text{I}} \\
& \underline{L}_{d,5} = l_{d,5} \cdot \underline{a}_1^{\text{II}} \\
& \underline{L}_{d,6} = l_{d,6} \cdot \underline{a}_1^{\text{III}} \\
& \underline{L}_{6,4} = l_{6,4} \cdot \underline{a}_1^{\text{IV}} \\
(\text{M}_{\text{CB3}}) \quad & \underline{L}_{7,1} = l_{7,1} \cdot \underline{b}_1^{\text{I}} \\
& \underline{L}_{e,7} = l_{e,7} \cdot \underline{b}_1^{\text{II}} \\
& \underline{L}_{e,8} = l_{e,8} \cdot \underline{b}_1^{\text{III}} \\
& \underline{L}_{8,4} = l_{8,4} \cdot \underline{b}_1^{\text{IV}} \\
(\text{M}_{\text{CB4}}) \quad & \underline{L}_{9,1} = l_{9,1} \cdot \underline{c}_1^{\text{I}} \\
& \underline{L}_{f,9} = l_{f,9} \cdot \underline{c}_1^{\text{II}} \\
& \underline{L}_{f,10} = l_{f,10} \cdot \underline{c}_1^{\text{III}} \\
& \underline{L}_{10,4} = l_{10,4} \cdot \underline{c}_1^{\text{IV}}
\end{aligned}$$

Restricciones dimensionales:

Aquí, $l_{2,1}, l_{b,2}, l_{b,3}, l_{3,4}, l_{5,1}, l_{d,5}, l_{d,6}, l_{6,4}, l_{7,1}, l_{e,7}, l_{e,8}, l_{8,4}, l_{9,1}, l_{f,9}, l_{f,10}, l_{10,4} \in \mathbb{R}^+$ son las longitudes principales (buscadas) de los eslabones las cuales satisfacen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
l_{2,1} &= l_{5,1} = l_{7,1} = l_{9,1} \\
l_{b,2} &= l_{d,5} = l_{e,7} = l_{f,9} \\
l_{b,3} &= l_{d,6} = l_{e,8} = l_{f,10} \\
l_{3,4} &= l_{6,4} = l_{8,4} = l_{10,4}
\end{aligned}$$

Paso 6) Las ecuaciones de posición del paso 4) se escriben en términos de los sistemas locales de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
(\text{Piv 1}) \quad & l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}} + \underline{r_{d,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{a_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{a_1^{II}} \\
& l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}} + \underline{r_{e,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{b_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{b_1^{II}} \\
& l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}} + \underline{r_{f,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{c_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{c_1^{II}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\text{Piv 2}) \quad & l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}} + \underline{r_{d,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{a_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{a_1^{III}} \\
& l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}} + \underline{r_{e,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{b_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{b_1^{III}} \\
& l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}} + \underline{r_{f,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{c_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{c_1^{III}}
\end{aligned}$$

o, equivalentemente:

$$\begin{aligned}
(\text{Piv 1}) \quad & \underline{r_{d,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{a_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{a_1^{II}} - [l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}}] \\
& \underline{r_{e,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{b_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{b_1^{II}} - [l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}}] \\
& \underline{r_{f,b}} = l_{2,1} \cdot \underline{c_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{c_1^{II}} - [l_{2,1} \cdot \underline{e_1^I} + l_{b,2} \cdot \underline{e_1^{II}}]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\text{Piv 2}) \quad & \underline{r_{d,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{a_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{a_1^{III}} - [l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}}] \\
& \underline{r_{e,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{b_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{b_1^{III}} - [l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}}] \\
& \underline{r_{f,b}} = l_{3,4} \cdot \underline{c_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{c_1^{III}} - [l_{3,4} \cdot \underline{e_1^{IV}} + l_{b,3} \cdot \underline{e_1^{III}}]
\end{aligned}$$

Paso 7) Las rotaciones de las bases locales en términos de los números complejos son:

$$\begin{aligned}
(\text{M}_{CB1}) \quad & \underline{e_1^I} = \rho(\mathbf{p}, \underline{e_1}) = \mathbf{p} * \underline{e_1} \\
& \underline{e_1^{II}} = \rho(\mathbf{q}, \underline{e_1}) = \mathbf{q} * \underline{e_1} \\
& \underline{e_1^{III}} = \rho(\mathbf{r}, \underline{e_1}) = \mathbf{r} * \underline{e_1} \\
& \underline{e_1^{IV}} = \rho(\mathbf{s}, \underline{e_1}) = \mathbf{s} * \underline{e_1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\text{M}_{CB2}) \quad & \underline{a_1^I} = \rho(\mathbf{P}, \underline{e_1^I}) = \rho(\mathbf{P}, \rho(\mathbf{p}, \underline{e_1})) = \mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e_1} \\
& \underline{a_1^{II}} = \rho(\mathbf{Q}, \underline{e_1^{II}}) = \rho(\mathbf{Q}, \rho(\mathbf{q}, \underline{e_1})) = \mathbf{Q} * \mathbf{q} * \underline{e_1} \\
& \underline{a_1^{III}} = \rho(\mathbf{R}, \underline{e_1^{III}}) = \rho(\mathbf{R}, \rho(\mathbf{r}, \underline{e_1})) = \mathbf{R} * \mathbf{r} * \underline{e_1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \underline{a}_1^{IV} = \rho(\mathbf{S}, \underline{e}_1^{IV}) = \rho(\mathbf{S}, \rho(\mathbf{s}, \underline{e}_1)) = \mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1 \\
(M_{CB3}) \quad & \underline{b}_1^I = \rho(\mathbf{P}', \underline{a}_1^I) = \rho(\mathbf{P}', \rho(\mathbf{P}, \underline{e}_1^I)) = \rho(\mathbf{P}', \rho(\mathbf{P}, \rho(\mathbf{p}, \underline{e}_1))) \\
& = \mathbf{P}' * \mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e}_1 \\
& \underline{b}_1^{II} = \rho(\mathbf{Q}', \underline{a}_1^{II}) = \rho(\mathbf{Q}', \rho(\mathbf{Q}, \underline{e}_1^{II})) = \rho(\mathbf{Q}', \rho(\mathbf{Q}, \rho(\mathbf{q}, \underline{e}_1))) \\
& = \mathbf{Q}' * \mathbf{Q} * \mathbf{q} * \underline{e}_1 \\
& \underline{b}_1^{III} = \rho(\mathbf{R}', \underline{a}_1^{III}) = \rho(\mathbf{R}', \rho(\mathbf{R}, \underline{e}_1^{III})) = \rho(\mathbf{R}', \rho(\mathbf{R}, \rho(\mathbf{r}, \underline{e}_1))) \\
& = \mathbf{R}' * \mathbf{R} * \mathbf{r} * \underline{e}_1 \\
& \underline{b}_1^{IV} = \rho(\mathbf{S}', \underline{a}_1^{IV}) = \rho(\mathbf{S}', \rho(\mathbf{S}, \underline{e}_1^{IV})) = \rho(\mathbf{S}', \rho(\mathbf{S}, \rho(\mathbf{s}, \underline{e}_1))) \\
& = \mathbf{S}' * \mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1 \\
(M_{CB4}) \quad & \underline{c}_1^I = \rho(\mathbf{P}'', \underline{b}_1^I) = \rho(\mathbf{P}'', \rho(\mathbf{P}', \underline{a}_1^I)) = \rho(\mathbf{P}'', \rho(\mathbf{P}', \rho(\mathbf{P}, \\
& \rho(\mathbf{p}, \underline{e}_1)))) = \mathbf{P}'' * \mathbf{P}' * \mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e}_1 \\
& \underline{c}_1^{II} = \rho(\mathbf{Q}'', \underline{b}_1^{II}) = \rho(\mathbf{Q}'', \rho(\mathbf{Q}', \underline{a}_1^{II})) = \rho(\mathbf{Q}'', \rho(\mathbf{Q}', \rho(\mathbf{Q}, \\
& \rho(\mathbf{q}, \underline{e}_1)))) = \mathbf{Q}'' * \mathbf{Q}' * \mathbf{Q} * \mathbf{q} * \underline{e}_1 \\
& \underline{c}_1^{III} = \rho(\mathbf{R}'', \underline{b}_1^{III}) = \rho(\mathbf{R}'', \rho(\mathbf{R}', \underline{a}_1^{III})) = \rho(\mathbf{R}'', \rho(\mathbf{R}', \rho(\mathbf{R}, \\
& \rho(\mathbf{r}, \underline{e}_1)))) = \mathbf{R}'' * \mathbf{R}' * \mathbf{R} * \mathbf{r} * \underline{e}_1 \\
& \underline{c}_1^{IV} = \rho(\mathbf{S}'', \underline{b}_1^{IV}) = \rho(\mathbf{S}'', \rho(\mathbf{S}', \underline{a}_1^{IV})) = \rho(\mathbf{S}'', \rho(\mathbf{S}', \rho(\mathbf{S}, \\
& \rho(\mathbf{s}, \underline{e}_1)))) = \mathbf{S}'' * \mathbf{S}' * \mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1
\end{aligned}$$

Paso 8) Las ecuaciones del paso 6) se escriben en términos de los complejos y la base inercial de la manera siguiente[3]:

$$\begin{aligned}
(Piv 1) \quad & \underline{r}_{d,b} = l_{2,1} \bullet \{\mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{Q} * \mathbf{q} * \underline{e}_1\} - [l_{2,1} \bullet \\
& \{\mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{q} * \underline{e}_1\}] \\
& \underline{r}_{e,b} = l_{2,1} \bullet \{\mathbf{P}' * \mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{Q}' * \mathbf{Q} * \mathbf{q} * \\
& \underline{e}_1\} - [l_{2,1} \bullet \{\mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{q} * \underline{e}_1\}] \\
& \underline{r}_{f,b} = l_{2,1} \bullet \{\mathbf{P}'' * \mathbf{P}' * \mathbf{P} * \mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{Q}'' * \mathbf{Q}' * \\
& \mathbf{Q} * \mathbf{q} * \underline{e}_1\} - [l_{2,1} \bullet \{\mathbf{p} * \underline{e}_1\} + l_{b,2} \bullet \{\mathbf{q} * \underline{e}_1\}]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\text{Piv } 2) \quad \underline{r}_{d,b} &= l_{3,4} \cdot \{\mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{R} * \mathbf{r} * \underline{e}_1\} - [l_{3,4} \cdot \\
&\quad \{\mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{r} * \underline{e}_1\}] \\
\underline{r}_{e,b} &= l_{3,4} \cdot \{\mathbf{S}' * \mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{R}' * \mathbf{R} * \mathbf{r} * \\
&\quad \underline{e}_1\} - [l_{3,4} \cdot \{\mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{r} * \underline{e}_1\}] \\
\underline{r}_{f,b} &= l_{3,4} \cdot \{\mathbf{S}'' * \mathbf{S}' * \mathbf{S} * \mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{R}'' * \mathbf{R}' * \\
&\quad \mathbf{R} * \mathbf{r} * \underline{e}_1\} - [l_{3,4} \cdot \{\mathbf{s} * \underline{e}_1\} + l_{b,3} \cdot \{\mathbf{r} * \underline{e}_1\}]
\end{aligned}$$

Paso 9) Las relaciones geométricas entre los complejos de norma unitaria y las rotaciones son:

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}'' &= \{\mathbf{P}''_0, \mathbf{P}''_1\}; & \mathbf{P}''_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{P}''_0 &= \text{Cos } \beta_1 \\
& & \mathbf{P}''_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{P}''_1 &= \pm \text{Sen } \beta_1 \\
\mathbf{Q}'' &= \{\mathbf{Q}''_0, \mathbf{Q}''_1\}; & \mathbf{Q}''_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{Q}''_0 &= \text{Cos } \beta_2 \\
& & \mathbf{Q}''_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{Q}''_1 &= \pm \text{Sen } \beta_2 \\
\mathbf{R}'' &= \{\mathbf{R}''_0, \mathbf{R}''_1\}; & \mathbf{R}''_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{R}''_0 &= \text{Cos } \beta_3 \\
& & \mathbf{R}''_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{R}''_1 &= \pm \text{Sen } \beta_3 \\
\mathbf{S}'' &= \{\mathbf{S}''_0, \mathbf{S}''_1\}; & \mathbf{S}''_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{S}''_0 &= \text{Cos } \beta_4 \\
& & \mathbf{S}''_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{S}''_1 &= \pm \text{Sen } \beta_4 \\
\mathbf{P}' &= \{\mathbf{P}'_0, \mathbf{P}'_1\}; & \mathbf{P}'_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{P}'_0 &= \text{Cos } \phi_1 \\
& & \mathbf{P}'_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{P}'_1 &= \pm \text{Sen } \phi_1 \\
\mathbf{Q}' &= \{\mathbf{Q}'_0, \mathbf{Q}'_1\}; & \mathbf{Q}'_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{Q}'_0 &= \text{Cos } \phi_2 \\
& & \mathbf{Q}'_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{Q}'_1 &= \pm \text{Sen } \phi_2 \\
\mathbf{R}' &= \{\mathbf{R}'_0, \mathbf{R}'_1\}; & \mathbf{R}'_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{R}'_0 &= \text{Cos } \phi_3 \\
& & \mathbf{R}'_1 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{R}'_1 &= \pm \text{Sen } \phi_3 \\
\mathbf{S}' &= \{\mathbf{S}'_0, \mathbf{S}'_1\}; & \mathbf{S}'_0 &\in \mathfrak{R}, & \mathbf{S}'_0 &= \text{Cos } \phi_4
\end{aligned}$$

	$S'_1 \in \mathfrak{R},$	$S'_1 = \pm \text{Sen } \phi_4$
$\mathbf{P} = \{P_0, P_1\};$	$P_0 \in \mathfrak{R},$	$P_0 = \text{Cos } \alpha_1$
	$P_1 \in \mathfrak{R},$	$P_1 = \pm \text{Sen } \alpha_1$
$\mathbf{Q} = \{Q_0, Q_1\};$	$Q_0 \in \mathfrak{R},$	$Q_0 = \text{Cos } \alpha_2$
	$Q_1 \in \mathfrak{R},$	$Q_1 = \pm \text{Sen } \alpha_2$
$\mathbf{R} = \{R_0, R_1\};$	$R_0 \in \mathfrak{R},$	$R_0 = \text{Cos } \alpha_3$
	$R_1 \in \mathfrak{R},$	$R_1 = \pm \text{Sen } \alpha_3$
$\mathbf{S} = \{S_0, S_1\};$	$S_0 \in \mathfrak{R},$	$S_0 = \text{Cos } \alpha_4$
	$S_1 \in \mathfrak{R},$	$S_1 = \pm \text{Sen } \alpha_4$
$\mathbf{p} = \{p_0, p_1\};$	$p_0 \in \mathfrak{R},$	$p_0 = \text{Cos } \theta_1$
	$p_1 \in \mathfrak{R},$	$p_1 = \pm \text{Sen } \theta_1$
$\mathbf{q} = \{q_0, q_1\};$	$q_0 \in \mathfrak{R},$	$q_0 = \text{Cos } \theta_2$
	$q_1 \in \mathfrak{R},$	$q_1 = \pm \text{Sen } \theta_2$
$\mathbf{r} = \{r_0, r_1\};$	$r_0 \in \mathfrak{R},$	$r_0 = \text{Cos } \theta_3$
	$r_1 \in \mathfrak{R},$	$r_1 = \pm \text{Sen } \theta_3$
$\mathbf{s} = \{s_0, s_1\};$	$s_0 \in \mathfrak{R},$	$s_0 = \text{Cos } \theta_4$
	$s_1 \in \mathfrak{R},$	$s_1 = \pm \text{Sen } \theta_4$

Por otro lado, las ecuaciones de norma unitaria son:

$$\|\mathbf{P}''\| = \|\mathbf{P}'\| = \|\mathbf{P}\| = \|\mathbf{p}\| = 1$$

$$\|\mathbf{Q}''\| = \|\mathbf{Q}'\| = \|\mathbf{Q}\| = \|\mathbf{q}\| = 1$$

$$\|\mathbf{R}''\| = \|\mathbf{R}'\| = \|\mathbf{R}\| = \|\mathbf{r}\| = 1$$

$$\|\mathbf{S}''\| = \|\mathbf{S}'\| = \|\mathbf{S}\| = \|\mathbf{s}\| = 1$$

Paso 10) Al utilizar las restricciones de cuerpo rígido y control del área de trabajo se tienen las relaciones angulares angulares siguientes [3]:

- 1) Si $\phi_2, \beta_2 \in \mathfrak{R}$ son conocidos, entonces $\mathbf{Q}', \mathbf{Q}'' \in \mathfrak{R}^2$ son conocidos.
- 2) Si $\mathbf{Q}', \mathbf{Q}'' \in \mathfrak{R}^2$ son conocidos, entonces $\mathbf{R}', \mathbf{R}'' \in \mathfrak{R}^2$ son conocidos.
- 3) $\mathbf{P}', \mathbf{P}'' \in \mathfrak{R}^2$ y $\mathbf{S}', \mathbf{S}'' \in \mathfrak{R}^2$ son complejos de control en el área de trabajo.

La figura 4.4 muestra los ángulos relacionados con el área de trabajo controlable del mecanismo.

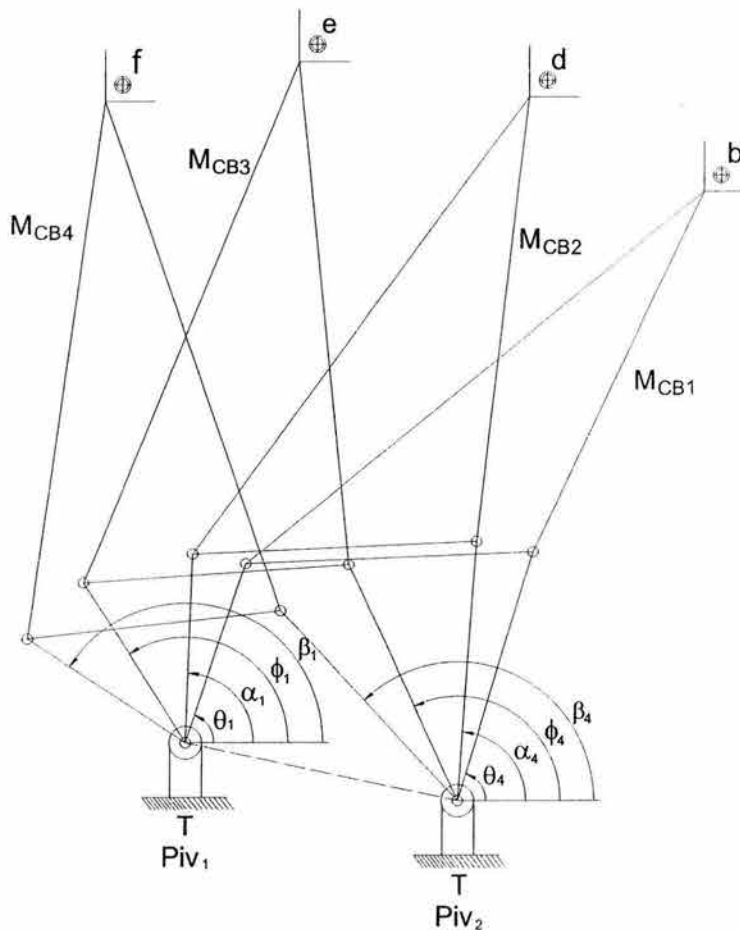


Figura 4.4. Ángulos asociados con los pivotes de los mecanismos

Paso 11) El problema de síntesis para conducción de cuerpo rígido se define de la manera siguiente [3] :

“Dados los puntos de precisión $\underline{r}_{d,b} \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{r}_{e,b} \in \mathfrak{R}^2$, $\underline{r}_{f,b} \in \mathfrak{R}^2$, $(X_{Piv\ 1}, Y_{Piv\ 1}) \in \mathcal{E} \times \mathcal{E}$, $(X_{Piv\ 2}, Y_{Piv\ 2}) \in \mathcal{E} \times \mathcal{E}$, $\mathbf{P}'' = \{P''_0, P''_1\}$, $\mathbf{Q}'' = \{Q''_0, Q''_1\}$, $\mathbf{R}'' = \{R''_0, R''_1\}$, $\mathbf{S}'' = \{S''_0, S''_1\}$, $\mathbf{P}' = \{P'_0, P'_1\}$, $\mathbf{Q}' = \{Q'_0, Q'_1\}$, $\mathbf{R}' = \{R'_0, R'_1\}$, $\mathbf{S}' = \{S'_0, S'_1\}$, con $\|\mathbf{P}''\| = \|\mathbf{Q}''\| = \|\mathbf{R}''\| = \|\mathbf{S}''\| = \|\mathbf{P}'\| = \|\mathbf{Q}'\| = \|\mathbf{R}'\| = \|\mathbf{S}'\| = 1$, encuentre $l_{2,1}, l_{b,2}, l_{b,3}, l_{3,4} \in \mathfrak{R}^+$, $\mathbf{P} = \{P_0, P_1\}$, $\mathbf{Q} = \{Q_0, Q_1\}$, $\mathbf{R} = \{R_0, R_1\}$, $\mathbf{S} = \{S_0, S_1\}$, $\mathbf{p} = \{p_0, p_1\}$, $\mathbf{q} = \{q_0, q_1\}$, $\mathbf{r} = \{r_0, r_1\}$, $\mathbf{s} = \{s_0, s_1\}$ tal que las expresiones (4.12) sean satisfechas y

$$\begin{aligned} P_0^2 + P_1^2 &= 1 \\ Q_0^2 + Q_1^2 &= 1 \\ R_0^2 + R_1^2 &= 1 \\ S_0^2 + S_1^2 &= 1 \\ p_0^2 + p_1^2 &= 1 \\ q_0^2 + q_1^2 &= 1 \\ r_0^2 + r_1^2 &= 1 \\ s_0^2 + s_1^2 &= 1'' \end{aligned}$$

El problema arriba escrito forma un sistema de 20 ecuaciones con 20 incógnitas del tipo polinomial no lineal.

4.3 Programación y simulación del problema de síntesis

En esta sección se programan en el paquete VISUAL BASIC V6 [1] las ecuaciones que gobiernan en problema de síntesis modelado en la sección anterior. Dando como resultado la siguiente salida gráfica mostrada en la figura 4.5.

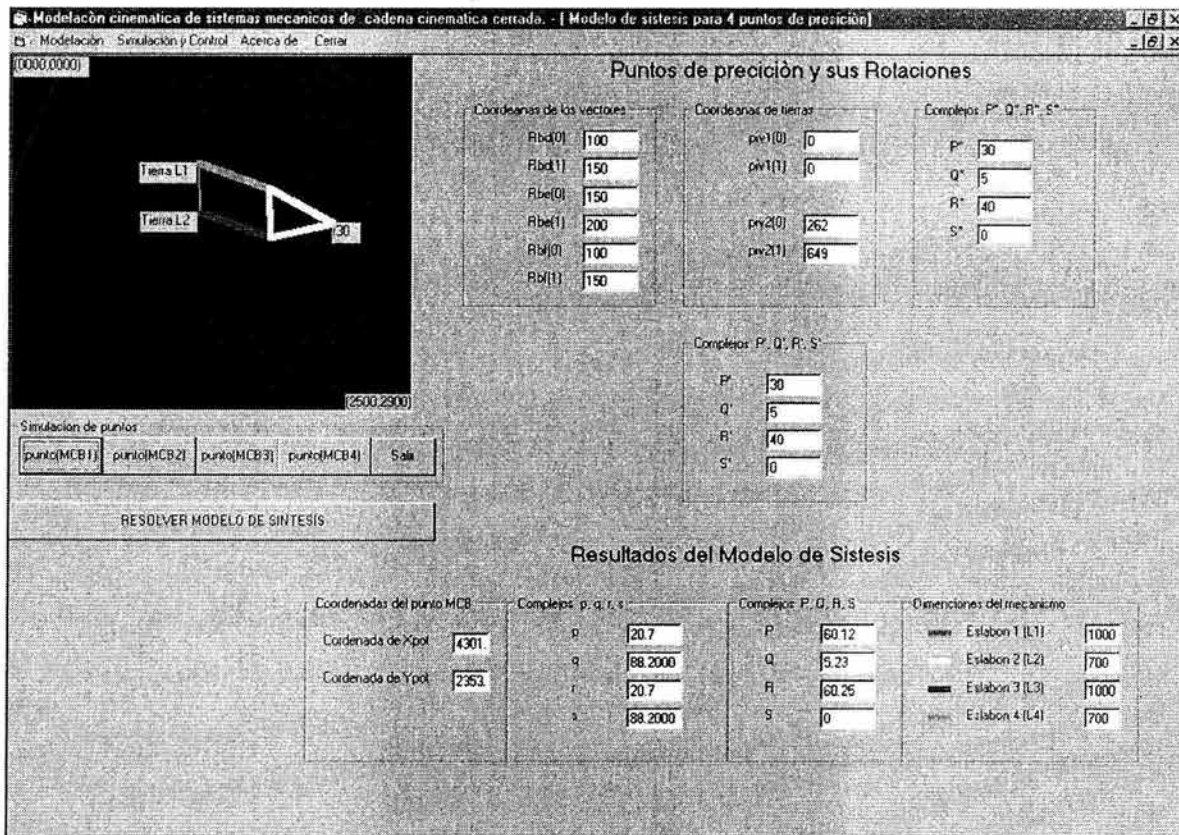


Figura 4.5 Salida gráfica de la programación del modelo de síntesis para cuatro puntos de precisión

- Banderas de estado de solución inversa de cadenas cinemáticas.

Dim bandera As Boolean

Dim rb(1) As Single

Dim Rbd(1) As Single

Dim Rbe(1) As Single

Dim Rbf(1) As Single
Dim LL1(1) As Single
Dim LL2(1) As Single
Dim LL1t(1) As Single
Dim LL2t(1) As Single
Dim LL1tt(1) As Single
Dim LL2tt(1) As Single
Dim LL1ttt(1) As Single
Dim LL2ttt(1) As Single

- Bases locales.

Dim a11(1) As Single
Dim a12(1) As Single
Dim a13(1) As Single
Dim a14(1) As Single
Dim b11(1) As Single
Dim b12(1) As Single
Dim b13(1) As Single
Dim b14(1) As Single
Dim c11(1) As Single
Dim c12(1) As Single
Dim c13(1) As Single
Dim c14(1) As Single

- Ángulos de los complejos P, Q, R, S.

Dim tetha11 As Single
Dim tetha22 As Single
Dim tetha33 As Single
Dim tetha44 As Single

Private Sub Form_Load()

- Des habilitación de los controles que muestran los puntos.

MCB1.Enabled = False

MCB2.Enabled = False

MCB3.Enabled = False

MCB4.Enabled = False

- Parámetros para la síntesis del mecanismo.
- Coordenadas de vectores de distancia para mcb1.

Text1(9).Text = 100

Text1(10).Text = 150

- Coordenadas de vectores de distancia para mcb2.

Text1(11).Text = 150

Text1(12).Text = 200

- Coordenadas de vectores de distancia para mcb3.

Text1(30).Text = 100

Text1(31).Text = 150

- Rotaciones de Complejos P", Q", R", S".
- Coordenadas del mecanismo mcb3.

Text1(26).Text = 30

Text1(27).Text = 5

Text1(28).Text = 40

Text1(29).Text = 0

- Rotaciones de Complejos P', Q', R', S'.
- Coordenadas del mecanismo mcb2.

Text1(1).Text = 30

Text1(2).Text = 5

Text1(3).Text = 40

Text1(4).Text = 0

- Rotaciones de Complejos P, Q, R, S.
- Coordenadas del mecanismo mcb1.

Text1(13).Text = ""

Text1(14).Text = ""

Text1(15).Text = ""

Text1(16).Text = ""

- Coordenadas de pivote 1 tierra.

Text1(0).Text = 0

Text1(22).Text = 0

- Coordenadas del pivote 2 tierra.

Text1(23).Text = Int(700 * Cos(GtoR(68)))

Text1(24).Text = Int(700 * Sin(GtoR(68)))

- función de inicialización del la modelación.

ProcedimientoReferencia

End Sub

- Sale de la ventana de modelación de posición

Private Sub salir_Click()

Unload Me

End Sub

Private Sub ProcedimientoReferencia()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim bandera1 As Boolean

Dim bandera2 As Boolean

- Tolerancia.

rango = 10

- Banderas de solución.

bandera1 = False

bandera2 = False

- Base de referencia.

E1(0) = 1

E1(1) = 0

- Coordenada de referencia.

Rpot(0) = 950

Rpot(1) = 1050

xpot = Rpot(0)

ypot = Rpot(1)

- Definición de los vectores que componen al robot.

L1 = 1000

L2 = 700

L3 = 1000

L4 = 700

- Modelo referido a P1.

$$p1(0) = 0$$

$$p1(1) = 0$$

$$rb(0) = \text{Int}(x_{\text{pot}})$$

$$rb(1) = \text{Int}(y_{\text{pot}})$$

- Determinación de los complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$Q(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e11(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$e11(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

$$e12(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(0)$$

$$e12(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L1, L2.

$$LL1t(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$LL1t(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

$$LL2t(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$LL2t(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Determinación de la condición $Rb = I1 + I2$.

$$\text{If } (rb(0) + \text{rango} > LL1t(0) + LL2t(0) \text{ And } rb(1) + \text{rango} > LL1t(1) + LL2t(1))$$

$$\text{And } (rb(0) - \text{rango} < LL1t(0) + LL2t(0) \text{ And } rb(1) - \text{rango} < LL1t(1) + LL2t(1)) \text{ Then}$$

- Ángulos y vectores de las cadenas cinemáticas.

tetha1 = angulo1

tetha2 = angulo2

L11(0) = Int(L1 * e11(0))

L11(1) = Int(L1 * e11(1))

L22(0) = Int(L2 * e12(0))

L22(1) = Int(L2 * e12(1))

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $P_0 + P_1 = 1$, $Q_0 + Q_1 = 1$.

If ((P(0) * P(0) + P(1) * P(1) = 1) And (Q(0) * Q(0) + Q(1) * Q(1) = 1))

Then

bandera = True

Exit For

End If

End If

Next

If bandera = True Then Exit For

Next

- Determinación de los complejos de la cadena cinemática 2.

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9

R(0) = Cos(GtoR(angulo1))

R(1) = Sin(GtoR(angulo1))

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

s(0) = Cos(GtoR(angulo2))

s(1) = Sin(GtoR(angulo2))

- Determinación de las bases móviles.

$$e13(0) = \text{ropq}(R(), E1()).x(0)$$

$$e13(1) = \text{ropq}(R(), E1()).x(1)$$

$$e14(0) = \text{ropq}(s(), E1()).x(0)$$

$$e14(1) = \text{ropq}(s(), E1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L3,I4.

$$LL3t(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$LL3t(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

$$LL4t(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$LL4t(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Determinación de la condición $rb=l3+l4$ para verificar piv2.

$$\text{If } (rb(0) + \text{rango} > LL3t(0) + LL4t(0) \text{ And } rb(1) + \text{rango} > LL3t(1) + LL4t(1))$$

$$\text{And } (rb(0) - \text{rango} < LL3t(0) + LL4t(0) \text{ And } rb(1) - \text{rango} < LL3t(1) + LL4t(1)) \text{ Then}$$

- Ángulos y vectores para las cadenas cinemáticas 2.

$$\text{tetha3} = \text{angulo1}$$

$$\text{tetha4} = \text{angulo2}$$

$$L33(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$L33(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

$$L44(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$L44(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $R_0 + R_1 = 1$, $s_0 +$

$$S_1 = 1$$

$$\text{If } ((R(0) * R(0) + R(1) * R(1) = 1) \text{ And } (s(0) * s(0) + s(1) * s(1) = 1)) \text{ Then}$$

$$\text{bandera2} = \text{True}$$

Exit For

End If

End If

Next

If bandera2 = True Then Exit For
Next

- Asignación temporal de las rotaciones de los complejo mayúsculos
- Determinación de los vectores de acuerdo al modelo de síntesis

tetha11 = 10.12

tetha22 = 15.12

tetha33 = 5.25

tetha44 = 0

Graficamecanismo

End Sub

- Función para solucionar el modelo de síntesis.

Private Sub Sintesis4Punto()

- Definición de ángulos temporales para encontrar solución.

Dim angulo1 As Single

Dim angulo2 As Single

Dim angulo3 As Single

Dim angulo4 As Single

Dim angulop As Single

Dim anguloq As Single

Dim angulor As Single

Dim angulos As Single

Dim angulopp As Single

Dim anguloqq As Single

Dim angulorr As Single

Dim anguloss As Single

Dim anguloppp As Single

Dim anguloqqq As Single
Dim angulorrr As Single
Dim angulossss As Single

Dim Pp(1) As Single
Dim Qq(1) As Single
Dim Rr(1) As Single
Dim Ss(1) As Single
Dim Ppp(1) As Single
Dim Qqq(1) As Single
Dim Rrr(1) As Single
Dim Sss(1) As Single
Dim Pppp(1) As Single
Dim Qqqq(1) As Single
Dim Rrrr(1) As Single
Dim Ssss(1) As Single
Dim temporal(1) As Single
Dim temporal1(1) As Single
Dim Temporal2(1) As Single
Dim Distancia(1) As Single
Dim Distancia1(1) As Single
Dim Distancia2(1) As Single
Dim LL3(1) As Single
Dim L1t, L2t, I3t, I4t As Integer

- Rango de error de para encontrar la solución.
rango = 100

- Distancias de los puntos MCB.
Rbd(0) = Int(Text1(9).Text)

$Rbd(1) = \text{Int}(\text{Text1}(10).\text{Text})$

$Rbe(0) = \text{Int}(\text{Text1}(11).\text{Text})$

$Rbe(1) = \text{Int}(\text{Text1}(12).\text{Text})$

$Rbf(0) = \text{Int}(\text{Text1}(30).\text{Text})$

$Rbf(1) = \text{Int}(\text{Text1}(31).\text{Text})$

- Coordenadas de las tierras del mecanismo.

$xpiv1 = \text{Int}(\text{Text1}(0).\text{Text})$

$ypiv1 = \text{Int}(\text{Text1}(22).\text{Text})$

$xpiv2 = \text{Int}(\text{Text1}(23).\text{Text})$

$ypiv2 = \text{Int}(\text{Text1}(24).\text{Text})$

- Rotaciones de las base que componen los puntos MCB.

$anguloppp = \text{Int}(\text{Text1}(26).\text{Text})$

$anguloqqq = \text{Int}(\text{Text1}(27).\text{Text})$

$angulorrr = \text{Int}(\text{Text1}(28).\text{Text})$

$angulosss = \text{Int}(\text{Text1}(29).\text{Text})$

$angulopp = \text{Int}(\text{Text1}(1).\text{Text})$

$anguloqq = \text{Int}(\text{Text1}(2).\text{Text})$

$angulorr = \text{Int}(\text{Text1}(3).\text{Text})$

$anguloss = \text{Int}(\text{Text1}(4).\text{Text})$

$angulop = \text{Int}(\text{Text1}(13).\text{Text})$

$anguloq = \text{Int}(\text{Text1}(14).\text{Text})$

$angulor = \text{Int}(\text{Text1}(15).\text{Text})$

$angulos = \text{Int}(\text{Text1}(16).\text{Text})$

- Complejos de cada punto MCB.

$Pp(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulop}))$

$Pp(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulop}))$

$Ppp(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulopp}))$

$Ppp(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulopp}))$

$$P_{ppp}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{ppp}))$$

$$P_{ppp}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{ppp}))$$

$$Q_{q}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{q}))$$

$$Q_{q}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{q}))$$

$$Q_{qq}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{qq}))$$

$$Q_{qq}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{qq}))$$

$$Q_{qqq}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{qqq}))$$

$$Q_{qqq}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{qqq}))$$

$$R_r(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_r))$$

$$R_r(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_r))$$

$$R_{rr}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{rr}))$$

$$R_{rr}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{rr}))$$

$$R_{rrr}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{rrr}))$$

$$R_{rrr}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{rrr}))$$

$$S_s(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_s))$$

$$S_s(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_s))$$

$$S_{ss}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{ss}))$$

$$S_{ss}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{ss}))$$

$$S_{sss}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{sss}))$$

$$S_{sss}(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo}_{sss}))$$

- Determinación de la solución del sistema.

For L1t = 1 To 1000 Step 100

For L2t = 1 To 1000 Step 100

- Complejos de la cadena cinemática.

For angulo1 = 0 To 360 Step 1

$$P(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$P(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 1

$$Q(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Q(1) = \text{Sin}(G\text{toR}(\text{angulo2}))$$

- Determinación de las bases móviles.
- Rotaciones en función de los complejos.

$$e_{11}(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(0)$$

$$e_{11}(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

$$e_{12}(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(0)$$

$$e_{12}(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

$$a_{11}(0) = \text{ropq}(Pp(), e_{11}()).x(0)$$

$$a_{11}(1) = \text{ropq}(Pp(), e_{11}()).x(1)$$

$$a_{12}(0) = \text{ropq}(Qq(), e_{12}()).x(0)$$

$$a_{12}(1) = \text{ropq}(Qq(), e_{12}()).x(1)$$

$$b_{11}(0) = \text{ropq}(Ppp(), a_{11}()).x(0)$$

$$b_{11}(1) = \text{ropq}(Ppp(), a_{11}()).x(1)$$

$$b_{12}(0) = \text{ropq}(Qqq(), a_{12}()).x(0)$$

$$b_{12}(1) = \text{ropq}(Qqq(), a_{12}()).x(1)$$

$$c_{11}(0) = \text{ropq}(Pppp(), b_{11}()).x(0)$$

$$c_{11}(1) = \text{ropq}(Pppp(), b_{11}()).x(1)$$

$$c_{12}(0) = \text{ropq}(Qqqq(), b_{12}()).x(0)$$

$$c_{12}(1) = \text{ropq}(Qqqq(), b_{12}()).x(1)$$

$$LL1(0) = \text{Int}(L1t * e_{11}(0))$$

$$LL1(1) = \text{Int}(L1t * e_{11}(1))$$

$$LL2(0) = \text{Int}(L2t * e_{12}(0))$$

$$LL2(1) = \text{Int}(L2t * e_{12}(1))$$

$$LL1t(0) = \text{Int}(L1t * a_{11}(0))$$

$$LL1t(1) = \text{Int}(L1t * a_{11}(1))$$

$$LL2t(0) = \text{Int}(L2t * a_{12}(0))$$

$$LL2t(1) = \text{Int}(L2t * a_{12}(1))$$

$$LL1tt(0) = \text{Int}(L1t * b_{11}(0))$$

$$LL1tt(1) = \text{Int}(L1t * b_{11}(1))$$

$$LL2tt(0) = \text{Int}(L2t * b_{12}(0))$$

$$LL2tt(1) = \text{Int}(L2t * b12(1))$$

$$LL1ttt(0) = \text{Int}(L1t * c11(0))$$

$$LL1ttt(1) = \text{Int}(L1t * c11(1))$$

$$LL2ttt(0) = \text{Int}(L2t * c12(0))$$

$$LL2ttt(1) = \text{Int}(L2t * c12(1))$$

$$\text{temporal}(0) = ((LL1t(0) + LL2t(0)) - (LL1(0) + LL2(0)))$$

$$\text{temporal}(1) = ((LL1t(1) + LL2t(1)) - (LL1(1) + LL2(1)))$$

$$\text{temporal1}(0) = ((LL1tt(0) + LL2tt(0)) - (LL1(0) + LL2(0)))$$

$$\text{temporal1}(1) = ((LL1tt(1) + LL2tt(1)) - (LL1(1) + LL2(1)))$$

$$\text{Temporal2}(0) = ((LL1ttt(0) + LL2ttt(0)) - (LL1(0) + LL2(0)))$$

$$\text{Temporal2}(1) = ((LL1ttt(1) + LL2ttt(1)) - (LL1(1) + LL2(1)))$$

- Determinación de la solución esta dentro de el rango de solución.

If Rbd(0) + rango > temporal(0) And (Rbe(0) + rango > temporal1(0))

And (Rbf(0) + rango > Temporal2(0)) Then

If Rbd(1) + rango > temporal(1) And Rbe(1) + rango > temporal1(1)

And Rbf(1) + rango > Temporal2(1) Then

If Rbd(0) - rango < temporal(0) And Rbe(0) - rango < temporal1(0) And Rbf(0) - rango < Temporal2(0) Then

If Rbd(1) - rango < temporal(1) And Rbe(1) - rango < temporal1(1) And Rbf(1) - rango < Temporal2(1) Then

- Angulos y dimensiones de los eslabones para las cadenas cinemáticas.

tetha1 = angulo1

tetha2 = angulo2

L1 = L1t

L2 = L2t

MsgBox ("solución del lazo L2+I3 encontrada")

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $P_0 + P_1 = 1$, $Q_0 + Q_1 = 1$.

If ((P(0) * P(0) + P(1) * P(1) = 1) And (Q(0) * Q(0) + Q(1) *

Q(1) = 1)) Then

- Determinación de I3 y I4 y sus rotaciones.

For I3t = 1 To 1000 Step 100

For I4t = 1 To 1000 Step 100

|

For angulo3 = 0 To 360 Step 1

R(0) = Cos(GtoR(angulo3))

R(1) = Sin(GtoR(angulo3))

For angulo4 = 0 To 360 Step 1

s(0) = Cos(GtoR(angulo4))

s(1) = Sin(GtoR(angulo4))

- Determinación de las bases móviles

$e_{13}(0) = \text{ropq}(R(), E1()).x(0)$

$e_{13}(1) = \text{ropq}(R(), E1()).x(1)$

$e_{14}(0) = \text{ropq}(s(), E1()).x(0)$

$e_{14}(1) = \text{ropq}(s(), E1()).x(1)$

$a_{13}(0) = \text{ropq}(Rr(), e_{13}()).x(0)$

$a_{13}(1) = \text{ropq}(Rr(), e_{13}()).x(1)$

$a_{14}(0) = \text{ropq}(Ss(), e_{14}()).x(0)$

$a_{14}(1) = \text{ropq}(Ss(), e_{14}()).x(1)$

$b_{13}(0) = \text{ropq}(Rrr(), a_{13}()).x(0)$

$b_{13}(1) = \text{ropq}(Rrr(), a_{13}()).x(1)$

$b_{14}(0) = \text{ropq}(Sss(), a_{14}()).x(0)$

$$\begin{aligned}
b_{14}(1) &= \text{ropq}(\text{Sss}(), a_{14}()).x(1) \\
c_{13}(0) &= \text{ropq}(\text{Rrrr}(), b_{13}()).x(0) \\
c_{13}(1) &= \text{ropq}(\text{Rrrr}(), b_{13}()).x(1) \\
c_{14}(0) &= \text{ropq}(\text{Ssss}(), b_{14}()).x(0) \\
c_{14}(1) &= \text{ropq}(\text{Ssss}(), b_{14}()).x(1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
LL3(0) &= \text{Int}(l3t * e_{13}(0)) \\
LL3(1) &= \text{Int}(l3t * e_{13}(1)) \\
LL4(0) &= \text{Int}(l4t * e_{14}(0)) \\
LL4(1) &= \text{Int}(l4t * e_{14}(1)) \\
LL3t(0) &= \text{Int}(l3t * a_{13}(0)) \\
LL3t(1) &= \text{Int}(l3t * a_{13}(1)) \\
LL4t(0) &= \text{Int}(l4t * a_{14}(0)) \\
LL4t(1) &= \text{Int}(l4t * a_{14}(1)) \\
LL3tt(0) &= \text{Int}(l3t * b_{13}(0)) \\
LL3tt(1) &= \text{Int}(l3t * b_{13}(1)) \\
LL4tt(0) &= \text{Int}(l4t * b_{14}(0)) \\
LL4tt(1) &= \text{Int}(l4t * b_{14}(1)) \\
LL3ttt(0) &= \text{Int}(l3t * c_{13}(0)) \\
LL3ttt(1) &= \text{Int}(l3t * c_{13}(1)) \\
LL4ttt(0) &= \text{Int}(l4t * c_{14}(0)) \\
LL4ttt(1) &= \text{Int}(l4t * c_{14}(1))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{temporal}(0) = ((LL3t(0) + LL4t(0)) - (LL3(0) + \\
LL4(0))) \\
& \text{temporal}(1) = ((LL3t(1) + LL4t(1)) - (LL3(1) + \\
LL4(1))) \\
& \text{temporal1}(0) = ((LL3tt(0) + LL4tt(0)) - (LL3(0) + \\
LL4(0))) \\
& \text{temporal1}(1) = ((LL3tt(1) + LL4tt(1)) - (LL3(1) + \\
LL4(1)))
\end{aligned}$$

$$\text{Temporal2}(0) = ((\text{LL3ttt}(0) + \text{LL4ttt}(0)) - (\text{LL3}(0) + \text{LL4}(0)))$$

$$\text{Temporal2}(1) = ((\text{LL3ttt}(1) + \text{LL4ttt}(1)) - (\text{LL3}(1) + \text{LL4}(1)))$$

- Determinación de la solución esta dentro de el rango de solución $\text{MCBx} = \text{L2} + \text{I4}$.

If $\text{Rbd}(0) + \text{rango} > \text{temporal}(0)$ And $(\text{Rbe}(0) + \text{rango} > \text{temporal1}(0))$ And $(\text{Rbf}(0) + \text{rango} > \text{Temporal2}(0))$ Then

If $\text{Rbd}(1) + \text{rango} > \text{temporal}(1)$ And $\text{Rbe}(1) + \text{rango} > \text{temporal1}(1)$ And $\text{Rbf}(1) + \text{rango} > \text{Temporal2}(1)$ Then

If $\text{Rbd}(0) - \text{rango} < \text{temporal}(0)$ And $\text{Rbe}(0) - \text{rango} < \text{temporal1}(0)$ And $\text{Rbf}(0) - \text{rango} < \text{Temporal2}(0)$ Then

If $\text{Rbd}(1) - \text{rango} < \text{temporal}(1)$ And $\text{Rbe}(1) - \text{rango} < \text{temporal1}(1)$ And $\text{Rbf}(1) - \text{rango} < \text{Temporal2}(1)$ Then

- Ángulos y dimensiones de los eslabones para las cadenas cinemáticas

$$\text{tetha3} = \text{angulo3}$$

$$\text{tetha4} = \text{angulo4}$$

$$\text{L3} = \text{l3t}$$

$$\text{L4} = \text{l4t}$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $\text{R0} + \text{R1} = 1$, $\text{S0} + \text{S1} = 1$.

If $((\text{R}(0) * \text{R}(0) + \text{R}(1) * \text{R}(1) = 1)$ And $(\text{s}(0) * \text{s}(0) + \text{s}(1) * \text{s}(1) = 1))$ Then

- Determinación de los complejos de la cadena cinemática.

For $\text{angulo1} = 0$ To 360 Step 0.9

$$\text{Pp}(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

$$Pp(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo1}))$$

For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9

$$Qq(0) = \text{Cos}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

$$Qq(1) = \text{Sin}(\text{GtoR}(\text{angulo2}))$$

- Determinación de las bases móviles.

$$e11(0) = \text{ropq}(P(), E1()).x(o)$$

$$e11(1) = \text{ropq}(P(), E1()).x(1)$$

$$e12(0) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(o)$$

$$e12(1) = \text{ropq}(Q(), E1()).x(1)$$

- Determinación de la posición de los vectores L1, l2.

$$LL1t(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$LL1t(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

$$LL2t(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$LL2t(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Determinación de la condición $Rb = l1 + l2$.

$$\text{If } (rb(0) + \text{rango} > LL1t(0) +$$

$$LL2t(0) \text{ And } rb(1) + \text{rango} > LL1t(1) + LL2t(1)) \text{ And } (rb(0) - \text{rango} < LL1t(0) +$$

$$LL2t(0) \text{ And } rb(1) - \text{rango} < LL1t(1) + LL2t(1)) \text{ Then}$$

- Ángulos y vectores para la cadenas cinemática 2.

$$\text{tetha11} = \text{angulo1}$$

$$\text{tetha22} = \text{angulo2}$$

$$L11(0) = \text{Int}(L1 * e11(0))$$

$$L11(1) = \text{Int}(L1 * e11(1))$$

$$L22(0) = \text{Int}(L2 * e12(0))$$

$$L22(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $P_0 + P_1 = 1$, $Q_0 + Q_1 = 1$.

```

If ((Pp(0) * Pp(0) + Pp(1) *
Pp(1) = 1) And (Qq(0) * Qq(0) + Qq(1) * Qq(1) = 1)) Then
    bandera = True
Exit For
End If
End If
Next
If bandera = True Then Exit For
Next

```

- Determinación de los complejos de la cadena cinemática 2.

```

For angulo1 = 0 To 360 Step 0.9
    Rr(0) = Cos(GtoR(angulo1))
    Rr(1) = Sin(GtoR(angulo1))
For angulo2 = 0 To 360 Step 0.9
    Ss(0) = Cos(GtoR(angulo2))
    Ss(1) = Sin(GtoR(angulo2))

```

- Determinación de las bases móviles.

```

e13(0) = ropq(R(), E1()).x(0)
e13(1) = ropq(R(), E1()).x(1)
e14(0) = ropq(s(), E1()).x(0)
e14(1) = ropq(s(), E1()).x(1)

```

- Determinación de la posición de los vectores L3, L4

```

LL3t(0) = Int(L3 * e13(0))
LL3t(1) = Int(L3 * e13(1))
LL4t(0) = Int(L4 * e14(0))
LL4t(1) = Int(L4 * e14(1))

```

- Determinación de la condición $rb=l3+l4$ para verificar piv2.

```

If (rb(0) + rango > LL3t(0) +
LL4t(0) And rb(1) + rango > LL3t(1) + LL4t(1)) And (rb(0) - rango < LL3t(0) +
LL4t(0) And rb(1) - rango < LL3t(1) + LL4t(1)) Then

```

- Ángulos y vectores para las cadenas cinemáticas 2.

```

tetha33 = angulo1
tetha44 = angulo2
L33(0) = Int(L3 * e13(0))
L33(1) = Int(L3 * e13(1))
L44(0) = Int(L4 * e14(0))
L44(1) = Int(L4 * e14(1))

```

- Se verifica que cumpla con condición de los cuadrados $R_0 + R_1 = 1$, $S_0 + S_1 = 1$.

```

If ((Rr(0) * Rr(0) + Rr(1) *
Rr(1) = 1) And (Ss(0) * Ss(0) + Ss(1) * Ss(1) = 1)) Then
bandera = True
Exit For
End If
End If
Next
If bandera = True Then Exit For
Next

```

- Sale de la rutinita de síntesis de 4 puntos.

```

MsgBox ("solución del lazo L3+l4
encontrada")

Exit Sub
End If

```



```

End If
End If
End If
End If
Next
Next
Next
Next
End If
End If
End If
End If
End If
Next
Next
Next
Next

```

- Se evaluaron todas la condiciones y ninguna fue satisfactoria.

```
MsgBox ("no se encontro solucion")
```

```
bandera = False
```

```
End Sub
```

- Procedimiento para mostrar el punto MCB1.

```
Private Sub MCB1_Click()
```

- Determinación de los vectores de acuerdo al modelo de síntesis.

```
L11(0) = Int(L1 * e11(0))
```

```
L11(1) = Int(L1 * e11(1))
```

```
L22(0) = Int(L2 * e12(0))
```

$$L22(1) = \text{Int}(L2 * e12(1))$$

$$L33(0) = \text{Int}(L3 * e13(0))$$

$$L33(1) = \text{Int}(L3 * e13(1))$$

$$L44(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$$

$$L44(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$$

- Graficación del modelo.

Graficamecanismo

End Sub

- Procedimiento para mostrar el punto MCB2.

Private Sub MCB2_Click()

Dim Pp(1) As Single

Dim Qq(1) As Single

Dim Rr(1) As Single

Dim Ss(1) As Single

Dim angulop As Single

Dim anguloq As Single

Dim angulor As Single

Dim angulos As Single

- Determinación de los vectores de acuerdo al modelo de síntesis.

angulop = Int(Text1(13).Text)

anguloq = Int(Text1(14).Text)

angulor = Int(Text1(15).Text)

angulos = Int(Text1(16).Text)

Pp(0) = Cos(GtoR(angulop))

Pp(1) = Sin(GtoR(angulop))

Qq(0) = Cos(GtoR(anguloq))

Qq(1) = Sin(GtoR(anguloq))

```

Rr(0) = Cos(GtoR(angulor))
Rr(1) = Sin(GtoR(angulor))
Ss(0) = Cos(GtoR(angulos))
Ss(1) = Sin(GtoR(angulos))
a11(0) = ropq(Pp(), e11()).x(0)
a11(1) = ropq(Pp(), e11()).x(1)
a12(0) = ropq(Qq(), e12()).x(0)
a12(1) = ropq(Qq(), e12()).x(1)
a13(0) = ropq(Rr(), e13()).x(0)
a13(1) = ropq(Rr(), e13()).x(1)
a14(0) = ropq(Ss(), e14()).x(0)
a14(1) = ropq(Ss(), e14()).x(1)
L11(0) = Int(L1 * a11(0))
L11(1) = Int(L1 * a11(1))
L22(0) = Int(L2 * a12(0))
L22(1) = Int(L2 * a12(1))
L33(0) = Int(L3 * a13(0))
L33(1) = Int(L3 * a13(1))
L44(0) = Int(L4 * e14(0))
L44(1) = Int(L4 * e14(1))

```

- Graficación del modelo.

Graficamecanismo

End Sub

- Procedimiento para mostrar el punto MCB3.

Private Sub MCB3_Click()

```

Dim Pp(1) As Single
Dim Qq(1) As Single
Dim Rr(1) As Single
Dim Ss(1) As Single

```

Dim Ppp(1) As Single
Dim Qqq(1) As Single
Dim Rrr(1) As Single
Dim Sss(1) As Single
Dim angulop As Single
Dim anguloq As Single
Dim angulor As Single
Dim angulos As Single
Dim angulopp As Single
Dim anguloqq As Single
Dim angulorr As Single
Dim anguloss As Single

- Determinación de los vectores de acuerdo al modelo de síntesis.

angulop = Int(Text1(13).Text)
anguloq = Int(Text1(14).Text)
angulor = Int(Text1(15).Text)
angulos = Int(Text1(16).Text)
angulopp = Int(Text1(1).Text)
anguloqq = Int(Text1(2).Text)
angulorr = Int(Text1(3).Text)
anguloss = Int(Text1(4).Text)
Pp(0) = Cos(GtoR(angulop))
Pp(1) = Sin(GtoR(angulop))
Qq(0) = Cos(GtoR(anguloq))
Qq(1) = Sin(GtoR(anguloq))
Rr(0) = Cos(GtoR(angulor))
Rr(1) = Sin(GtoR(angulor))
Ss(0) = Cos(GtoR(angulos))
Ss(1) = Sin(GtoR(angulos))

$P_{pp}(0) = \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulopp}))$
 $P_{pp}(1) = \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulopp}))$
 $Q_{qq}(0) = \text{Cos}(G_{toR}(\text{anguloqq}))$
 $Q_{qq}(1) = \text{Sin}(G_{toR}(\text{anguloqq}))$
 $R_{rr}(0) = \text{Cos}(G_{toR}(\text{angulorr}))$
 $R_{rr}(1) = \text{Sin}(G_{toR}(\text{angulorr}))$
 $S_{ss}(0) = \text{Cos}(G_{toR}(\text{anguloss}))$
 $S_{ss}(1) = \text{Sin}(G_{toR}(\text{anguloss}))$
 $a_{11}(0) = \text{ropq}(P_p(), e_{11}()).x(0)$
 $a_{11}(1) = \text{ropq}(P_p(), e_{11}()).x(1)$
 $a_{12}(0) = \text{ropq}(Q_q(), e_{12}()).x(0)$
 $a_{12}(1) = \text{ropq}(Q_q(), e_{12}()).x(1)$
 $a_{13}(0) = \text{ropq}(R_r(), e_{13}()).x(0)$
 $a_{13}(1) = \text{ropq}(R_r(), e_{13}()).x(1)$
 $a_{14}(0) = \text{ropq}(S_s(), e_{14}()).x(0)$
 $a_{14}(1) = \text{ropq}(S_s(), e_{14}()).x(1)$
 $b_{11}(0) = \text{ropq}(P_{pp}(), a_{11}()).x(0)$
 $b_{11}(1) = \text{ropq}(P_{pp}(), a_{11}()).x(1)$
 $b_{12}(0) = \text{ropq}(Q_{qq}(), a_{12}()).x(0)$
 $b_{12}(1) = \text{ropq}(Q_{qq}(), a_{12}()).x(1)$
 $b_{13}(0) = \text{ropq}(R_{rr}(), a_{13}()).x(0)$
 $b_{13}(1) = \text{ropq}(R_{rr}(), a_{13}()).x(1)$
 $b_{14}(0) = \text{ropq}(S_{ss}(), a_{14}()).x(0)$
 $b_{14}(1) = \text{ropq}(S_{ss}(), a_{14}()).x(1)$

$L_{11}(0) = \text{Int}(L_1 * b_{11}(0))$
 $L_{11}(1) = \text{Int}(L_1 * b_{11}(1))$
 $L_{22}(0) = \text{Int}(L_2 * b_{12}(0))$
 $L_{22}(1) = \text{Int}(L_2 * b_{12}(1))$
 $L_{33}(0) = \text{Int}(L_3 * b_{13}(0))$
 $L_{33}(1) = \text{Int}(L_3 * b_{13}(1))$

L44(0) = Int(L4 * e14(0))

L44(1) = Int(L4 * e14(1))

- Graficación del modelo.

Graficamecanismo

End Sub

- Procedimiento para mostrar el punto MCB4.

Private Sub MCB4_Click()

Dim Pp(1) As Single

Dim Qq(1) As Single

Dim Rr(1) As Single

Dim Ss(1) As Single

Dim Ppp(1) As Single

Dim Qqq(1) As Single

Dim Rrr(1) As Single

Dim Sss(1) As Single

Dim Pppp(1) As Single

Dim Qqqq(1) As Single

Dim Rrrr(1) As Single

Dim Ssss(1) As Single

Dim angulop As Single

Dim anguloq As Single

Dim angulor As Single

Dim angulos As Single

Dim angulopp As Single

Dim anguloqq As Single

Dim angulorr As Single

Dim anguloss As Single

Dim anguloppp As Single

Dim anguloqqq As Single

Dim angulorrr As Single

Dim angulosss As Single

- Determinación de los vectores de acuerdo al modelo de síntesis.

angulopp = Int(Text1(1).Text)

anguloqq = Int(Text1(2).Text)

angulorr = Int(Text1(3).Text)

anguloss = Int(Text1(4).Text)

anguloppp = Int(Text1(1).Text)

anguloqqq = Int(Text1(2).Text)

angulorrr = Int(Text1(3).Text)

angulosss = Int(Text1(4).Text)

Pp(0) = Cos(GtoR(angulop))

Pp(1) = Sin(GtoR(angulop))

Qq(0) = Cos(GtoR(anguloq))

Qq(1) = Sin(GtoR(anguloq))

Rr(0) = Cos(GtoR(angulor))

Rr(1) = Sin(GtoR(angulor))

Ss(0) = Cos(GtoR(angulos))

Ss(1) = Sin(GtoR(angulos))

Ppp(0) = Cos(GtoR(angulopp))

Ppp(1) = Sin(GtoR(angulopp))

Qqq(0) = Cos(GtoR(anguloqq))

Qqq(1) = Sin(GtoR(anguloqq))

Rrr(0) = Cos(GtoR(angulorr))

Rrr(1) = Sin(GtoR(angulorr))

Sss(0) = Cos(GtoR(anguloss))

Sss(1) = Sin(GtoR(anguloss))

$Pppp(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{angulopp}))$
 $Pppp(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{angulopp}))$
 $Qqqq(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{anguloqq}))$
 $Qqqq(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{anguloqq}))$
 $Rrrr(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{angulorr}))$
 $Rrrr(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{angulorr}))$
 $Ssss(0) = \text{Cos}(GtoR(\text{anguloss}))$
 $Ssss(1) = \text{Sin}(GtoR(\text{anguloss}))$

$a11(0) = \text{ropq}(Pp(), e11()).x(0)$
 $a11(1) = \text{ropq}(Pp(), e11()).x(1)$
 $a12(0) = \text{ropq}(Qq(), e12()).x(0)$
 $a12(1) = \text{ropq}(Qq(), e12()).x(1)$
 $a13(0) = \text{ropq}(Rr(), e13()).x(0)$
 $a13(1) = \text{ropq}(Rr(), e13()).x(1)$
 $a14(0) = \text{ropq}(Ss(), e14()).x(0)$
 $a14(1) = \text{ropq}(Ss(), e14()).x(1)$
 $b11(0) = \text{ropq}(Ppp(), a11()).x(0)$
 $b11(1) = \text{ropq}(Ppp(), a11()).x(1)$
 $b12(0) = \text{ropq}(Qqq(), a12()).x(0)$
 $b12(1) = \text{ropq}(Qqq(), a12()).x(1)$
 $b13(0) = \text{ropq}(Rrr(), a13()).x(0)$
 $b13(1) = \text{ropq}(Rrr(), a13()).x(1)$
 $b14(0) = \text{ropq}(Sss(), a14()).x(0)$
 $b14(1) = \text{ropq}(Sss(), a14()).x(1)$
 $c11(0) = \text{ropq}(Pppp(), b11()).x(0)$
 $c11(1) = \text{ropq}(Pppp(), b11()).x(1)$
 $c12(0) = \text{ropq}(Qqqq(), b12()).x(0)$
 $c12(1) = \text{ropq}(Qqqq(), b12()).x(1)$
 $c13(0) = \text{ropq}(Rrrr(), b13()).x(0)$
 $c13(1) = \text{ropq}(Rrrr(), b13()).x(1)$

$c14(0) = \text{ropq}(\text{Ssss}(), b14()).x(0)$

$c14(1) = \text{ropq}(\text{Ssss}(), b14()).x(1)$

$L11(0) = \text{Int}(L1 * c11(0))$

$L11(1) = \text{Int}(L1 * c11(1))$

$L22(0) = \text{Int}(L2 * c12(0))$

$L22(1) = \text{Int}(L2 * c12(1))$

$L33(0) = \text{Int}(L3 * c13(0))$

$L33(1) = \text{Int}(L3 * c13(1))$

$L44(0) = \text{Int}(L4 * e14(0))$

$L44(1) = \text{Int}(L4 * e14(1))$

- Graficación del modelo.

Graficamecanismo

End Sub

Private Sub Graficamecanismo()

- Variables temporales para el sistema de la pantalla.

Dim ofsetx As Single

Dim ofsety As Single

Dim RT3(1) As Single

- offset en x+2500 en y -2100, centrado referido a lazo1.

ofsetx = 2500

ofsety = 1500

- Adecuación al sistema en de pantalla.

$RT3(0) = rb(0) + \text{ofsetx}$

$RT3(1) = rb(1) + \text{ofsety}$

- Características de la figura del mecanismo.

Line1.BorderWidth = 5
Line2.BorderWidth = 5
Line3.BorderWidth = 5
Line4.BorderWidth = 1
Line27.BorderWidth = 5
Line28.BorderWidth = 5

Line1.BorderColor = vbGreen
Line2.BorderColor = vbWhite
Line3.BorderColor = vbRed
Line4.BorderColor = vbWhite
Line27.BorderColor = vbWhite
Line28.BorderColor = vbWhite

Label5(2).Left = offsetx - 800
Label5(2).Top = offsety
Label5(3).Left = offsetx + L44(0) - 800
Label5(3).Top = offsety + L44(1)

- Corrección de cuadrante y centrado.
- Graficación del vector I1.

Line1.x1 = offsetx
Line1.y1 = offsety
Line1.x2 = offsetx + L11(0)
Line1.y2 = offsety + L11(1)

- Graficación del vector I2.

Line2.x1 = Line1.x2
Line2.y1 = Line1.y2
Line2.x2 = Line2.x1 + L22(0)

Line2.y2 = Line2.y1 + L22(1)

- Graficación del vector I3.

Line3.x1 = offsetx + L44(0)

Line3.y1 = offsety + L44(1)

Line3.x2 = Line3.x1 + L33(0)

Line3.y2 = Line3.y1 + L33(1)

- Graficación del vector I4.

Line4.x1 = offsetx

Line4.y1 = offsety

Line4.x2 = Line4.x1 + L44(0)

Line4.y2 = Line4.y1 + L44(1)

- Graficación de los eslabones acopladores.

Line27.x1 = offsetx + L11(0)

Line27.y1 = offsety + L11(1)

Line27.x2 = offsetx + L11(0) + 1000 * Cos(GtoR(30))

Line27.y2 = offsety + L11(1) + 1000 * Sin(GtoR(30))

Line28.x1 = Line3.x1 + L33(0)

Line28.y1 = Line3.y1 + L33(1)

Line28.x2 = offsetx + L11(0) + 1000 * Cos(GtoR(30))

Line28.y2 = offsety + L11(1) + 1000 * Sin(GtoR(30))

- Coordenadas del punto Ro.

Label5(4).Left = Line28.x2

Label5(4).Top = Line28.y2

End Sub

Private Sub sintesis4_Click()

Dim bandera As Boolean

- Llamada a la función que resuelve el modelo de síntesis.

Sintesis4Punto

- Verificación Si el modelo tubo solución.

If bandera = True Then

- Muestra los resultados en pantalla.

Text1(5).Text = L1

Text1(6).Text = L2

Text1(7).Text = L3

Text1(8).Text = L4

- Rotaciones de los eslabones.

Text1(17).Text = tetha1

Text1(18).Text = tetha2

Text1(19).Text = tetha3

Text1(20).Text = tetha4

- Coordenadas del mecanismo mcb1.

Text1(13).Text = tetha11

Text1(14).Text = tetha22

Text1(15).Text = tetha33

Text1(16).Text = tetha44

- Coordenadas del punto Ro.

Text1(21).Text = Line28.x2

Text1(25).Text = Line28.y2

- Habilitación de los controles para mostrar cada punto.

```
MCB1.Enabled = True
```

```
MCB2.Enabled = True
```

```
MCB3.Enabled = True
```

```
MCB4.Enabled = True
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

- Si la condición anterior no se cumple muestra el siguiente mensaje.

```
MsgBox ("el sistema no tiene solución")
```

```
End Sub
```

Conclusiones

En este trabajo de tesis se cumplió con los siguientes objetivos:

- 1) Sistematizar paso a paso los modelos cinemáticos y de trayectoria de un robot paralelo plano tipo RRR.
- 2) Sistematizar paso a paso el modelo de síntesis de un mecanismo de cuatro barras usado para conducir un cuerpo rígido por cuatro puntos de precisión.
- 3) Programar sistemáticamente los modelos del robot paralelo y el mecanismo en el lenguaje de programación VISUAL BASIC V6.

Este trabajo se presentó como una alternativa para modelar de manera computacional la cinemática de multicuerpos rígidos de cadena cinemática cerrada: es decir un robot paralelo y mecanismos de cuatro barras para ello se utilizó el álgebra de complejos presentando una ventaja adicional para el manejo de las variables.

Esta alternativa se desarrolla como una metodología sistemática generalizada que permite programar los modelos de posición, velocidad y aceleración en términos de complejos.

La modelación cinemática de los sistemas mecánicos de cadena cinemática cerrada aplicando complejos y utilizando métodos Numéricos para solución de ecuaciones que rigen los modelos, representa una alternativa que permite una simulación eficiente de dichos sistemas mecánicos que facilitan su entendimiento y solución.

La modelación de la cinemática directa utilizando complejos y la manera de resolver sistemáticamente el problema de la cinemática inversa del robot paralelo, presenta una ventaja en el sentido de que el modelo matemático resultante genera sistemas algebraicos no lineales y por lo general la solución de estos sistemas es única. Dichos modelos al ser programados en el lenguaje Visual Basic V6 presentan una simplicidad para la obtención de los resultados y da una solución que es única se evita cometer errores en los desarrollos del programa. Se recomienda para futuros trabajos de tesis desarrollar otros métodos numéricos para lo obtener comparaciones desde el punto de vista computacional.

Futuros trabajos por desarrollar relacionados con esta tesis son:

- Modelación cinemática de posicionamiento de un robot paralelo tipo RRR plano usando el álgebra de complejos: rotación variante.
- Modelación cinemática de posicionamiento de un robot delta tipo RR plano usando el álgebra de complejos: rotación usual.
- Modelación cinemática de posicionamiento de un robot delta tipo RR plano usando el álgebra de complejos: rotación variante.
- Modelación cinemática de posicionamiento de un robot delta tipo RR plano usando el álgebra de Cuaterniones.
- Modelación del problema de síntesis de un mecanismo de 4 barras: conducción de cuerpo rígido, tres puntos de precisión, usando el álgebra de Cuaterniones.

Bibliografía

- [1] Cevallos Francisco Javier. "Enciclopedia de Microsoft Visual Basic" editorial alfa omega México D.F. 2000. ISBN 970-15-0523-9

- [2] Delfín Vázquez Juan José," Análisis cinemático de un robot paralelo planar de tres grados de libertad tipo rrr."Tesis de Grado de Maestro en Ingeniería Mecánica. UNAM-ITESCA, México, D. F., 2004 (por presentarse)

- [3] Martínez Gradilla Gabriel ," Análisis y síntesis de un mecanismo de cuatro barras; conducción de cuerpo Rígido para tres y cuatro puntos de precisión usando números complejos."Tesis de Grado de Maestro en Ingeniería Mecánica. UNAM-ITESCA, México, D. F., 2004.

- [4] Jiménez E., Reyes A., Galindo F., Esquer H., González I., Luna J., Mercado M., Portillo S. Simulación computacional de una trayectoria continua para la aplicación de soldadura por inmersión de estaño de un componente electrónico. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Por presentarse en Congreso 2003.

- [5] Referencia de : Guardia Bruno "Bases de Microcomputadoras", <http://www.sinergia-web.com.mx/clases/asm9708/Temas/clase03.htm>, Instituto tecnológico de estudios superiores de Monterrey , México Junio 1998.

- [6] Jones C. **Applied Software Measurement: Assuring Productivity and Quality,(1996)** Editorial McGraw Hill New. York.

- [7] John W. Gray. Mastering Mathematica, Programming Methods and Applications. (1994). Academic Press Inc. New York.
- [8] Reyes, L. (1998). Sobre la parametrización de las Rotaciones y Reflexiones de Multicuerpos Rígidos en el plano. Estudios Ocasionales. Universidad Anáhuac del Sur. ISBN 968-64-02-08-X.
- [9] Jiménez E. Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción. México. (1998). (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [10] Jiménez E., Cuenca F., Reyes L., Pérez A., Delfín J., Ruiz E., Ojeda E. Modelación cinemática de posicionamiento de un robot paralelo planar tipo rrr usando una números complejos.(2003). Segundo congreso de la Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Universidad Anáhuac del Sur. México D.F.
- [11] Cuenca F. Jiménez E., Reyes L. "Modelación cinemática de posicionamiento de un robot paralelo tipo RRR. (1999). Coloquio 1999, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [12] Martínez R. Modelación y simulación computacional de trayectorias tridimensionales México.(1997). Tesis (Maestría en Ingeniería Mecánica) UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.

- [13] Méndez M. Modelado Cinemático de sistemas mecánicos de cadena cerrada México. (1995). Tesis (Maestría en Ingeniería Mecánica) UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [14] Rubio. Evasión de Obstáculos Mediante Multicuerpos Rígidos. México. (2000). Tesis (Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [15] Pérez A. Caracterización y prueba de las secuencias simultáneas de un robot paralelo experimental tipo RRR. México. (2001) (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [16] Flores O. Modelación y prueba de secuencias de movimientos de un robot de dos grados de libertad para un problema de evasión de obstáculos en el plano. México. (2003). Tesis (Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [17] Jiménez E. Reyes L., Ferrer L., Flores M. Aplicaciones del método científico a problemas de la ingeniería mecánica. Informe interno de investigación ISBN (en trámite). DEPMI, UNAM. 2004
- [18] Gurtin M. (1981). Introduction of Continuos Mechanics. Academic Press. New York.

- [19] Jiménez E., Reyes L., Cuenca F. Modelación cinemática de posicionamiento de un mecanismo de cinco barras usando una rotación variante de los números complejos. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. Congreso 2003. Universidad Anáhuac del Sur. México
- [20] Angeles J. "*Spatial Kinematic Chains : Analysis – Synthesis - Optimization*". Verlag , New york . (1982).
- [21] Reyes Ávila Luis. Quaternions: Une Representation Parametrique Systematique Des Rotations Finies. Partie 1: Le Cadre Theorique. (1990). Rapport de Recherche INRIA Rocquencourt. France.