

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA



TESIS

Docente (Asesor)

Dr. Jesús Alberto Mendoza Quiñonez

Alumno

Carlos Uribe Guzmán

Trabajo

**ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UNA PINZA
CARGABOBINAS EN EL CAMPO DE LAS
POSICIONES**

Licenciatura en ingeniería Mecatrónica

MATRICULA: 201523371

28/Mayo/2022

1. Resumen

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos al realizar el análisis de posiciones, para cada una de las dos etapas de funcionamiento, de la tenaza carga bobina Heppenstall-Europe de 21T. Ubicada en la Superintendencia de Laminación en Frío de SIDOR. Para ello se realizó el levantamiento cinemático, el diagrama de vinculaciones cinemáticas y se escribieron las ecuaciones de restricción cinemática que rigen el funcionamiento del mecanismo en el campo de las posiciones. La complejidad de este trabajo aparece debido a que el eslabonamiento presenta una inversión cinemática [1] que cambia el bastidor del mecanismo durante su trabajo y esto, a su vez, la forma en que se mueven los elementos constituyentes de la tenaza, durante cada ciclo de trabajo, lo que obliga a realizar los cálculos cinemáticos dos veces. Se presenta como resultado del trabajo varias gráficas, una para cada una de las etapas de trabajo del eslabonamiento, que representa la variación en la posición del elemento de salida en función de la ubicación del elemento de entrada.

En el ámbito empresarial, los procesos productivos en ciertas industrias requieren una especial manipulación de cargas, ya sea por comodidad o porque la pieza sea delicada y así lo requiera; para lo cual, acoplar a sus grúas diferentes pinzas automáticas que se encarguen de mover esas cargas con rapidez, seguridad y fiabilidad deja de ser un lujo y pasa a ser una necesidad primordial. Existen diferentes tipos de pinzas cargabobinas, cada una de ellas especializadas o enfocadas en un contexto específico, las cuales mencionaremos más adelante, sin embargo, nos centraremos en la que nos interesa analizar que es la pinza de elevación de bobinas verticales del fabricante Heppenstall.

Este proyecto surge de las necesidades de diferentes sectores empresariales, tiene como referencia aplicarlo a las masas de la industria azucarera, para agilizar los procesos que este engloba, entre otras piezas. Mas, sin embargo, podría modificarse y adaptarlo para las empresas que lo requieran según sus necesidades.

Todo está pensado para darle solución a una problemática, la que en este caso sería un correcto traslado y manipulación de bobinas, camisas y masas con grandes pesos y dimensiones.

2. Índice

1.	Resumen	I
2.	Índice	II
3.	Índice de ilustraciones	IX
4.	Agradecimientos	XV
5.	Dedicatoria	XV
➤	Capítulo I	1
6.	Introducción	2
6.1.	Mecanismos en el campo de las posiciones	2
6.1.1.	Cinemática	3
6.1.2.	Eslabones, pares y cadena cinemática	4
6.1.3.	Juntas coincidentes	5
6.1.4.	Técnicas de análisis de mecanismos	6
6.2.	Cinemática en los mecanismos	6
6.2.1.	Tipos de movimiento	7
6.2.2.	Grados de libertad de un mecanismo	8
6.2.3.	Inversión cinemática	9
6.2.4.	Pares cinemáticos	10
6.2.5.	Movilidad	10
7.	Desarrollo	14

7.1.	Pinza de pantógrafo multifunción.....	14
7.2.	Pinza para paquetes de chapa	14
7.3.	Volteador de piezas voluminosas	15
7.4.	Pinza para dovelas	15
7.5.	Pinza para manejo de mallazo	16
7.6.	Pinzas portabobinas horizontal.....	16
7.7.	Pinza Cargabobinas de Sidor.....	17
7.7.1.	Datos y características técnicas placa de la pinza cargabobinas de Sidor	18
7.8.	Conceptos teóricos a tener en cuenta para el análisis del mecanismo	19
7.8.1.	¿Qué es la trigonometría?.....	19
7.8.2.	Razones trigonométricas	20
7.8.3.	Razones trigonométricas recíprocas	22
7.8.4.	Teorema del seno	23
7.8.5.	Teorema del coseno	24
7.8.6.	Teorema de Pitágoras.....	25
7.8.6.1.	Calculando la hipotenusa.	26
7.8.6.2.	Calculando un cateto.....	26
7.8.7.	Clasificar triángulos rectángulos.	27
7.8.8.	Ángulos opuestos por el vértice	27
7.8.9.	Ángulos suplementarios	28

7.8.10.	Ángulos correspondientes	28
7.8.11.	Criterio de Grübler.....	29
8.	Objetivos	30
8.1.	Objetivo general	30
8.2.	Objetivo específico	31
9.	Justificación.....	31
10.	Planteamiento del problema	32
10.1.	Aplicaciones industriales de la Pinza.....	32
10.2.	¿Qué implementar para su mejoramiento?.....	33
10.3.	¿Cómo se espera que funcione el mecanismo?	34
11.	Hipótesis.....	35
11.1.	Cuidado de la pieza.....	35
11.2.	Comodidad	38
11.3.	Versatilidad	39
11.4.	Tiempo	40
11.5.	Mejor manejo de la carga	42
12.	Antecedentes.....	43
12.1.	¿A qué se dedica DEDINI?	43
12.2.	¿Quién es Frymsa?.....	44
12.2.1.	Ahora bien, ¿Por qué ellos?	44

13.	Marco teórico.....	48
13.1.	La posición	48
13.2.	Desplazamiento lineal.....	49
13.3.	Análisis de posición y desplazamiento.	51
13.4.	Análisis gráfico de posición y desplazamiento.	51
13.5.	Posición y desplazamiento del resto de los eslabones dependientes.	52
13.6.	Detalles sobre el funcionamiento	54
13.7.	Especificaciones técnicas	56
13.2.1.	Eslabones 1 y 2.....	56
13.7.2.	Eslabones 1 y 3.....	57
13.7.3.	Eslabones 2, 3 y 4.....	57
13.7.4.	Eslabón 5.....	58
13.7.5.	Eslabón 6.....	58
13.7.6.	Eslabón 7.....	58
13.7.7.	Eslabón 8.....	59
13.7.8.	Eslabón 9.....	59
13.7.9.	Eslabón 0.....	59
13.7.10.	Diámetros de los trece pasadores de las articulaciones del mecanismo .	60
13.8.	Softwares utilizados.....	60
14.	Marco metodológico	61

14.1.	Diagrama de vinculaciones cinemático (DVC).....	61
14.2.	Cinemática en el campo de las posiciones de una pinza cargabobinas	63
14.3.	Movilidad de la pinza.....	64
14.4.	Funcionamiento de la pinza.....	65
14.5.	Datos geométricos del eslabonamiento para la pinza cargabobinas	74
14.6.	Grafo de vinculaciones cinemáticas entre eslabones	77
➤	Capítulo II.....	82
15.1.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo I durante la primera inversión cinemática (tenaza interior detenida y tenaza exterior en movimiento).....	83
15.1.1.	Solución para ϕ_3 , ciclo I.....	84
15.1.2.	Solución para ϕ_{51} , ciclo I	85
15.2.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo II durante la primera inversión cinemática.....	89
15.2.1.	Solución para ϕ_{91} en el ciclo II.....	92
15.2.2.	Solución para ϕ_{71} en el ciclo II.....	93
15.3.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo III durante la primera inversión cinemática	95
15.3.1	Solución para ϕ_8 en el ciclo III.....	98
15.3.2.	Soluciones para ϕ_{62} en el ciclo III	99

15.4.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo IV durante la primera inversión cinemática.....	101
15.4.1.	Soluciones para φ_4 en el ciclo IV	104
15.5.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo V durante la primera inversión cinemática.....	105
15.5.1.	Soluciones para φ_{11} en el ciclo V	109
15.5.2.	Soluciones para φ_{10} en el ciclo V	109
➤	Capítulo III	120
16.1.	Segunda inversión cinemática del mecanismo	121
16.2.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VI durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).....	122
16.2.1.	Soluciones para φ_{65} en el ciclo VI.....	126
16.2.2.	Soluciones para φ_4 en el ciclo VI.....	127
16.3.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VII durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).....	129
16.3.1.	Soluciones para φ_{72} en el ciclo VII.....	133
16.3.2.	Soluciones para φ_{10} en el ciclo VII.....	133

16.4.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VIII durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).	135
16.4.1.	Soluciones para $\phi 61$ en el ciclo VIII	137
16.4.2.	Soluciones para $\phi 52$ en el ciclo VIII	141
16.4.3.	Soluciones para $\phi 8$ en el ciclo VIII	141
16.5.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo IX durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).	143
16.5.1.	Soluciones para $\phi 1$ en el ciclo IX	146
16.5.2.	Soluciones para $\phi 9$ en el ciclo IX	146
16.6.	Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo X durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).	148
16.6.1.	Soluciones para $\phi 3$ en el ciclo X	151
17.	Resultados	159
17.1.	Resultados de la primera inversión cinemática	160
17.2.	Resultados de la segunda inversión cinemática	165
17.3.	Discusión de los resultados	189
18.	Conclusiones	207
19.	Anexos	208

20. Bibliografía..... 209

3. Índice de ilustraciones

Imagen 1. Forma correcta de colocar una bobina horizontal..... 36

Imagen 2. Daños que sufrió una pieza por una incorrecta manipulación..... 36

Imagen 3. Deterioros a causa de un mal almacenaje..... 37

Imagen 4. Desperfecto provocado por un mal transporte..... 37

Imagen 5. Transporte de bobinas con la ayuda de cadenas 38

Imagen 6. Traslado de mazas con el apoyo de cables o estrobos 39

Imagen 7. Maza terminada para molinos azucareros que muestra posibles puntos de anclaje..... 40

Imagen 8. Entornos en los que se debe manipular una bobina o maza dentro de la industria 40

Imagen 9. Correcto apilamiento de mazas, con la finalidad de ahorrar tiempo 41

Imagen 10. Grúa con la cual debe ser manipulada la pinza cargabobinas 41

Imagen 11. Transporte de una maza utilizando dos grúas..... 42

Imagen 12. Proceso de fabricación de las mazas para los ingenios azucareros 45

Resultado 1. Figuras 10 y 11. Gráficas de φ_3 y φ_{51} en función de la coordenada generalizada de entrada L2. (Ciclo I, primera inversión cinemática) 89

Resultado 2. Figuras 12 y 13. Gráficas de φ_9 y φ_{71} en función de la coordenada generalizada de entrada L2. (Ciclo II, primera inversión cinemática)..... 94

Resultado 3. Figuras 14 y 15. Ángulos de salida φ_8 y φ_{62} como una función de la altura variable L2. (Ciclo III, primera inversión cinemática)..... 100

Resultado 4. Figuras 17. Ángulo de salida φ_4 como una función de la altura variable L2. (Ciclo IV, primera inversión cinemática)..... 105

Resultado 5. Figuras 20 y 21. Ángulos de salida φ_{11} y φ_{10} como una función de la altura variable L2. (Ciclo V, primera inversión cinemática)..... 111

Resultado 6. Figuras 22 y 23. Gráficas de φ_{65} y φ_4 en función de la coordenada generalizada de entrada L2. (Ciclo VI, segunda inversión cinemática)... 129

Resultado 7. Figuras 25 y 26. Gráficas de φ_{72} y φ_{10} en función de la coordenada generalizada de entrada l2 y la excentricidad “e” . (Ciclo VII, segunda inversión cinemática) 135

Resultado 8. Figuras 29 y 30. Gráficas de φ_{52} y φ_8 en función de la coordenada generalizada de entrada l2 y la excentricidad “e” . (Ciclo VIII, segunda inversión cinemática). 143

Resultado 9. Figuras 32 y 33. Gráficas de φ_1 y φ_9 en función de la coordenada generalizada de entrada l2 y la excentricidad “e” . (Ciclo IX, segunda inversión cinemática) 148

Resultado 10. Figura 35. Gráfica de φ_3 en función de la coordenada generalizada de entrada l2 y la excentricidad “e” . (Ciclo X, segunda inversión cinemática).
..... 151

Resultado 11. Figura 85. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi3 en la primera inversión cinemática
..... 171

Resultado 12. Figura 86. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi4 en la primera inversión cinemática
..... 172

Resultado 13. Figura 87. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi51 en la primera inversión cinemática
..... 173

Resultado 14. Figura 88. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi62 en la primera inversión cinemática
..... 174

Resultado 15. Figura 89. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi71 en la primera inversión cinemática
..... 175

Resultado 16. Figura 90. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi8 en la primera inversión cinemática
..... 176

Resultado 17. Figura 91. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi9 en la primera inversión cinemática 177

Resultado 18. Figura 92. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi10 en la primera inversión cinemática 178

Resultado 19. Figura 93. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi3 en la segunda inversión cinemática 179

Resultado 20. Figura 94. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi4 en la segunda inversión cinemática 180

Resultado 21. Figura 95. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi51 en la segunda inversión cinemática 181

Resultado 22. Figura 96. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi62 en la segunda inversión cinemática 182

Resultado 23. Figura 97. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi71 en la segunda inversión cinemática 183

Resultado 24.	Figura 98. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi8 en la segunda inversión cinemática	184
Resultado 25.	Figura 99. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi9 en la segunda inversión cinemática	185
Resultado 26.	Figura 100. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi10 en la segunda inversión cinemática	186
Video 1.	Video de la pinza cargabobinas puesta en práctica en la vida real	70
Video 2.	Video que simula la primera inversión cinemática.....	113
Video 3.	Video que simula la segunda inversión cinemática	153
Tabla 1.	Designación y longitudes nominales según norma IFToMM	74
Tabla 2.	Distancia de la apertura de la mordaza exterior, respecto a la coordenada de entrada (l2, a1)	114
Tabla 3.	Distancia a1 respecto a la coordenada de entrada (l2, a1)	119
Tabla 4.	Distancia de la apertura de la mordaza exterior, respecto a la coordenada de entrada (l2, a1)	154
Tabla 5.	Distancia a3 respecto a la coordenada de entrada (l2, a3)	159

Tabla 6. Ángulos obtenidos de las coordenadas de salida de la primera inversión cinemática, respecto a la coordenada de entrada a1. Simulado en SolidWorks 198

Tabla 7. Ángulos obtenidos de las coordenadas de salida de la segunda inversión cinemática, respecto a la coordenada de entrada a3. Simulado en SolidWorks 207

4. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Jesús Alberto Mendoza Quiñonez, quien con sus amplios conocimientos y apoyo me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la empresa Frymsa, por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros, familia y a mi buen amigo Jorge Heredia Castillo, por apoyarme con su conocimiento y motivación aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención de mi madre, que siempre estuvo incondicionalmente para darme palabras de aliento y apoyo de todo tipo. Un abrazo reconfortante para renovar energías.

Muchas gracias a todos, por tanto.

5. Dedicatoria

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño. A ti Dios que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa. Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Mamá gracias por tu amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, trabajo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias a todos.

➤ Capítulo I

En este primer capítulo se dará una introducción de lo que es la pinza cargabobinas de Sidor, sus especificaciones técnicas, principio de funcionamiento y teoría utilizada para su diseño. También se mencionarán otros tipos de pinzas que hay en el mercado.

De igual forma se abordarán temas de todo lo que pretende solucionar y facilitar en el sector industrial.

6. Introducción

La Tenaza Carga Bobina de 21t fabricada por la empresa SUIZA Heppenstall-Europe en el año 2006, tiene como función levantar y trasladar de un lugar a otro las bobinas de la Superintendencia de Laminación en Frío de SIDOR.

La Tenaza consta de un sistema de palancas formado por un bastidor cambiante de lugar, más nueve palancas móviles de las cuales siete tienen disposición en paralelo.¹

Con ayuda de un software matemático nos ayudaremos a comprobar que nuestros cálculos son correctos y que podrían ser aplicados para ese caso. Con el de CAD; CAM veremos que todo concuerda entre los cálculos y la aplicación en la vida real.

Introduciremos las fórmulas y medidas, con esto podremos concluir si el diseño es óptimo o si tiene errores. Todo esto con la finalidad de resolver problemas industriales; sabiendo eso, podemos empezar a hablar más técnicamente para familiarizarnos con todo lo que corresponde a este proyecto, lo principal es la mecánica, los mecanismos y sus ramas, pero, ¿En qué consiste y que engloban los mecanismos?

6.1. *Mecanismos en el campo de las posiciones*

Comenzaremos con definir ¿qué es una máquina y un mecanismo? Las máquinas son dispositivos empleados para alterar, transmitir, y dirigir fuerzas con el propósito de lograr objetivos específicos. En tanto, un mecanismo es una porción mecánica de una máquina que tiene la función de transferir movimiento y fuerzas de una fuente de poder a una salida. Un mecanismo puede ser considerado como partes rígidas que producen el movimiento deseado de la máquina, en la ilustración 1 se describen los tipos y componentes básicos que conforman un mecanismo.

¹ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Caraballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas heppenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela



Ilustración 1. Tipos y componentes básicos de un mecanismo

6.1.1. Cinemática

- La cinemática estudia la geometría del movimiento y su análisis involucra la determinación de posición, desplazamiento, rotación, velocidad, y aceleración de un mecanismo. Ha de comentarse que la mayoría de los mecanismos exhiben un movimiento de manera tal que las partes se mueven en planos paralelos. Estos mecanismos cuyo movimiento está limitado a un espacio bidimensional se conocen como mecanismos planares, siendo la cinemática parte fundamental del mecanismo en la ilustración dos se describe la ciencia básica de la mecánica y sus bloques. ²

² Información obtenida del archivo de internet de: Introducción a los mecanismos y a la cinemática

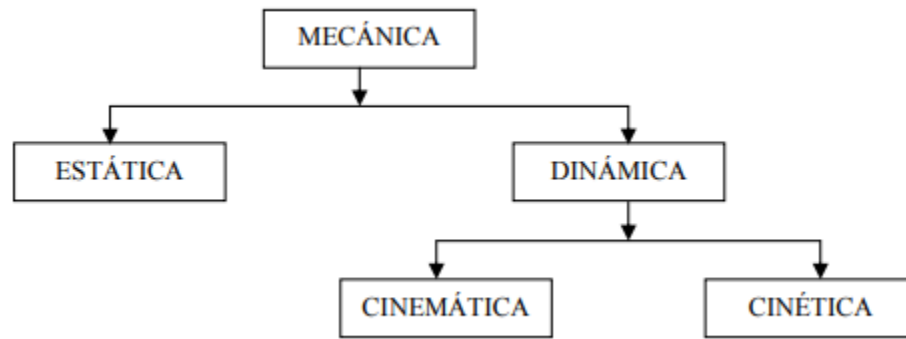


Ilustración 2. Ciencia de la mecánica

6.1.2. Eslabones, pares y cadena cinemática

- Se denomina eslabón a cada uno de los sólidos rígidos que componen la máquina. En la literatura técnica suele usarse también otros nombres como: elemento, miembro o barra. El concepto de pieza se halla en un nivel inferior al de eslabón, pues una sola pieza, o un conjunto de piezas unidas formando un sólido rígido constituyen un eslabón, en la ilustración 3 se muestran algunos de los diferentes tipos de eslabones existentes para diversos mecanismos. Cada eslabón está unido a otros eslabones los cuales pueden clasificarse según el tipo de movimiento desarrollado:
 - Balancín: eslabón que oscila respecto de un eje fijo.
 - Manivela: eslabón que da vueltas completas alrededor de un eje fijo.
 - Biela: eslabón que no tiene ningún punto articulado fijo, es decir, con un movimiento general.
 - Soporte: eslabón fijo.

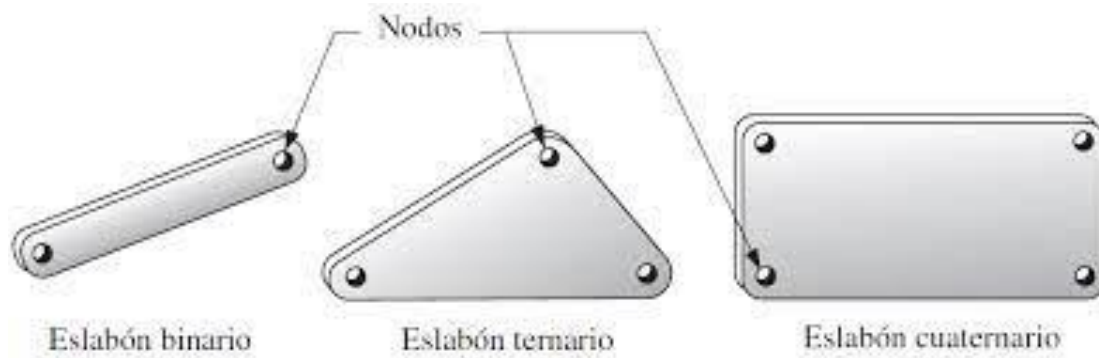


Ilustración 3. Diferentes tipos de eslabones para mecanismos

6.1.3. Juntas coincidentes

- Algunos mecanismos tienen tres eslabones que están todos conectados a una misma junta de revolución. Físicamente una junta puede conectar a los tres eslabones, sin embargo, por definición, una junta de revolución conecta dos eslabones. Para el análisis cinemático, esta configuración debe ser modelada matemáticamente como dos juntas separadas. Una junta conecta el primer eslabón con el segundo y la otra, entonces, conectará el segundo con el tercero, por eso en la ilustración 4 se describen los tipos de enlaces de rotación. Consecuentemente cuando tres eslabones están conectados físicamente por una sola junta, matemáticamente esta debe ser modelada como dos juntas separadas.³

³ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Caraballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

6.1.4. Técnicas de análisis de mecanismos

- Sistemas CAD (dibujo asistido por computadora) El análisis gráfico de los mecanismos puede ser efectuado por medio de sistemas CAD, en donde con independencia del sistema, se pueden dibujar, con alta precisión, líneas a determinados ángulos sin que exista la necesidad de escalar dichas líneas. Las técnicas analíticas, estas técnicas involucran principalmente a las teorías de geometría y trigonometría. Y realmente constituyen el complemento a las técnicas gráficas. Este enfoque tiene la desventaja de que requiere se realicen cálculos laboriosos para mecanismos complejos. Métodos analíticos asistidos por herramientas computacionales En la medida que soluciones analíticas precisas sean deseadas para varias posiciones de un mecanismo, el número de cálculos que deben efectuarse aumenta.

Algunas herramientas computacionales incluyen: hojas de cálculos, programas de análisis dinámico (Working Model, ADAMS, Dynamic Designer), y códigos propios escritos en lenguajes como Matlab, Scilab, Mathematica, VisualBasic, o C++.

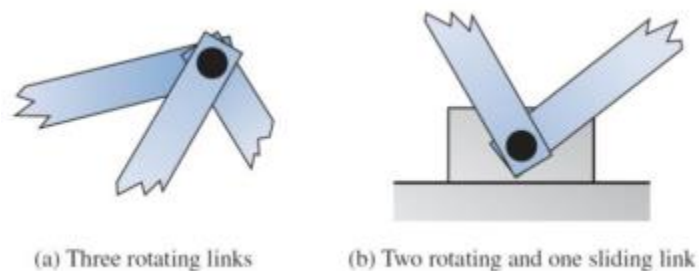


Ilustración 4. Tipos de enlaces de rotación, donde se muestra en la figura “a” 3 enlaces de rotación y en la “b” 2 de rotación y un eslabón deslizante

6.2. Cinemática en los mecanismos

La cinemática estudia la geometría del movimiento y su análisis involucra la determinación de posición, desplazamiento, rotación, velocidad, y aceleración de un mecanismo. Ha de

comentarse que la mayoría de los mecanismos exhiben un movimiento de manera tal que las partes se mueven en planos paralelos. ⁴

6.2.1. Tipos de movimiento

Un mecanismo ha completado un ciclo cinemático cuando inicia su movimiento desde algún conjunto de posiciones relativas, y vuelve a la misma posición inicial, habiendo pasado sus eslabones por todas las posiciones posibles que pueden tomar cada uno de ellos. El tiempo empleado en completar un ciclo se denomina periodo. Se define como fase al conjunto de posiciones relativas simultáneas que ocupan los eslabones del mecanismo en un instante cualquiera del ciclo cinemático, es importante saber que existen dos tipos de cadenas cinemáticas, las abiertas y las cerradas como se podrá ver en la ilustración 5.

Obsérvese que el concepto de ciclo cinemático difiere del de ciclo energético. Por ejemplo, el motor de combustión interna de cuatro tiempos realiza dos ciclos cinemáticos por cada ciclo energético.

Si se consideran los eslabones de un mecanismo atendiendo al tipo de movimiento que realizan durante un ciclo cinemático, se pueden clasificar según los siguientes modos de funcionamiento:

- Continuo: el eslabón presenta un movimiento sin interrupción ni parada durante cada ciclo. Un ejemplo sería una manivela o eje de motor en rotación constante.
- Intermitente: el eslabón permanece parado un tiempo durante cada ciclo. Ejemplos de este tipo de movimiento son las válvulas con tiempo determinado de apertura y cierre, o el eslabón Cruz de Malta.

⁴ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Caraballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

- Alternativo: el eslabón se caracteriza por presentar ciclo de avance y retroceso, e invierte el sentido de su movimiento durante cada ciclo. Como ejemplos se tiene el balancín en el mecanismo de cuatro barras, o el pistón en el biela-manivela.⁵

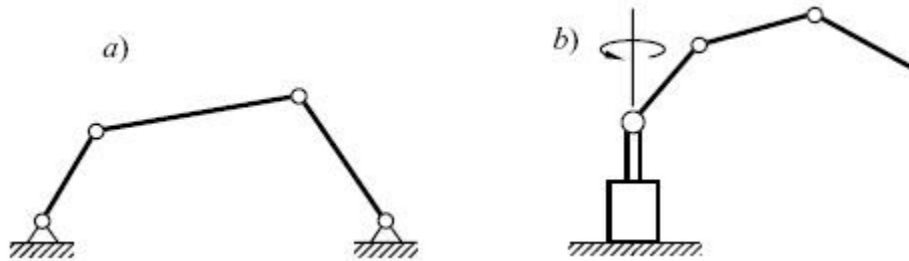


Ilustración 5. Cadena cinemática cerrada “a” y abierta “b”

6.2.2. Grados de libertad de un mecanismo

El concepto de grado de libertad (GDL) es fundamental tanto para la síntesis como para el análisis de mecanismos. Es necesario ser capaz de determinar rápidamente el GDL de cualquier conjunto de eslabones o juntas que pueda ser sugerido como solución a un problema. El grado de libertad (también llamado movilidad M) de un sistema se define como:

Grado de libertad. El número de entradas que se necesita proporcionar para crear una salida predecible.

También: como el número de coordenadas independientes requerido para definir su posición.⁶

Se definen los grados de libertad o movilidad de un mecanismo como el número de parámetros independientes de entrada que es necesario utilizar para definir completamente su posición.

⁵ Información obtenida del trabajo del: Ing. Arturo Castillo Ramírez.
Cinemática de las máquinas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de ingeniería

⁶ Información obtenida del trabajo del: Dr. Ing. Ángel Francisco Villalpando Reyna.
Análisis cinemático de mecanismos

Considérese en primer lugar un eslabón libre en el plano. Puesto que se necesitan tres parámetros para fijarlo en una posición, el eslabón tendrá tres grados de libertad en el plano.

6.2.3. Inversión cinemática

Partiendo de una cadena cinemática y estableciendo un eslabón fijo, se obtiene un mecanismo. Si se toma como eslabón fijo, soporte o de referencia otro eslabón diferente del mecanismo, el movimiento del mecanismo obtenido puede cambiar completamente.

Al proceso que consiste en variar el eslabón considerado como soporte se le denomina inversión de una cadena cinemática. Si una cadena cinemática tiene n eslabones, se pueden obtener n inversiones cinemáticas y, por tanto, n mecanismos distintos. Para el mecanismo de biela-manivela se obtendrían las inversiones cinemáticas que se presentan en la siguiente figura. En la inversión (1), en la que el eslabón fijo es el cilindro, se obtiene el mecanismo básico de biela-manivela empleado en la mayoría de los motores de combustión. La entrada sería el pistón empujado por los gases en expansión y la salida la manivela. Invirtiendo entrada y salida se tiene un mecanismo de compresión. Estableciendo ahora como eslabón fijo el que anteriormente funcionaba como manivela, se obtiene la inversión (2), denominada mecanismo de Witworth, que es un mecanismo de retorno rápido que será estudiado más adelante. Su aplicación más habitual es en máquina herramienta. Considerando como único eslabón fijo el eslabón que en la inversión (1) funcionaba como biela, se obtiene la inversión (3), que se empleó por ejemplo en las primeras locomotoras de vapor. Por último, partiendo de la inversión (1), estableciendo ahora el pistón como el eslabón fijo, se obtiene la inversión (4) que se puede emplear en una bomba de agua manual, los cuatro casos son mostrados a continuación en la ilustración 6.⁷

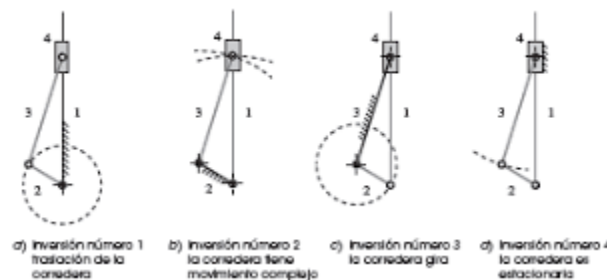


Ilustración 6. Diferentes inversiones cinemáticas

⁷ Información obtenida del trabajo del: Ing. Arturo Castillo Ramírez.
Cinemática de las máquinas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de ingeniería

6.2.4. Pares cinemáticos

A través de los pares cinemáticos, un eslabón se une a otros para transmitir movimiento o fuerza. Se definen los grados de libertad de un par cinemático o conectividad como el número de grados de libertad del movimiento relativo de los miembros del par. Si se suponen dos eslabones móviles conectados mediante un par cinemático, se puede imaginar uno cualquiera de ellos como fijo, y calcular para el otro eslabón el número mínimo de parámetros independientes que necesito establecer para determinar su posición relativa. De este modo se obtienen el número de grados de libertad del par que limita el movimiento de un eslabón respecto a otro (sin tener en cuenta las restricciones al movimiento que implican el resto de pares cinemáticos del mecanismo). Obsérvese entonces que en el plano aparecen pares con un grado de libertad y pares con dos grados de libertad.

6.2.5. Movilidad

Una propiedad importante en el análisis de mecanismos es el número de grados de libertad del eslabonamiento. El número de grados de libertad es el número de entradas independiente requeridas para determinar con precisión la posición de todos los eslabones del mecanismo con respecto al marco de referencia. También puede ser definido como el número de actuadores requeridos para operar el mecanismo. El número de grados de libertad de un mecanismo también es llamado movilidad y se denota con el símbolo M . Cuando la configuración de un mecanismo es completamente definida por la posición de un eslabón, el sistema se dice tiene un grado de libertad. La mayoría de los mecanismos producidos comercialmente tiene un solo grado de libertad, en la ilustración 7 se presenta mediante eslabones la rotabilidad de un mecanismo y en la ilustración 8 los eslabones para diferentes grados de libertad y tipos de movimiento.⁸

⁸ Información obtenida del archivo de internet de: Introducción a los mecanismos y a la cinemática

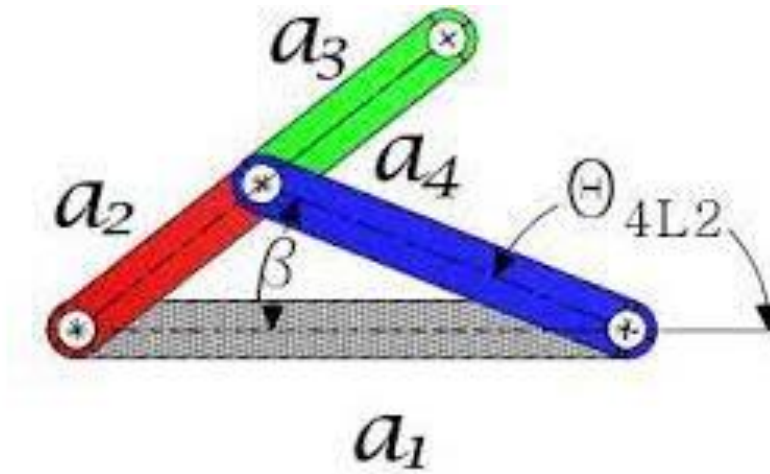


Ilustración 7. Rotabilidad de un mecanismo

- $m = 0$ \Rightarrow El sistema es una estructura estáticamente determinada.



- $m = -1$ \Rightarrow El sistema es una estructura estáticamente indeterminada.



- $m = 1$ \Rightarrow El mecanismo es desmodrómico, puesto que fijando una variable de entrada quedan determinadas todas las demás.



- $m = 2$ \Rightarrow El mecanismo es no desmodrómico, a no ser que se definan simultáneamente dos variables de entrada para determinar el resto.

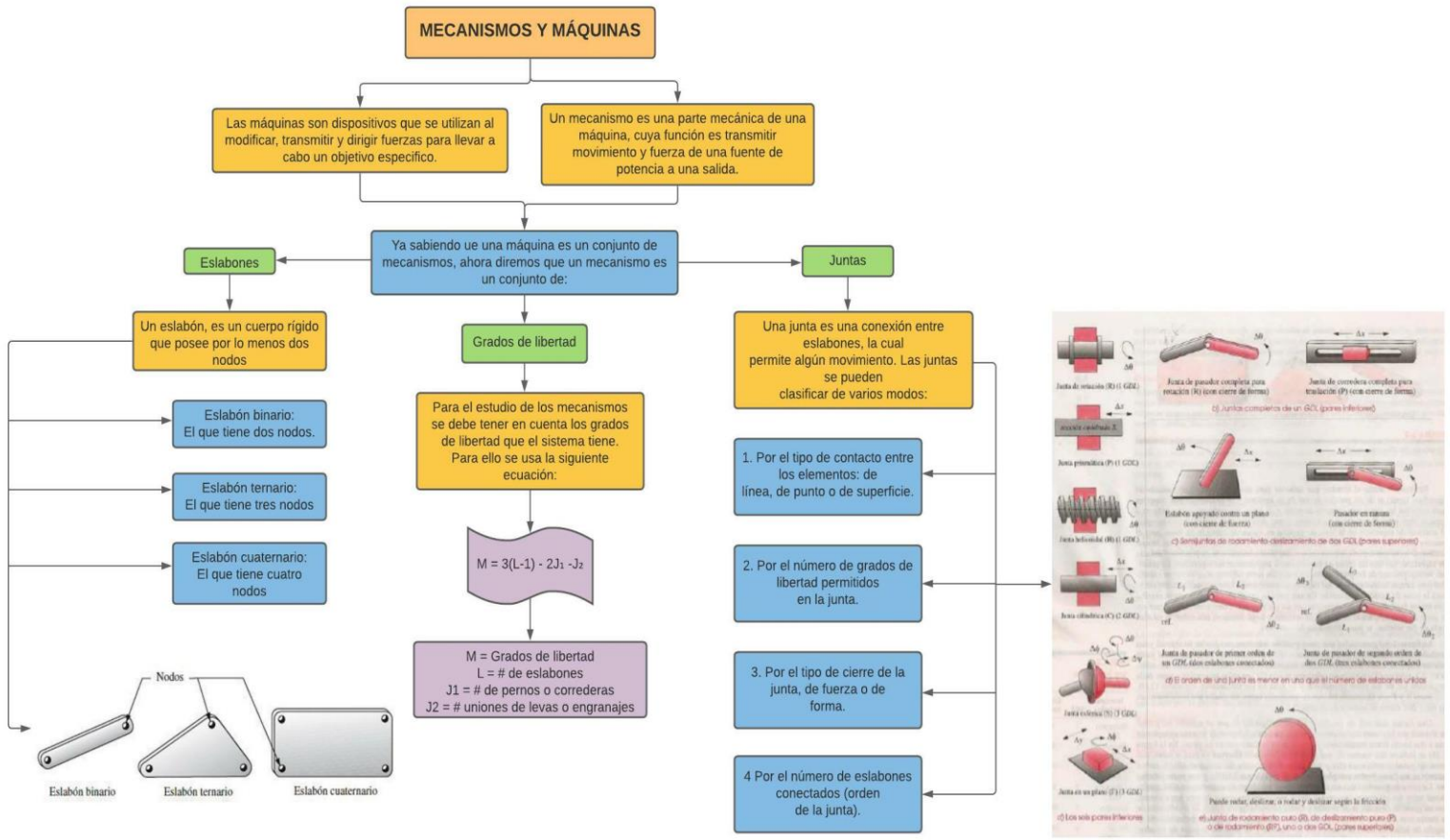


Ilustración 8. Eslabones para diferentes grados de libertad y tipos de movimientos

Toda la información presentada fue con el fin de dar a conocer toda la teoría requerida para continuar con la parte matemática de esta investigación, es sumamente importante, ya que, si no hubiéramos contemplado toda esta información, no hubiera podido ser posible su desarrollo, por eso en el siguiente mapa mental de la ilustración 9 concluimos y repasamos lo que engloban las máquinas y mecanismos.

Posteriormente empezaremos a adentrarnos más en el tema de la pinza cargabobinas y sus tipos que existen. Daremos información relevante sobre está y abordaremos conceptos teóricos que son necesarios para su análisis.

En la hipótesis ya daremos un enfoque general adentrado en el tema central y el análisis cinemático, mencionando todos los puntos y criterios a tomar en cuenta para así proceder con el desarrollo.



Análisis cinemático de una pinza cargabobinas en el campo de las posiciones

Ilustración 9. Mapa mental de la conclusión de máquinas y mecanismos

7. Desarrollo

En las industrias existen diferentes tipos de modelos de pinzas, unas son para contextos específicos y otras para casos más comunes. En breve analizaremos y daremos detalles de algunas de las más usadas.

7.1. Pinza de pantógrafo multifunción

Se utilizan en diversas industrias para manipular todo tipo de elementos como pueden ser cajas, chapas, o cilindros.

Es un sistema para manipular con seguridad y fiabilidad. Dispone un sistema de memoria que ayuda mantener abierta la pinza cuando no tiene carga. Las garras se personalizan dependiendo el elemento a manipular, mostrada en la ilustración 10.

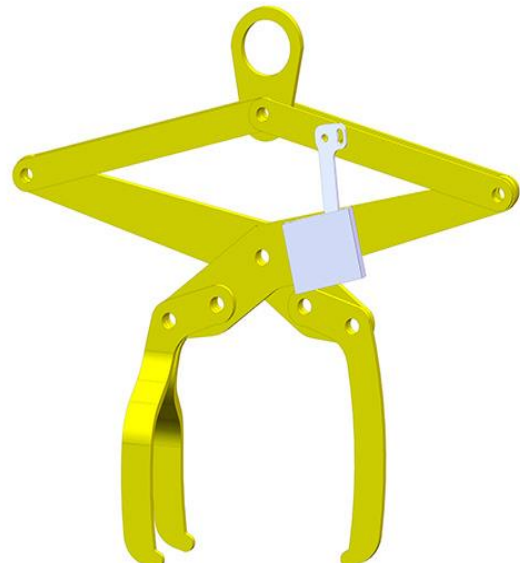


Ilustración 10. Pinza tipo pantógrafo



Ilustración 11. Pinza para paquetes de chapa

7.2. Pinza para paquetes de chapa

Por medio de esta pinza se pueden mover uno o varios paquetes de chapa o formato similar.

Las pinzas se ubican en el lado largo del paquete de hojas y se aferran a él cerrando los brazos de agarre, para luego levantarlo. Accionamiento electromecánico: el funcionamiento de la pinza se basa en un mecanismo piñón-cremallera en el que, el piñón, puesto en rotación por un sistema accionado por un motorreductor, mueve el bastidor de forma integral con los brazos de agarre, representada en la ilustración 11.

7.3. Volteador de piezas voluminosas

Cualquier pieza de volumen que se quiera voltear tiene ahora una solución segura y cómoda. Empleada en caldererías, prefabricados, etc. Se trata de dos volteadores con contrapesos y controlados mediante motores asíncronos de jaula de ardilla con reductor, variador y encoder. Cada tramo del volteado requiere de una parametrización que compense el desplazamiento de los centros de masas. La cogida de pieza se realiza mediante mordazas neumáticas, como podemos observar en la ilustración 12.



Ilustración 12. Volteador de piezas voluminosas



Ilustración 13. Pinza para dovelas

7.4. Pinza para dovelas

Estas pinzas son de gran utilidad para las obras de grandes túneles, donde las dovelas son apiladas por anillos completos. Pinzas con/sin giro preparadas especialmente para manipular hasta 4 dovelas, imprescindibles para trabajos en grandes ejecuciones como, líneas de metro y obras públicas en general. Opcionalmente, las pinzas portadovelas se pueden comandar con el radio control del propio pórtico, mostrado en la ilustración 13.

7.5. Pinza para manejo de mallazo



Gracias a este tipo de pinzas ha dejado de ser un problema la manipulación y el apilado de paquetes de malla, mejorando la seguridad de los operarios al eslingar un simple balancín.

Dependiendo de la carga y el material a manipular las grúas podrán ser equipadas con uno o más carros de elevación en cualquier sentido, o bien dotarlas de giro para una completa maniobrabilidad, pudiendo observar mejor en la ilustración 14.

Ilustración 14. Pinza para manejo de mallazo

7.6. Pinzas portabobinas horizontal

Este es el sistema de elevación más eficaz y seguro para el transporte de bobinas de forma horizontal. Nuestras pinzas portabobinas se diseñan con sistema de apertura motorizado para la manipulación de todo tipo de bobinas. Altura muy reducida. Opcionalmente se pueden comandar con el radio control de la propia grúa e incorporarles pesaje.⁹



Ilustración 15. Pinza portabobinas horizontal

⁹ Fuentes consultadas en las paginas de internet de los distribuidores: Oxworldwide y Motorman

7.7. Pinza Cargabobinas de Sidor

Como pudimos observar, hay una amplia variedad de pinzas cargabobinas, anteriormente solo están mostradas las más comunes. Nosotros realizaremos el análisis cinemático de una que es muy poco común. Esta nos ofrece grandes prestaciones para la manipulación de grandes cargas.

Para algunas empresas que trabajan bobinas, masas o camisas podría ser la mejor opción. Esta se manipula a través de una grúa, la pinza queda colgada al gancho de esta y a través de un conjunto de 11 eslabones es capaz de sujetarla y transportarla con gran facilidad a comparación de otras. En empresas que se dedican a algo cíclico o rutinario les resulta fenomenal esta comodidad y seguridad con la que se operan.

A continuación, se muestra en la ilustración 15 una pinza como la que analizaremos en el documento, también lleva anexada una descripción e información de contacto del proveedor.



Ilustración 15. Pinza cargabobinas vertical del fabricante Sidor

El siguiente enlace es de la página del fabricante del producto.

<https://www.heppenstall.ch/tongs-magnets/vertical-coil-tongs#pictures-of-different-types>

Teléfonos:
Ing. Franklin Sánchez: 0414 8772135
Miguel Moya: 0414 0990878
Gilberto Cardozo: 0426 5903643
Ángel Gutiérrez: 0416 4975028

Teléfonos internos de la Oficina de Franklin: 64077 (6004077 si se llama de afuera)

La pinza automática vertical para bobinas, ha sido diseñada para elevar bobinas en posición vertical

La robusta ingeniería de las pinzas permite su aplicación en las difíciles condiciones que prevalecen en las acerías e industria del aluminio.

El operador de la grúa controla todo el proceso de elevación desde la cabina de la grúa colocando la pinza sobre el centro de la bobina. Los brazos se cierran automáticamente al entrar en contacto con la bobina.

El dispositivo de suspensión de la pinza está diseñado para ser colgado de los ganchos estándares de grúas, este dispositivo está fijado con pernos.¹⁰

7.7.1. Datos y características técnicas placa de la pinza

cargabobinas de Sidor

HHH Type: Z1-404594

Fabricado en Zug/ Switzerland

Fabricante: Heppenstall-Europe

Capacity: 21 Ton. Class 6

Serie 2494

Year 2006

Min Open: 180 mm

¹⁰ Información obtenida de la página del distribuidor: <https://www.heppenstall.ch/es/pinza-automatica-vertical>

Max Open: 760 mm

Weight: 4700 Kg.

CARACTERÍSTICAS

Carga elevada	de bobinas
Tipo de elevación	vertical
Tipo	automática
Carga límite	21 t, 25 t, 30 t, 34 t (23,15 us ton)

Ilustración 16. Características y especificaciones de la pinza cargabobinas vertical para la industria

7.8. Conceptos teóricos a tener en cuenta para el análisis del mecanismo

Para proceder con el análisis del mecanismo de la pinza cargabobinas en el campo de las posiciones, debemos tener presentes ciertos conceptos que más adelante nos ayudaran en el levantamiento cinemático, ya que se forman diversos triángulos para cada posición del mecanismo los cuales nos interesa saber sus distancias y ángulos.

7.8.1. ¿Qué es la trigonometría?

La trigonometría es la rama de las matemáticas que estudia la relación entre los lados y ángulos de los triángulos. Se ocupa, por tanto, de las funciones asociadas a los ángulos, denominadas funciones trigonométricas (también pueden denominarse funciones circulares): seno, coseno, tangente y secante

El objetivo de la trigonometría en este proyecto y todas sus ramas, es establecer las relaciones matemáticas entre las medidas de las longitudes de los segmentos que forman los lados de un triángulo con las medidas de las amplitudes de sus ángulos, de manera que resulte posible calcular las unas mediante las otras. Dicho de otro modo, la trigonometría es la rama de la matemática que estudia los problemas relativos a la medida de los elementos de los triángulos estableciendo una correspondencia entre las magnitudes susceptibles de

medición lineal y las angulares mediante la introducción de las razones trigonométricas mostrada en la ilustración 17 así como los ángulos agudos.

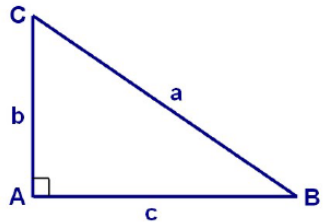
<p>Seno: razón entre el cateto opuesto al ángulo y la hipotenusa.</p> <p>Coseno: razón entre el cateto adyacente al ángulo y la hipotenusa.</p> <p>Tangente: razón entre el cateto opuesto al ángulo y el cateto adyacente.</p> <p>Cotangente: razón entre el cateto adyacente al ángulo y el cateto opuesto.</p> <p>Secante: razón entre la hipotenusa y el cateto adyacente al ángulo.</p> <p>Cosecante: razón entre la hipotenusa y el cateto opuesto al ángulo.</p>	 <p>Triángulo ABC, rectángulo en \hat{A} \hat{B} y \hat{C} : ángulos agudos a: hipotenusa b: cateto opuesto al \hat{B} y adyacente al \hat{C} c: cateto opuesto al \hat{C} y adyacente al \hat{B}</p>
---	--

Ilustración 17. Razones trigonométricas para triángulos de ángulos agudos

7.8.2. Razones trigonométricas

Las razones trigonométricas deducidas en una circunferencia goniométrica (de radio unitario) se corresponden con los valores de ciertos segmentos de recta que se denominan líneas trigonométricas. A continuación, se muestran las líneas trigonométricas en el primer cuadrante. La forma de obtener las líneas trigonométricas en los otros tres cuadrantes es similar, en la ilustración 18 se observan las razones trigonométricas deducidas de una circunferencia y en la ilustración 19 la equivalencia de un ángulo en el sistema sexagesimal al circular .

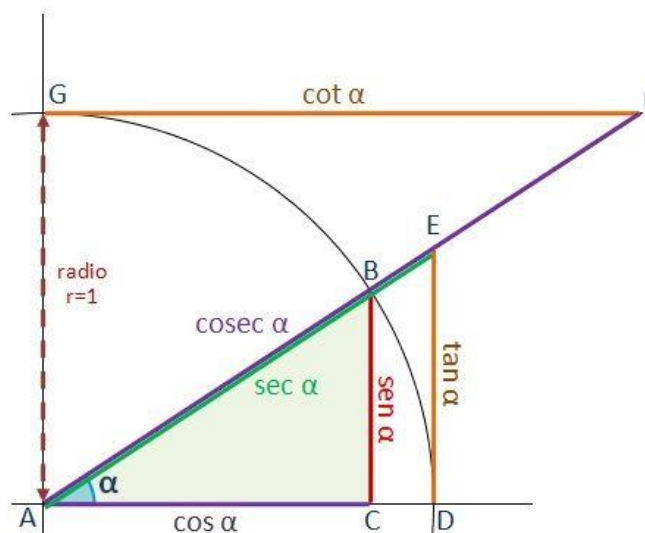


Ilustración 18. Razones trigonométricas deducidas en una circunferencia goniométrica

$$\frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} = \frac{x (\text{ángulo medido en radianes})}{s (\text{ángulo medido en grados})}$$

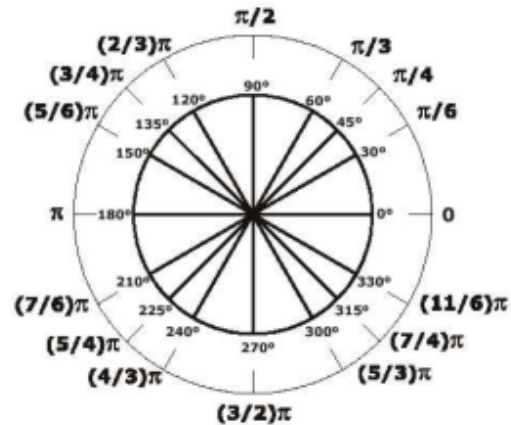


Ilustración 19. Equivalencia de un ángulo en el sistema sexagesimal al sistema circular

Las razones trigonométricas de un ángulo α son las razones obtenidas entre los tres lados de un triángulo rectángulo. Es decir, la comparación por su cociente de sus tres lados a , b y c .

Sea α uno de los ángulos agudos del triángulo rectángulo.

- El seno de un ángulo α se define como la razón entre el cateto opuesto (a) y la hipotenusa (c).

$$\text{sen } \alpha = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}} = \frac{a}{c}$$

- El coseno se define como la razón entre el cateto contiguo o cateto adyacente (b) y la hipotenusa (c).

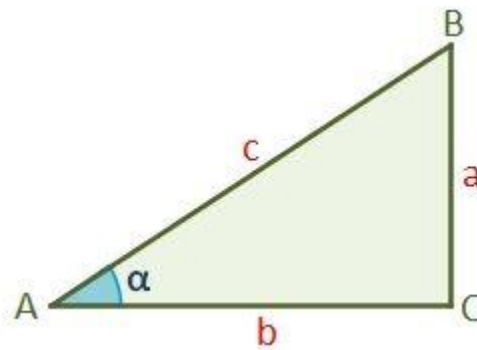
$$\text{cos } \alpha = \frac{\text{cateto contiguo}}{\text{hipotenusa}} = \frac{b}{c}$$

- La tangente es la razón entre el cateto opuesto (a) y el cateto contiguo o cateto adyacente (b).

$$\text{tan } \alpha = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto contiguo}} = \frac{a}{b}$$

7.8.3. Razones trigonométricas recíprocas

Las razones trigonométricas recíprocas de un ángulo α se obtienen como razones entre los tres lados de un triángulo rectángulo, siendo α uno de sus ángulos agudos, en la ilustración 20 están representadas las identidades trigonométricas más usadas..



- Cosecante de α . Se define como la razón entre la hipotenusa (c) y el cateto opuesto (a):

$$\csc \alpha = \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{\text{hipotenusa}}{\text{cateto opuesto}} = \frac{c}{a}$$

- Secante de α . Se define como la razón entre la hipotenusa (c) y el cateto contiguo o cateto adyacente (b):

$$\sec \alpha = \frac{1}{\cos \alpha} = \frac{\text{hipotenusa}}{\text{cateto contiguo}} = \frac{c}{b}$$

- Cotangente de α . Se define como la razón entre el cateto contiguo o cateto adyacente (b) y el cateto opuesto (a):

$$\cot \alpha = \frac{1}{\tan \alpha} = \frac{\text{cateto contiguo}}{\text{cateto opuesto}} = \frac{b}{a}$$

Identidades trigonométricas fundamentales

Recíprocas

$$\csc x = \frac{1}{\operatorname{sen} x}$$

$$\csc x * \operatorname{sen} x = 1$$

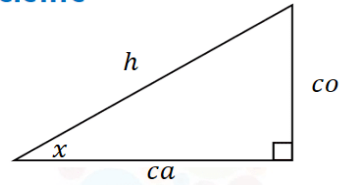
$$\sec x = \frac{1}{\operatorname{cos} x}$$

$$\sec x * \operatorname{cos} x = 1$$

$$\cot x = \frac{1}{\operatorname{tan} x}$$

$$\cot x * \operatorname{tan} x = 1$$

Cociente



$$\operatorname{sen} x = \frac{co}{h} \quad \operatorname{cos} x = \frac{ca}{h}$$

$$co = h * \operatorname{sen} x \quad ca = h * \operatorname{cos} x$$

$$\operatorname{tan} x = \frac{co}{ca} \quad \cot x = \frac{ca}{co}$$

$$\operatorname{tan} x = \frac{h * \operatorname{sen} x}{h * \operatorname{cos} x} \quad \cot x = \frac{h * \operatorname{cos} x}{h * \operatorname{sen} x}$$

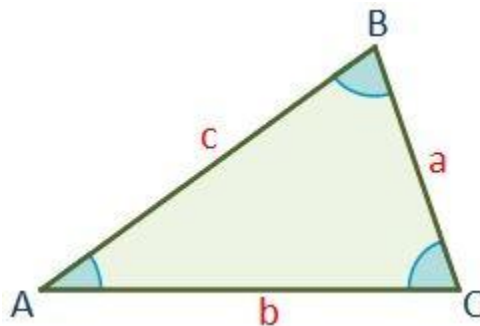
$$\operatorname{tan} x = \frac{\operatorname{sen} x}{\operatorname{cos} x}$$

$$\cot x = \frac{\operatorname{cos} x}{\operatorname{sen} x}$$

Ilustración 20. Identidades trigonométricas más usadas

7.8.4. Teorema del seno

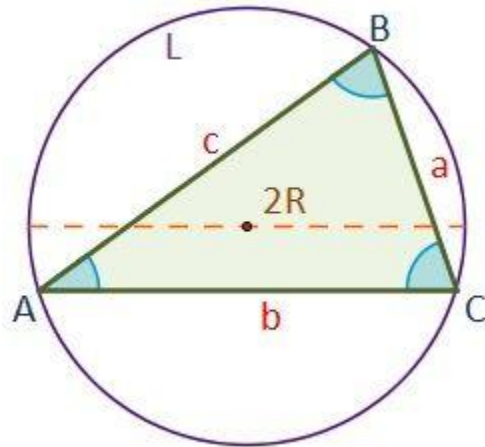
El teorema del seno relaciona proporcionalmente los lados y los ángulos de un triángulo. Éste enuncia que:



Cada lado de un triángulo (a , b y c) es directamente proporcional al seno del ángulo opuesto (A , B y C).

$$\frac{a}{\text{sen } A} = \frac{b}{\text{sen } B} = \frac{c}{\text{sen } C}$$

siendo a , b y c los costados y A , B y C los ángulos del triángulo



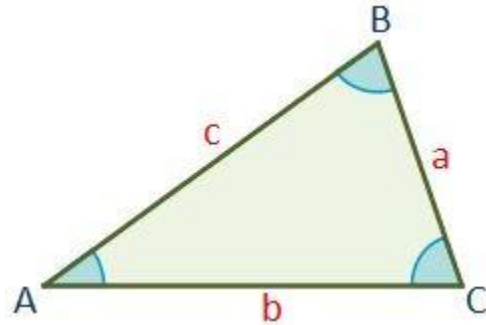
La razón entre un lado y el seno del ángulo opuesto es igual al diámetro (el doble del radio, $2R$) de la circunferencia (L) en la que se circunscribe el triángulo.

Es decir, todas las razones entre cada lado (a , b y c) y el seno del ángulo opuesto (A , B y C) son directamente proporcionales y dicha proporción es $2R$.

$$\frac{a}{\text{sen } A} = \frac{b}{\text{sen } B} = \frac{c}{\text{sen } C} = 2R$$

7.8.5. Teorema del coseno

El teorema del coseno relaciona un lado del triángulo con los otros dos y el ángulo que forman éstos. El teorema enuncia que:



El cuadrado de un lado (a , b o c) cualquiera de un triángulo es igual a la suma de los cuadrados de los dos lados restantes menos el doble del producto de ellos por el coseno del ángulo (A , B o C) que forman.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos A$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos B$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos C$$

siendo a , b y c los costados y
 A , B y C los ángulos del
triángulo

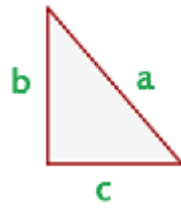
El teorema del coseno es una generalización del teorema de Pitágoras para cualquier triángulo.

De hecho, si el ángulo A fuese recto (90°), su coseno sería cero, quedando: $a^2 = b^2 + c^2$. Si el ángulo A fuese obtuso, es decir $>90^\circ$, entonces el coseno sería negativo.¹¹

7.8.6. Teorema de Pitágoras

El teorema de Pitágoras establece lo siguiente: en todo triángulo rectángulo el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos.

¹¹ Información obtenida de la página de internet de:
<https://www.universoformulas.com/matematicas/trigonometria/razones-trigonometricas/>



Triángulo rectángulo

Del enunciado anterior se desprende la siguiente fórmula con la cual podemos calcular la magnitud de cada una de los lados de un triángulo rectángulo

$$a^2 = b^2 + c^2.$$

7.8.6.1. *Calculando la hipotenusa.*

1.- Conociendo los dos catetos podemos calcular la hipotenusa, solo debemos despejar la variable a de la ecuación

$$a^2 = b^2 + c^2.$$

Lo hacemos simplemente sacando raíz cuadrada

$$a = \sqrt{b^2 + c^2}.$$

7.8.6.2. *Calculando un cateto.*

2.- Conociendo la hipotenusa y un cateto, podemos calcular el otro cateto.

De nuestra ecuación inicial $a^2 = b^2 + c^2$, podemos despejar el valor de uno de los catetos y obtenemos lo siguiente para el cateto b ,

$$b = \sqrt{a^2 - c^2},$$

y para el cateto c ,

$$c = \sqrt{a^2 - b^2}.$$

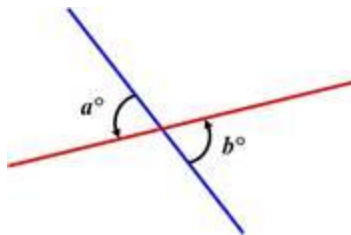
7.8.7. Clasificar triángulos rectángulos.

Conociendo los lados de un triángulo, podemos averiguar si es rectángulo o no.

Para que un triángulo sea rectángulo el cuadrado de lado mayor ha de ser igual a la suma de los cuadrados de los dos menores.

7.8.8. Ángulos opuestos por el vértice

Dos *ángulos opuestos por el vértice* son los ángulos opuestos cuando se cruzan dos rectas.



En la figura, a° y b° son ángulos opuestos por el vértice. Lo interesante es que los ángulos opuestos son iguales: $a = b$ (de hecho, son congruentes).

7.8.9. Ángulos suplementarios

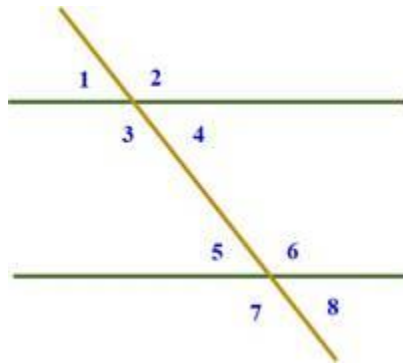
Dos ángulos son *suplementarios* si la suma de sus grados es igual a 180° .

Si se conoce un ángulo, su ángulo suplementario se puede averiguar restando la medida del mismo a 180° .

7.8.10. Ángulos correspondientes

Cuando dos líneas se cruzan con otra (que se llama transversal), los ángulos en las esquinas correspondientes se llaman *ángulos correspondientes*.

En la siguiente figura, son ángulos correspondientes:



1 y 5

2 y 6

3 y 7

4 y 8

Si las dos líneas a las que cruza la transversal son líneas *paralelas*, entonces los ángulos correspondientes son iguales.¹²

¹² Información obtenida de la fuente de: Escuela Nacional Adolfo Pérez Esquivel – U.N.C.P.B.A. Trigonometría – Triángulos rectángulos y oblicuángulos - Funciones trigonométricas

7.8.11. Criterio de Grübler

Basándonos en la fórmula de Grübler, también llamada de Kutzbach-Grübler, que es una expresión para la aplicación del criterio del mismo nombre que nos permite obtener el grado de movilidad del mecanismo. El criterio consiste simplemente en realizar una diferencia entre los grados de libertad de los eslabones del mecanismo y las restricciones impuestas por los pares cinemáticos, en la ilustración 21 se muestran las categorías de mecanismos de 4 barras y grados de libertad.

En el caso de mecanismos planos con un eslabón fijo, la fórmula resulta:

$$m = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2$$

donde n es el número de eslabones, j_1 el número de pares cinemáticos inferiores (cada uno restringe dos grados de libertad en el plano) y j_2 el número de pares cinemáticos superiores (cada uno restringe un grado de libertad en el plano).¹³

$$m = 6 \cdot (n - 1) - \sum_i j_i$$

Ahora bien, terminando el repaso para posteriormente proceder a realizar el análisis y cálculo de los ángulos de la pinza en el campo de las posiciones.

¹³ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Caraballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

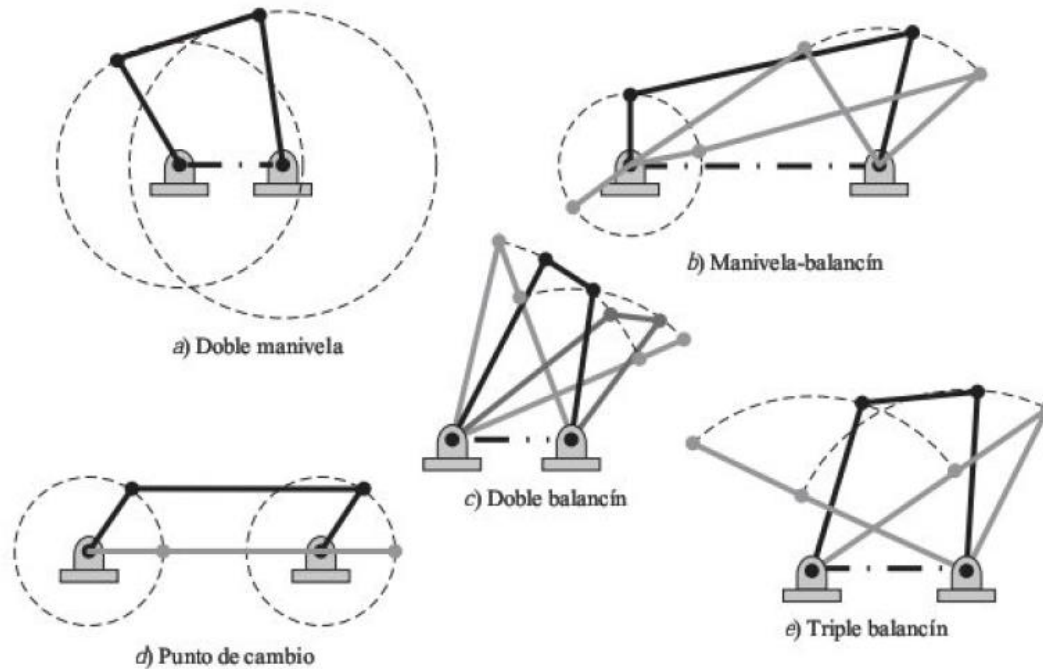


Ilustración 21. Categorías de mecanismos de cuatro barras y grados de libertad.

8. Objetivos

Poder comprobar mediante software de CAD, CAM y matemáticos el correcto diseño y funcionamiento de la pinza cargabobinas en el campo de las posiciones, para que así tenga sustento este proyecto y pueda ser desarrollado e implementado. Esto a su vez nos servirá para apreciar sus rangos y poder detectar errores, si es que los hubiera.

8.1. *Objetivo general*

Aplicar el proceso de ingeniería inversa a una pinza cargabobinas para así tener conceptos teóricos y a su vez cálculos matemáticos. Obteniendo analíticamente la posición de cada eslabón de la pinza de Heppenstall-Europe, en función de la posición del elemento de entrada; comprendiendo su principio de funcionamiento y así posteriormente poder diseñar una desde ceros.

Aplicar un proceso de ingeniería inversa para determinar la respuesta cinemática en el campo de las posiciones de una pinza cargabobinas.

8.2. *Objetivo específico*

1. Realizar el levantamiento cinemático del mecanismo de pinza cargabobinas y calcular su movilidad.
2. Explicar el funcionamiento de la pinza cargabobinas.
3. Encontrar los ciclos cinemáticos que conforman al mecanismo en cada etapa de trabajo.
4. Obtener las ecuaciones que rigen la cinemática del mecanismo en el campo de las posiciones.
5. Graficar las coordenadas generalizadas de salida de los eslabones en función de la posición del elemento de entrada.

9. Justificación

Como resultado de realizar el análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas Heppenstall-Europe de 21t de SIDOR, se conocerá el modo cómo ésta funciona desde el punto de vista geométrico, sentando las bases que permitirán otros estudios sobre el mecanismo, como la respuesta cinetostática ante la carga de trabajo, la influencia de la precisión de fabricación de cada elemento en el funcionamiento, los esfuerzos mecánicos y las deformaciones de cada eslabón y la fabricación de sus componentes en el país.

Para lograr una mayor independencia económica en el país, se hace necesario comprender los fundamentos del diseño de los dispositivos usados en la industria nacional e internacional para llevar a cabo sus procesos ya que éstos son mantenidos en estricta reserva como parte del saber particular de las casas fabricantes transnacionales y sus fundamentos de diseño no son ofrecidos a los usuarios. Por esta razón, SIDOR no posee especificaciones técnicas de fabricación ni planos de detalle de la tenaza ya que el fabricante solo dejó las instrucciones de operación del mismo y los números de partes para su compra en el exterior. En este sentido el presente trabajo surge debido a la necesidad de comprender cómo la geometría de los elementos y sus modos de articulación hacen que la pinza cargabobinas de SIDOR opere de manera automática. Para ello, se llevará a cabo el análisis cinemático del mecanismo en el campo de las posiciones.

Comprender el modo cómo este mecanismo transforma el movimiento de entrada vertical del puente grúa en uno netamente horizontal de salida de las tenazas, permite llevar a cabo un proceso de ingeniería inversa, necesario para la sustitución de importaciones, la

generación de fuentes de trabajo interno y el ahorro de divisas. Además, sirve de base para otros trabajos en el que se determine las reacciones generadas por las fuerzas presentes en cada uno de los nodos cinemáticos de cada elemento y los esfuerzos y deformaciones críticas de sus elementos constituyentes durante la operación.¹⁴

10. Planteamiento del problema

Tradicionalmente, el almacenamiento y el transporte de bobinas de acero, papel y otros materiales, han sido fuente de accidentes. La manipulación de bobinas y mazas, por su forma, peso y volumen, representan un riesgo importante y hasta mortal para su personal, conductores encargados de su transporte y sus clientes.

La empresa se propone diseñar y construir una pinza cargabobinas del tipo aquí estudiado, con lo cual en primera instancia se necesita conocer la geometría funcional del mecanismo, el modo como éste está articulado, su principio de funcionamiento y el modo como cambian los ángulos de los eslabones respecto a una referencia, a partir de esta información se puede calcular posteriormente las fuerzas en las articulaciones del mecanismo en función del peso a levantar y de la posición particular del mecanismo.

10.1. Aplicaciones industriales de la Pinza

Este modelo de pinza para la elevación de bobinas se utiliza en la industria del aluminio para mover bobinas de un lugar a otro, son extrajeras y estudiamos todo para conocer cómo operan y diseñar nuestra propia tenaza (conocer el proceso de ingeniería inversa) diseño de

¹⁴ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Carballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

una pinza o análisis, estudiar lo que ya este hecho. Estudiar dinámica y estática. Ternium es una empresa que está en Puebla México.

Su diseño y construcción es importado, por lo cual, si buscamos su cinemática, nosotros podremos por cuenta propia construida, haciendo un proceso de ingeniería inversa, teniendo las fuerzas en los nodos y pares cinemáticos podremos realizar cálculos

10.2. ¿Qué implementar para su mejoramiento?

Las recomendaciones describen los siguientes casos como riesgos a tener en cuenta para determinar las medidas preventivas, por eso en la ilustración 22 señalamos los errores de izaje más comunes para la manipulación de bobinas:

- La caída de bobinas almacenadas de forma vertical u horizontal.
- El deslizamiento de bobinas apiladas transversalmente.

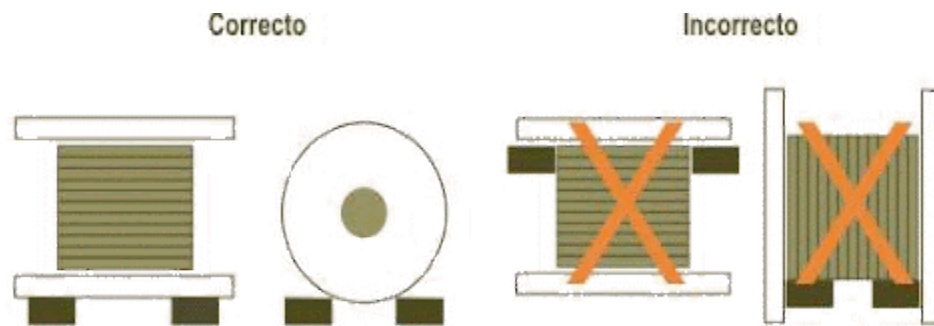


Ilustración 22. Errores de izaje para la manipulación de bobinas.

Por eso no debemos de correr riesgos. Debemos asegurar el almacenamiento y el transporte de las bobinas con los consejos y puntos anteriormente mencionados. Planteamos esos problemas siendo bastante críticos para ofrecer una respuesta positiva y soluciones concisas, para así poder ofrecer una excelente alternativa que resuelva los problemas en entornos industriales que lo requieran. Así que el objetivo es claramente facilitar a los operadores el manejo de piezas y evitar accidentes, dando soluciones de:

- Aprovechamiento óptimo del espacio
- Transporte cuidadoso del material
- Elevada seguridad
- La mejor eficiencia
- Respetuoso con los recursos

Esta última aparte del mejor el aprovechamiento del espacio, la tecnología de la pinza también suma puntos en el consumo de la energía: La energía recuperada en los procesos de descenso se retroalimenta a la red eléctrica interna y así lograra reducir el consumo y los gastos de explotación de la instalación.

10.3. ¿Cómo se espera que funcione el mecanismo?

La salida de este mecanismo es su pinza de apriete exterior y su barra cilíndrica de apriete interior, durante la primera y segunda etapa respectivamente, ambas en traslación pura durante la operación y diseñadas para conseguir la sujeción firme y el traslado seguro de las bobinas cuando éstas quedan atenazadas contra la pinza exterior y contra la barra cilíndrica interior del eslabonamiento. El elemento de entrada del mecanismo es una especie de “patín corredera imaginaria” en traslación pura vertical que es accionado por la grúa puente, de la planta de laminación en frío de SIDOR, que se traslada sobre un bastidor también imaginario.

La tenaza puede plegarse y desplegar. Se pliega para posicionarse sobre la bobina y para poder moverla sin carga y con seguridad de un lugar a otro. Se despliega para sujetar firmemente la bobina y trasladarla al lugar correspondiente en la planta.

Para hacerla trabajar, el operador del puente grúa levanta la tenaza, allí donde ésta esté y la posiciona a una distancia de 50 a 100 mm por encima de la superficie plana superior de la bobina, cuyo eje de agujero debe estar siempre en posición vertical, luego procede a bajarla lentamente tratando de que el eje de su barra cilíndrica de apriete interior macho quede centrado sobre el eje hueco hembra del rollo de bobina. A continuación, cuando ya la tenaza reposa sobre la superficie plana superior de la bobina, el operario levanta la pinza alrededor de 30 cm. Este movimiento destraba el pasador de seguridad de la tenaza, el cual impide por seguridad que la tenaza pueda mover sus partes unas respecto a las otras mientras es trasladada sin carga de un lugar a otro. El mecanismo automático que traba y destraba al pasador será objeto de estudio de otro trabajo, no de éste.

Ahora, ya destrabado el pasador y posicionada la pinza sobre la bobina, el operador baja con lentitud la tenaza hasta que ésta repose nuevamente sobre la superficie superior plana de la bobina, e inicia el ascenso de ésta con una velocidad muy baja (0,1m/s). El movimiento de ascenso mueve horizontalmente, primero, la tenaza de apriete exterior hasta que ésta entra en contacto con la superficie externa de la bobina y luego mueve la barra cilíndrica de apriete interior macho. Ambos elementos tienen sentidos opuestos de movimiento para garantizar el completo apriete de la bobina. La bobina queda sujeta entre la cara externa de contacto de la tenaza de apriete exterior y la cara externa de contacto de la barra cilíndrica de apriete interior macho, lo que garantiza un buen agarre de la bobina, indispensable para evitar accidentes una vez que la bobina esté en el aire siendo trasladada.

Finalmente, el operador procede a trasladar la bobina al lugar de destino en donde, una vez puesta en tierra, es nuevamente izado unos 30cm con el fin de volver a trabar la pinza y regresarla vacía a un nuevo lugar para buscar una nueva bobina.¹⁵

11. Hipótesis

De los puntos mencionados en el planteamiento del problema, el más importante en lo que respecta al por que es necesario contar con una pinza cargabobinas y maniobrar de manera correcta las piezas, puesto que nada será más importante que la salud. Sin embargo, hay muchas más cosas que no podemos pasar por largo, como lo serian:

El planteamiento de las ecuaciones cinemáticas en el campo de las posiciones permitirá graficar las curvas que muestran los ángulos de salida variables de los eslabones, en función de la coordenada de entrada y estas gráficas deben corresponderse con las obtenidas a través de un programa de diseño mecánico asistido por computadora.

IMÁGENES PARTE DEL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

11.1. *Cuidado de la pieza.*

- Pensaríamos que por ser una pieza de gran dimensión y tamaño no sería “delicada”, pero no es así. Las empresas dedicadas a realizar piezas, lo hacen bajo una exactitud y un margen de error el cual será expresado en milésimas por muy grande que sea la pieza. Imaginemos que, por un mal manejo o transporte de la pieza, esta llegara a sufrir algún daño. Estaríamos comprometiendo el margen de error que tenemos de tolerancia y si nos excedemos demasiado, hemos perdido la pieza prácticamente. Evitemos eso, guardémosla y transportémosla de una manera segura y responsable,

¹⁵ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Caraballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

atrancada como se observa en la siguiente imagen, evitando comprometer la pieza, cosas que se encuentren cerca de ella o pérdidas humanas.



Imagen 1. Forma correcta de colocar una bobina horizontal

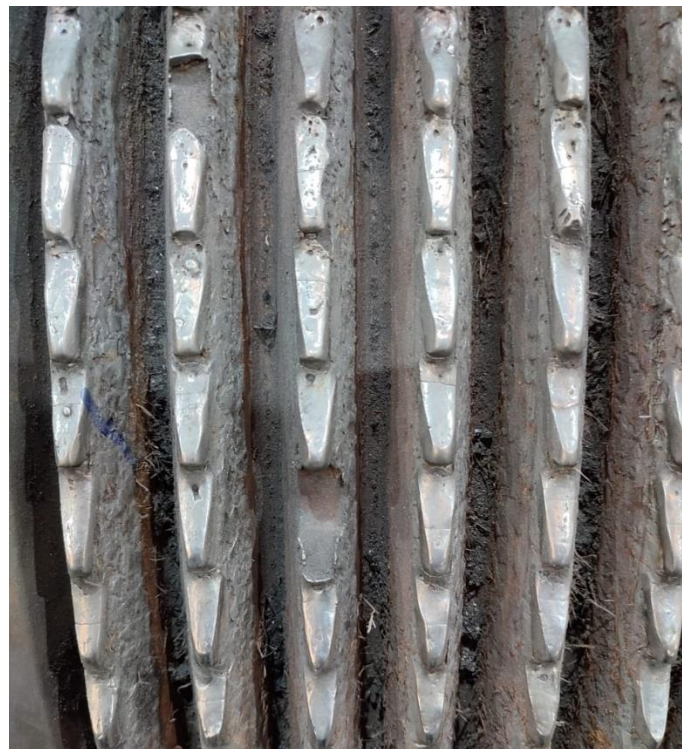


Imagen 2. Daños que sufrió una pieza por una incorrecta manipulación



Imagen 3. Deterioros a causa de un mal almacenaje



Imagen 4. Desperfecto provocado por un mal transporte

11.2. Comodidad

- Algo indispensable que busca cualquier operador es este punto. Todos preferirían realizar maniobras con una pinza a comparación del método convencional, más aún sabiendo el sin número de ventajas que tiene este sistema. Evitaríamos que los operadores tengan que cargar cadenas o estrobos, que además de ser menos seguros no son para nada fáciles de colocar o transportar. A diferencia de solo colocar la pinza encima de la bobina y llevarla a donde ser requerida.



Imagen 5. Transporte de bobinas con la ayuda de cadenas



Imagen 6. Traslado de mazas con el apoyo de cables o estrobos

11.3. Versatilidad

- Por si fuera poco, con este sistema puedes tomar las piezas ya sea, vertical u horizontalmente, (centrando bien la carga). Esto es una de las mayores ventajas, con la pinza cargabobinas no solo podrás transportar bobinas, podrás desplazar un sinfín de piezas o ensamblajes.



Imagen 7. Maza terminada para molinos azucareros que muestra posibles puntos de anclaje



Imagen 8. Entornos en los que se debe manipular una bobina o maza dentro de la industria

11.4. Tiempo

- No hace falta entrar en detalle, la prioridad de una empresa siempre será su producción. Si tú puedes optimizar su tiempo, eso será bien agradecido. No

necesitas más que llevar la grúa al punto donde este la pieza, colocar la pinza encima, posteriormente subir la grúa. Economizamos grandes tiempos mal invertimos utilizando métodos convencionales.



Imagen 9. Correcto apilamiento de mazas, con la finalidad de ahorrar tiempo

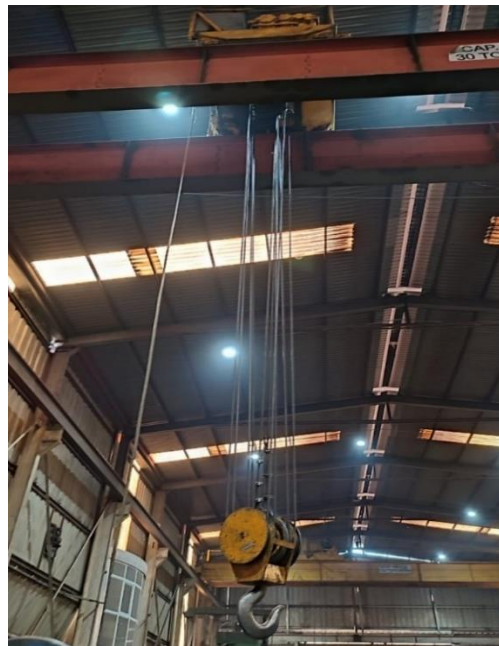


Imagen 10. Grúa con la cual debe ser manipulada la pinza cargabobinas

11.5. Mejor manejo de la carga

- Para muchos operadores este es el punto más crítico. No es nada fácil maniobrar con una pieza de varias toneladas suspendida en el aire, mientras manejas el control y estas al pendiente de lo que pasa a tus alrededores. Al reducir al mínimo el centro de gravedad de la pieza, gracias a que será paralelo al de la grúa, evitaremos que la pieza sea mucho más estable y por ende mucho más fácil de maniobrar.



Imagen 11. Transporte de una maza utilizando dos grúas

Aterrizando y simplificando todo lo anteriormente mencionado podemos concluir que esta pinza cargabobinas hará el trabajo más ameno a los operadores, gracias a su fácil manejo y versatilidad. No dejando atrás que las industrias ahorraran mucho tiempo en transporte de

las piezas; en este caso bobinas o masas, por lo que podemos traducir en más ganancias en cuanto a la empresa hablamos.

12. Antecedentes

Sabemos que las pinzas cargabobinas son utilizadas en la industria del aluminio y del acero para mover cargas de un lugar a otro; son de origen extranjero y las analizaremos en el campo de las posiciones para conocer cómo operan y si así se desea poder diseñar nuestra propia tenaza. Por eso es importante saber y entender su principio de funcionamiento, (aplicar el proceso de ingeniería inversa) generando su análisis y estudiar lo que ya está hecho.

Hay empresas nacionales y transnacionales dedicadas específicamente a diseñar y construir este tipo de pinzas gracias a su gran demanda, como lo son:

12.1. *¿A qué se dedica DEDINI?*



Es una empresa líder en la industria del acero en Brasil, no obstante, creciendo en gran medida a nivel internacional, gracias a que están altamente integrados en la cadena de valor. Sus actividades abarcan diversos segmentos industriales de infraestructura e insumos básicos, energía y alimentos, se destaca como líder mundial en el suministro de equipos y plantas completas para el sector de azúcar y alcohol. Desde la extracción de mineral de hierro, en minas propias, siguiendo con la fabricación de acero y la elaboración de productos de alto valor agregado para los mercados más exigentes, concluyendo con la distribución.

Se enfocan en el ambiente, los clientes, los proveedores y las comunidades donde operan porque su vocación industrial va más allá de gestionar un negocio.

Surtiendo a diversos sectores industriales, ofrecen entre muchas otras cosas:

Mazas DEDINI fundidas en coquillas

- Capa con estructura uniforme en toda la longitud de la maza;
- Mejor acabado superficial;
- Larga vida a los frisos, un menor desgaste y una menor incidencia de roturas;

- Mejor soldabilidad y una mayor retención de soldadura;¹⁶

12.2. ¿Quién es Frymsa?

La empresa de Fabricación Reconstrucción y Metalizados (Frymsa), inicia sus operaciones en diciembre de 1988. Atendiendo principalmente a los siguientes sectores industriales:

- Industria Azucarera
- Industria Siderúrgica
- Industria Cementera
- Industria Papelera
- Industria Maderera
- Industria Química
- Industria Petrolera



12.2.1. Ahora bien, ¿Por qué ellos?

Esta empresa al estar asociada con DEDINI tiene un gran respaldo y trabaja con diversos tipos de aceros para las piezas que fabrican, en la ilustración 23 están especificadas las propiedades de los materiales más utilizados, como lo son el:

- Hierro fundido gris
- Hierro fundido Nodular
- Acero

¹⁶ Información contenida de la página de internet de: <https://es.b2brazil.com/hotsite/dedini>

	Fundido gris	Fundido Nodular	Acero
LR	22,5 Kgf/mm ²	57,0 Kgf/mm ²	52,0 Kgf/mm ²
LE	-	38,0 Kgf/mm ²	28,0 Kgf/mm ²
Alongamiento	-	3%	22%
Dureza	190-260 HB	190-270 HB	140-180 HB

Ilustración 23. Especificaciones de los materiales utilizados

Especializados principalmente en la industria azucarera, manejan unas “camisas” que seguidamente pasaran a ser mazas para los molinos de los ingenios azucareros. Es indispensable para ellos manipular y trasladar sus piezas con alta seguridad, precisión y fiabilidad, debido a que las piezas son sumamente pesadas, estas oscilan entre 5.6 y 16.9 toneladas, por lo que entre otras cosas necesitan manipularlas con grúas para su traslado. Sin embargo, hay aditamentos que complementan a la grúa para cumplir con sus necesidades y maniobrarlas principalmente con seguridad.



Imagen 12. Proceso de fabricación de las mazas para los ingenios azucareros

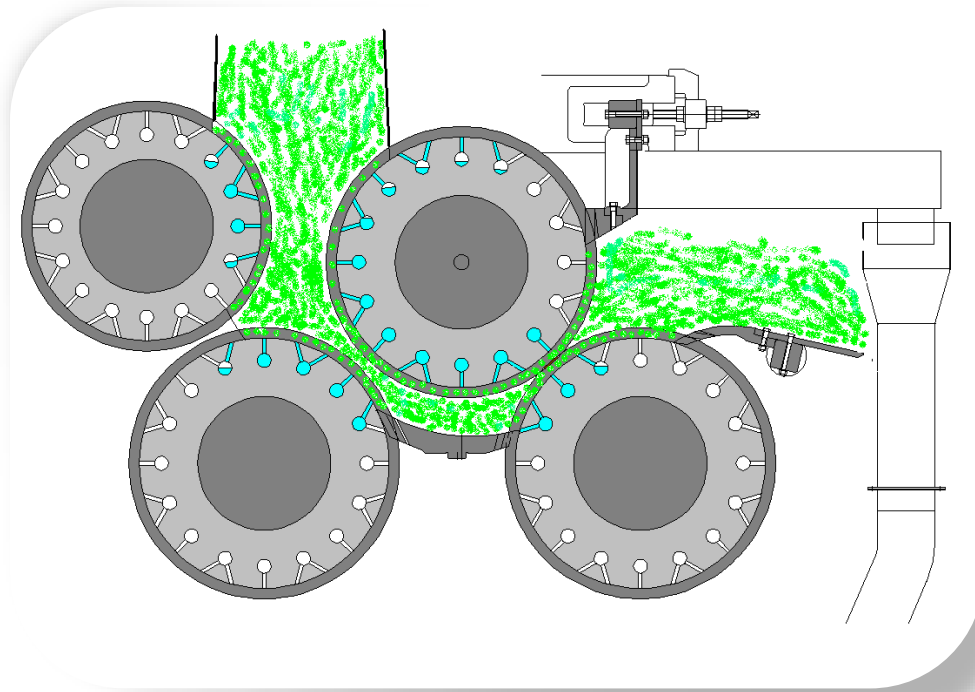


Ilustración 24. Molinos de los ingenios azucareros utilizados para la extracción de azúcar

Como se puede observar en las siguientes imágenes, todos son dibujos de casos reales que utilizan las mazas en los azucareros, como lo es la ilustración 24 que nos muestra como extraen la azúcar los ingenios azucareros mediante las mazas azucareras. Nos servirá como referencia para poder sacar nuestras medidas a las que queremos que abran nuestras pinzas y así poder sujetar las camisas, aparte de que cuentan con información muy detallada de todas las demás medidas que maneja detallado en el dibujo técnico de la ilustración 25.¹⁷

¹⁷ Información e imágenes obtenidas de la página de: <http://www.frymsa.mx/>

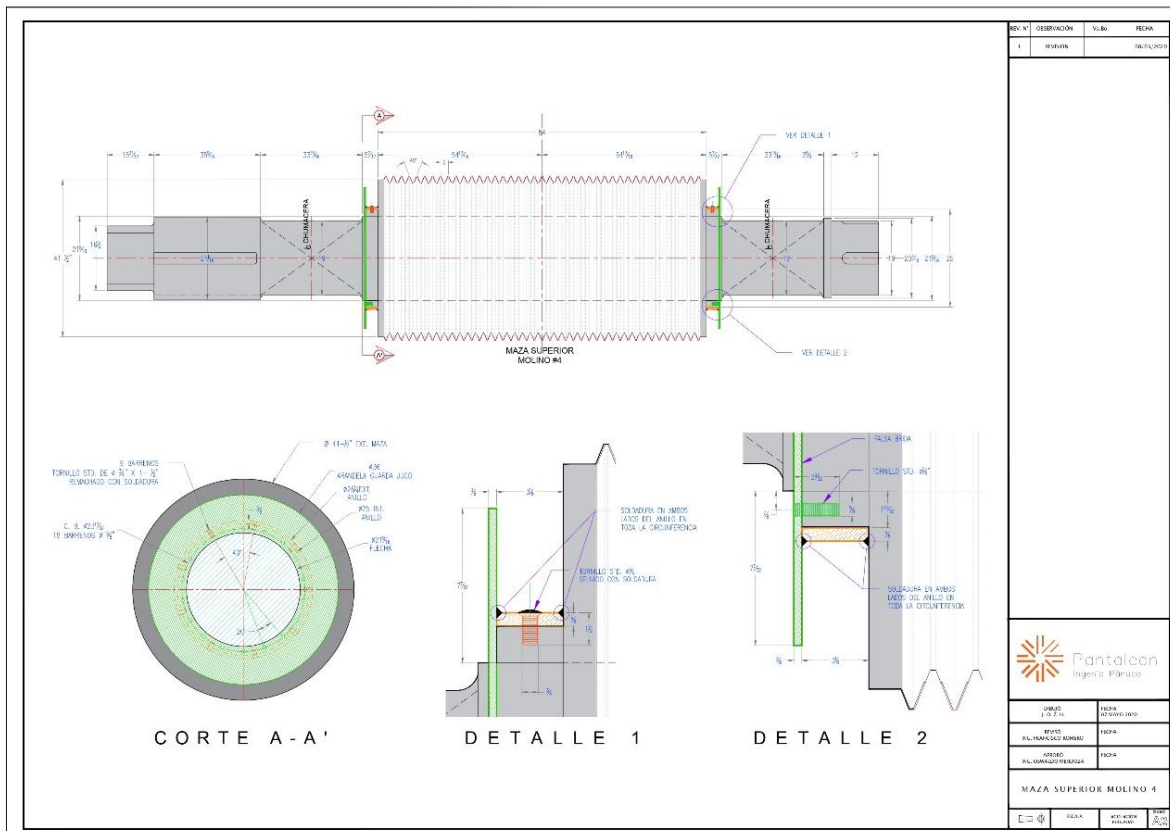


Ilustración 25. Plano o dibujo técnico en el cual se pueden apreciar todas las medidas de la maza

Teniendo esta información, contamos con bastantes fundamentos y un punto de partida para empezar a desarrollar nuestro proyecto.

En este caso analizaremos la pinza para bobinas verticales, diseñada para manejar bobinas en dicha posición.

La robusta ingeniería de las pinzas permite su aplicación en las difíciles condiciones que prevalecen en las acerías e industria del aluminio.

El operador de la grúa controla todo el proceso de elevación desde la cabina de la grúa colocando la pinza sobre el centro de la bobina. Los brazos se cierran automáticamente al entrar en contacto con la bobina.

El dispositivo de suspensión de la pinza está diseñado para ser colgado de los ganchos estándares de grúas. Este dispositivo es fijado con pernos.

Se hace referencia a qué la información presentada fue meramente adjuntada con el propósito de darnos una mejor idea en cuanto a las dimensiones y diámetros con. Sin embargo, no olvidemos la idea principal del proyecto que es desplazar una maza, pero verticalmente.

13. Marco teórico

Para el desarrollo e implementación del estudio es indispensable tomar en cuenta ciertos parámetros, principalmente de medidas.

La movilidad se calcula utilizando la modificación de Kutzbach de la ecuación de Gruebler.

Se usaron las ecuaciones de restricción cinemática de movimiento del mecanismo en el campo de las posiciones para conocer en todo momento la ubicación de los elementos del eslabonamiento en función de la entrada correspondiente a cada una de las dos etapas de trabajo del dispositivo.

El concepto de grado de libertad (GDL) es fundamental tanto para la síntesis como para el análisis de mecanismos. Es necesario ser capaz de determinar rápidamente el GDL de cualquier conjunto de eslabones o juntas que pueda ser sugerido como solución a un problema. Por eso para nosotros será de suma importancia hacer énfasis en estos dos puntos.

1. Definir la posición y el desplazamiento de un punto.
2. Determinar gráfica y analíticamente la posición de todos los eslabones del mecanismo de la pinza cargabobinas a medida que los eslabones actúan y se desplazan.¹⁸

13.1. *La posición*

La posición se refiere a la localización de un objeto. Posición de un punto. La posición de un punto en un mecanismo es la localización espacial de ese punto y puede ser definido a través de un vector posición \mathbf{R} , desde un origen o referencia hasta la localización del punto. En el caso de una posición planar o bidimensional de un punto (vea punto P en la figura anterior) basta con especificar la distancia desde el origen (magnitud) y el ángulo desde el eje de referencia (dirección). También se podría identificar su posición a través de las componentes rectangulares (R^x_p , R^y_p) del vector posición en un sistema de referencia coordinado, en la ilustración 26 se detalla una formula deducida de la posición angular de un eslabón.

¹⁸ Información obtenida del trabajo del: Ing. Arturo Castillo Ramírez.
Cinemática de las máquinas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de ingeniería

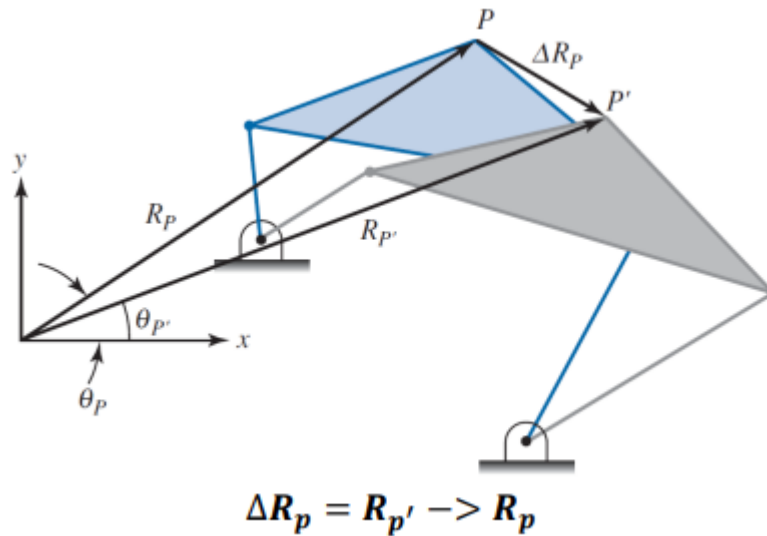


Ilustración 26. Posición angular de un eslabón

13.2. Desplazamiento lineal

Observe que el sentido del vector desplazamiento va de la posición inicial a la posición final. Desplazamiento angular El desplazamiento angular ($\Delta\theta$ en la siguiente figura) es la distancia entre la posición angular inicial y final de un eslabón rotatorio.

Y a pesar de que posee una magnitud (dada en grados, radianes, o revoluciones) y dirección (a favor o contra el reloj), el desplazamiento angular realmente no es un vector ya que no cumple con las leyes conmutativas y asociativas de la adición de vectores, como se muestra en la ilustración 27 el desplazamiento lineal de un mecanismo.

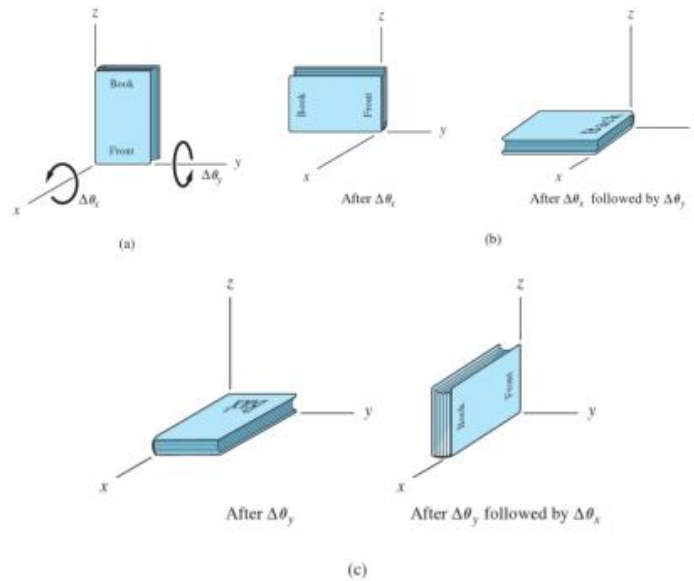


Ilustración 27. Desplazamiento lineal del mecanismo

El desplazamiento angular es el cambio o variación en la posición angular que experimenta un objeto en rotación, medido por lo general en radianes o cualquier otra medida dada para los giros, tales como los grados o las revoluciones.

Cuando un objeto gira alrededor de un eje fijo, su desplazamiento angular se determina midiendo el ángulo barrido por una línea que pasa por cualquier punto del cuerpo interceptando al eje de rotación, es decir, una línea radial, representado en la ilustración 28

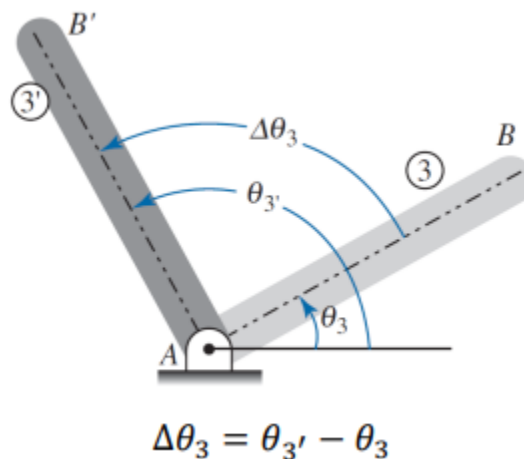


Ilustración 28. Desplazamiento angular de un mecanismo

13.3. Análisis de posición y desplazamiento.

Una investigación cinemática común, en el caso de los mecanismos, consiste en localizar la posición de todos los eslabones en el mecanismo a medida que el o los eslabone sobre los que influyen directamente los actuadores son desplazados. El mecanismo anterior, es de cuatro barras y tiene un grado de libertad. Un análisis de desplazamiento típico para el consistiría en determinar la posición de los eslabones 3 y 4 a medida que el eslabón 2 se mueve a un desplazamiento específico. Ha de comentarse que prácticamente todos los eslabonamientos presentan dos configuraciones alternantes para una determina posición de el o los mecanismos que son actuados, en la ilustración 29 se muestra el posicionamiento de los eslabones constituyentes a una configuración de un mecanismo. Estas configuraciones alternantes son llamadas inversiones geométricas.

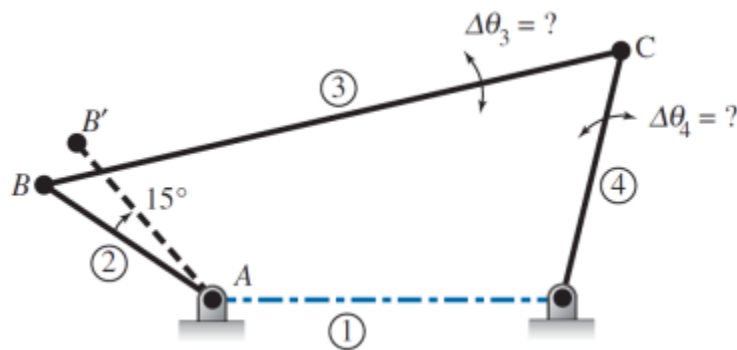


Ilustración 29. Las posiciones de todos los eslabones que constituyen la configuración del mecanismo.

13.4. Análisis gráfico de posición y desplazamiento.

Para el caso de la posición y desplazamiento de un solo eslabón que es accionado, concluimos que este proceso puede efectuarse al recolocar una sola línea del eslabón, y a partir de esta, el resto de la geometría que describe ese eslabón puede reconstruirse mostrado en la ilustración 30.

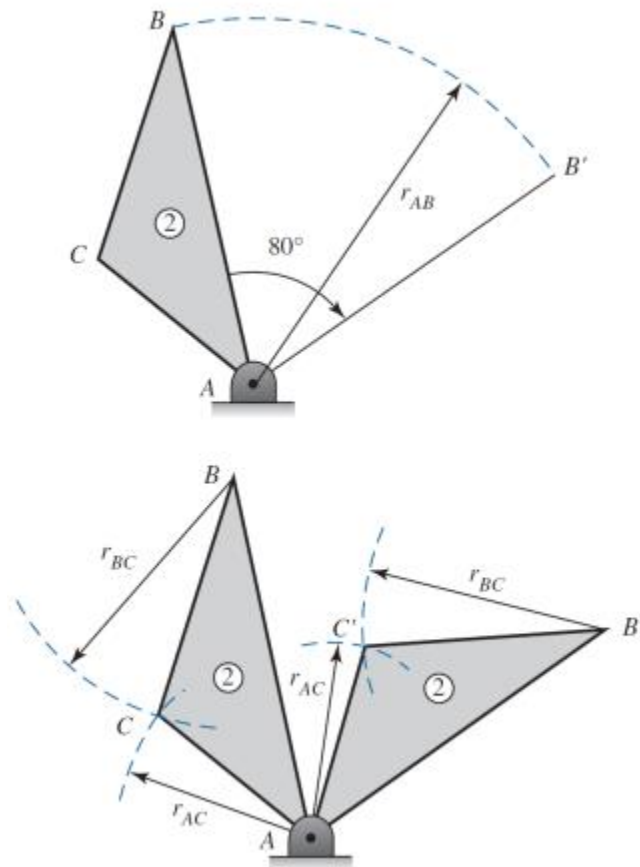


Ilustración 30. Posición y desplazamiento de un solo eslabón

13.5. Posición y desplazamiento del resto de los eslabones dependientes.

Una vez que el eslabón accionado es re posicionado, la posición del resto de los eslabones dependientes debe ser determinada. Para lograr esto, los posibles recorridos de todos los eslabones que están conectados al marco deben ser construidos. En el caso de aquellos eslabones pivotados al marco, todos los puntos en el eslabón solo pueden rotar relativos al marco, y consecuentemente los posibles recorridos de dichos puntos son arcos circulares centrados en el pivote que los conecta al marco. En el caso del recorrido de un punto en un eslabón que está conectado al marco por medio de una junta deslizante, debe tenerse en cuenta que todos los puntos en este eslabón se mueven en una línea recta paralela a la dirección de la superficie deslizante observándolo a continuación en la ilustración 31.

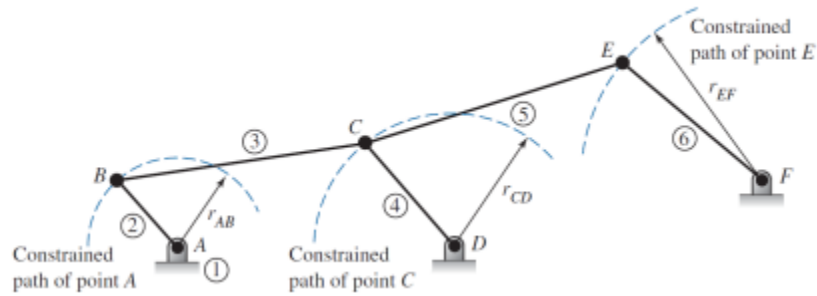


Ilustración 31. Posición y desplazamiento del resto de los eslabones

Por último, una vez construidos los recorridos de todos los eslabones unidos al marco, la posición de los eslabones que los conectan puede ser determinada a partir del hecho de que todos los eslabones son rígidos y que su longitud y forma no cambia durante el movimiento, representado en la ilustración 32.

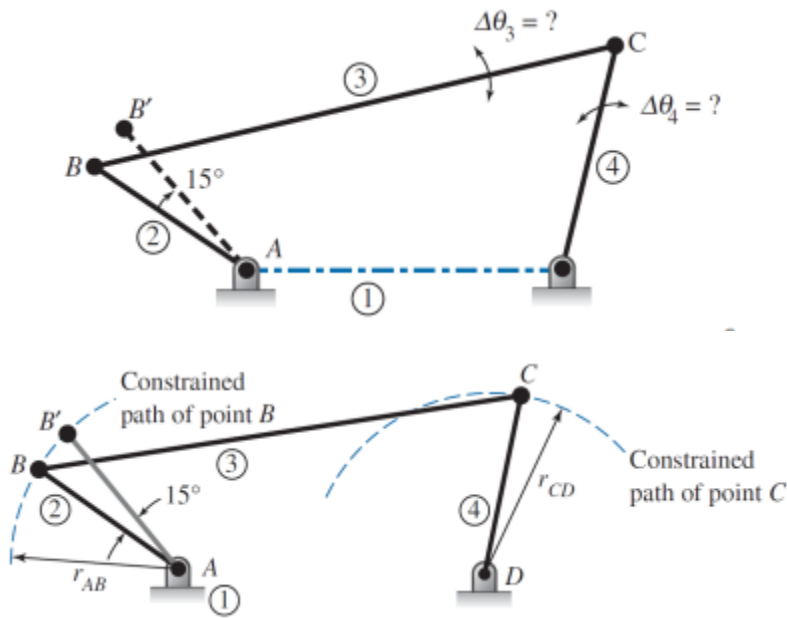


Ilustración 32. Recorrido de todos los eslabones unidos

Tenga presente que para este mismo desplazamiento angular de eslabón accionado (eslabón 2) puede existir una inversión geométrica, como se detalla en la ilustración 33.¹⁹

¹⁹ Información obtenida del archivo de: Análisis de posición y desplazamiento

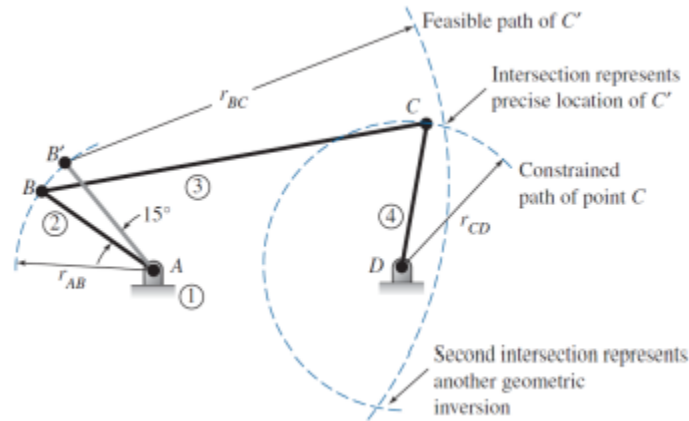


Ilustración 33. Posible inversión geométrica causada por el desplazamiento angular

13.6. Detalles sobre el funcionamiento

En la pinza cargabobinas dentro de sus 11 eslabones podremos observar que su geometría es tipo espejo en algunos casos (mismas medias del lado contrario). Un ejemplo podría ser el eslabón 3 y 4. Cuentan con la misma longitud, lo mismo para el eslabón 9 y 10. Cabe destacar que hay otras medidas que hacen que la pinza sea simétrica para todos los casos, como por ejemplo la distancia entre 11, 18 y el punto DG son idénticas. Mismo caso para el punto QG y la distancia 111.

Un caso muy particular sucede con el eslabón 5 y 6, estos aparentemente son idénticos, sin embargo, no es así. Ambas distancias que parten de la horizontal (eslabón 1 y 11) son de 450 mm, la distancia entre punto inicial y final es de 2500 mm. Estos dos al ser eslabones no lineales como todos los demás tienen ángulos específicos los cuales ya fueron calculados, esto causará que el resto de las medidas entre puntos dejen de ser las mismas.

El eslabón 6 cuenta con un detalle, es el único que tiene 4 nodos, esto genera un único punto (P), el cual va enganchado al eslabón número 8. Este debe de llevar un barreno que dejara de estar en el centro como todos los demás de la pinza. Posteriormente se procederá a calcular este ángulo, con esto tendrá un óptimo comportamiento y podrá cargar el peso simétricamente por ambos lados de la pinza.

Su funcionamiento es muy simple y consiste en enganchar la grúa al punto "A" de la pinza. Al ser elevada este generará movimiento en los eslabones 3 y 4 y estos se encargarán de transferir un desplazamiento angular y lineal al resto del mecanismo.

Es de suma importancia mencionar que en la primera inversión cinemática la pinza activa la mordaza exterior, fijada en el eslabón "11", desplazando la linealmente, la inversión terminará hasta que esta toque el diámetro exterior de la bobina o maza.

Para este caso la pinza contara con un eslabón fijo, es decir, en esta inversión será el número 1. Este no será activado ni sufrirá ningún tipo de alteración en su medida lineal ni angular.

La segunda inversión cinemática comenzará al desplazar la mordaza interior, fijada en el eslabón "1", en un movimiento lineal terminará hasta tocar con el diámetro interior. Concluidas ambas inversiones la pinza tendrá sujeta la bobina y estará lista para alzar y manipular la carga.

Ahora en esta inversión cinemática de igual manera existirá un eslabón fijo, ahora será el número 11. Tampoco será activado ni sufrirá ningún tipo de alteración en su medida lineal ni angular.

La pinza cuenta con un mecanismo que se puede observar su funcionamiento en el vídeo. Este mecanismo le permite a la pinza que por gravedad y su propio peso al estar suspendida no caiga. El mecanismo se encarga de controlar cuando empezar a trabajar en las inversiones, es decir cuando se activarán las mordazas. Se activará cuando el eslabón 1 y 11 de la pinza este tocando la bobina, con esto le indicaremos a la pinza que está lista para empezar a sujetar.

El mecanismo antes mencionado no es estudiado en esta investigación, pero es de importante mencionarlo para explicar al cien por ciento como es que funciona la pinza.

También mencionaremos una distancia "a1" la cual esta expresada como constante, cosa que en la realidad no es cierta. Para lo cual argumentamos que en el análisis fue tomado de esa manera porque no se tomaron en cuenta los pequeños errores de medición cometidos al tomar lectura de las longitudes y ángulos en los eslabones, esto nos lleva a que influya directamente en la precisión del cálculo. Por ello hacemos mención de que existen errores de medición y por ende se verán afectados los cálculos. De esa forma, en el documento al hacer la gráfica de a1, podemos cuantificar cuanto realmente es de diferente la trayectoria real del punto "A" de la trayectoria vertical pura que hemos supuesto como cero. Entonces se analizará en qué porcentaje difieren en "x" de la línea recta vertical supuesta.

En otro apartado mencionamos una distancia "h", esta asume la distancia que hay entre el eslabón 1 y 11, estos eslabones están representados en la figura 1; pero se comprobó que esta no existe, o es igual a cero. Lo que quiere decir que la pinza mantiene estos dos eslabones totalmente horizontales todo el tiempo y ambas inversiones cinemáticas; así podemos deducir que su comportamiento se está realizando de manera eficiente al no tener variación de medidas entre estos dos eslabones.

Como bien mencionamos la pinza cargabobinas cuenta con dos eslabones que permanecen horizontales todo el tiempo (eslabón 1 y 11), a estos se añade un tercero (eslabón 7). Este

juega un papel importante dándole estabilidad no solo a la carga sino a la misma pinza, permanece totalmente paralelo a estos dos eslabones todo el tiempo.

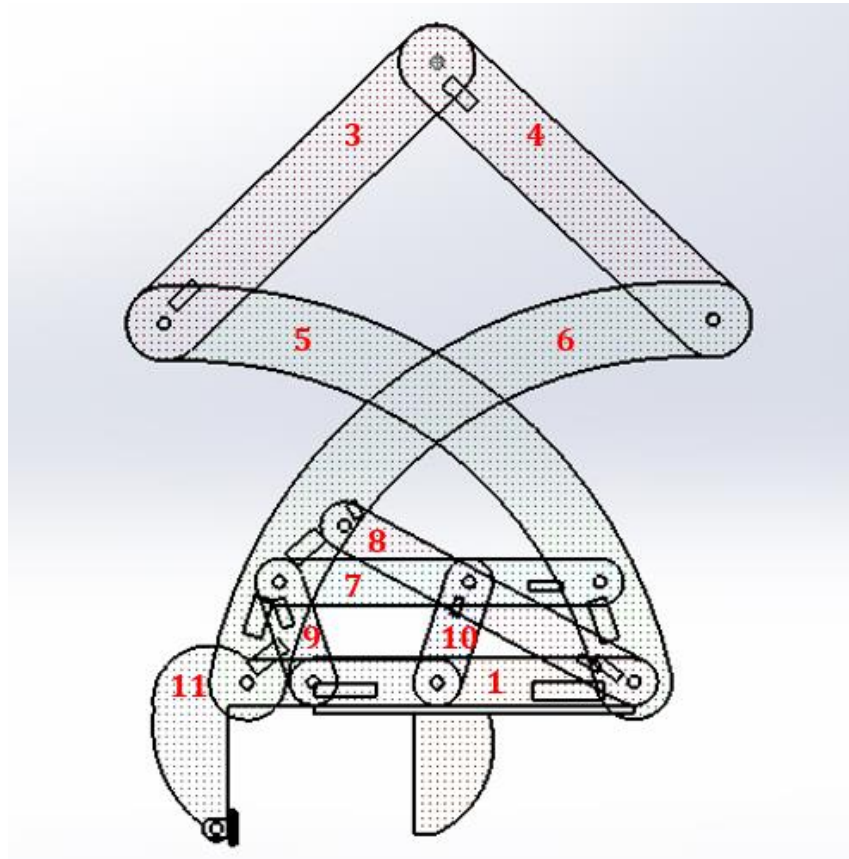


Figura 1. Pinza cargabobinas ensamblada mostrando sus 11 eslabones

13.7. Especificaciones técnicas

13.2.1. Eslabones 1 y 2

Los eslabones 1 y 2 están conformados por dos barras paralelas rígidas entre sí, que dejan un espacio vacío entre caras internas, es decir son barras simétricas de configuración doble. Están articulados por el par rotatorio A.

Alrededor de la articulación A, el eslabón 2 se mueve por el interior del espacio vacío entre caras del eslabón 1, por tanto, el eslabón 1 es más ancho que el 2.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 1 = 300 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 2 = 200 mm

13.7.2. Eslabones 1 y 3

El eslabón 3, articulado en B a 1, también es una barra de configuración doble. Alrededor del par B, el eslabón 3 se mueve por el interior del espacio vacío entre caras del eslabón 1, por tanto, el eslabón 1 también es más ancho que el 3.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 1 = 300 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 3 = 230 mm

Espesor de cada barra doble de 1 = 20 mm

Espesor de cada barra doble de 2 = 20 mm

13.7.3. Eslabones 2, 3 y 4

El eslabón 4, articulado en C a 2, también es una barra de configuración doble. Alrededor del par C, el eslabón 4 se mueve por el interior del espacio vacío entre caras del eslabón 2, por tanto, el eslabón 2 es más ancho que el 4. A su vez, el eslabón 4 se mueve por el interior del espacio vacío entre caras que deja el eslabón 3. Por tanto 4 es menos ancho que 2 y 3 y 2 es menos ancho que 3.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 4 = 135 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 2 = 200 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 3 = 230 mm

Espesor de cada barra doble de 3 = 40 mm

Espesor de cada barra doble de 4 = 40 mm

13.7.4. Eslabón 5

5 es doble e independiente y va por dentro de 7.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 7 = 310 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 5 = 290 mm

Espesor de cada barra doble de 5 = 30 mm

13.7.5. Eslabón 6

El eslabón 6 es simple, no es doble. Tiene una ranura central para permitir la articulación Q entre los eslabones 5 y 8. Va por dentro de 5.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 5 = 290 mm

Espesor u ancho del eslabón 6: 40 mm

13.7.6. Eslabón 7

7 es un eslabón doble e independiente ¿?? y va por fuera de 5.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 7 = 440 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 5 = 290 mm

Espesor de 7 = 30 mm

13.7.7. Eslabón 8

8 es doble *e independiente* y va por dentro de 5 y por fuera de 4.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 8 = 230 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 5 = 290 mm

Ancho entre caras planas externas del eslabón 4 = 135 mm

Espesor de 8 = 30 mm

13.7.8. Eslabón 9

La tenaza 9 es simple, no es doble. Se mueve en S por el interior del espacio vacío del eslabón 4.

Ancho entre caras planas externas del eslabón 4 = 135 mm

Espesor u ancho del eslabón 9: 65 mm

13.7.9. Eslabón 0

Falta especificar si es simple o doble

Ancho entre caras planas externas del eslabón 0 = 310 mm

Espesor de 0 = 40 mm

13.7.10. Diámetros de los trece pasadores de las articulaciones del mecanismo

- $\varnothing A = 85 \text{ mm}$
- $\varnothing B = \varnothing C = 70 \text{ mm}$
- $\varnothing D = 140 \text{ mm}$
- $\varnothing R = \varnothing Q = 125 \text{ mm} = \varnothing G = \varnothing H$
- $\varnothing P = 120 \text{ mm}$ (revisar porque faltó)
- $\varnothing L = \varnothing N = 125 \text{ mm}$
- $\varnothing U = 125 \text{ mm}$
- $\varnothing S = 140 \text{ mm}$

Esta pinza cargabobinas cuenta con un sistema doble, es decir, cuenta con dos caras tipo espejo. Quiere decir que en la parte delantera tanto como la trasera tiene la mismas medidas y formas, como se puede apreciar en figuras posteriores. Esto en una aplicación real le genera a la pinza mayor resistencia y que pueda realizar su función principal que es levantar una maza con mucha mayor fiabilidad.

13.8. Softwares utilizados

En SolidWorks se estudia en análisis de movimientos y desplazamientos ya sean lineales y angulares, aparte de ser el principal software donde se diseñó todo el mecanismo, también de aquí sacamos toda la información angular y pudimos observar su comportamiento. Esta información fue exportada a Excel, ahí se desarrollaron hojas de cálculos que fueron necesarias para diseñar y comprobar las ecuaciones diseñadas.

En Matlab sencillamente lo utilizamos para desarrollar nuestro código de programación y así poder comprobar nuestras ecuaciones. Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware, que en este caso fue Excel para interpretar y representar gráficos de ambos.

Inventor estuvo presente como un software secundario de diseño CAD, no por ello menos importante pudimos realizar el análisis de los diez circuitos cinemáticos, comprobamos medidas y ángulos de entrada para ver qué todo coincidiera con los cálculos y las mediciones arrojadas por SolidWorks.



Ilustración 34. Softwares de CAD para la ingeniería

14. Marco metodológico

Usando la modificación de Kutzbach de la ecuación de Gruebler se obtuvo el valor de la movilidad del mecanismo. La Figura 3 identifica los 13 pares cinemáticos presentes en el eslabonamiento.

El cálculo de la movilidad se efectúa a través de la ecuación (1).

$$M=(L-1)-2j_1-J_2 \quad (1)$$

Dónde:

M= Movilidad

L= Número de eslabones

J1= Número de juntas de un grado de libertad

J2= Número de juntas de dos grados de libertad

La ecuación (2) indica el valor resultante de la movilidad.

$$M=(10-1)-2(13)=1 \quad (2)$$

14.1. Diagrama de vinculaciones cinemático (DVC)

Al igual que con el levantamiento cinemático, debido a la inversión cinemática presente en el mecanismo durante su funcionamiento, es necesario realizar dos grafos de vinculaciones de la tenaza.

La siguiente figura muestra el DVC de la primera etapa de funcionamiento del mecanismo. Del diagrama de vinculaciones del mecanismo indicado en la siguiente figura, se deduce que las tenazas cargabobinas de eje vertical consisten de cuatro ciclos cinemáticos independientes. Para la primera etapa se muestra su diagrama de vinculaciones cinemáticas en la figura 2.

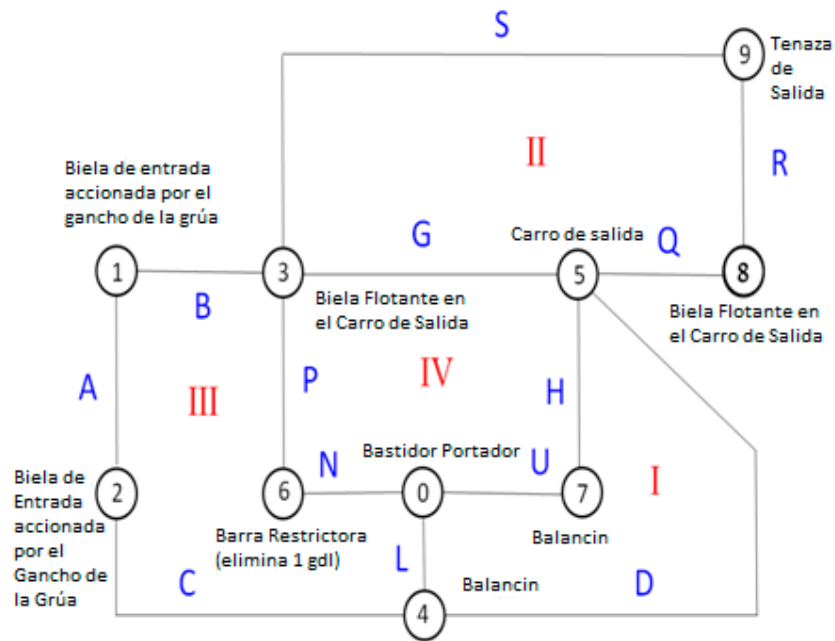


Figura 2. Diagrama de vinculaciones cinemáticas de la primera etapa de operación del eslabonamiento.

Para la segunda etapa, como se muestra a continuación en la figura 3, el diagrama de vinculaciones cinemáticas es muy similar al de la primera.²⁰

²⁰ Información obtenida del trabajo de: José Méndez; Jesús Mendoza y Simón Carballo. Análisis de posiciones de la tenaza carga bobinas hepenstall-europe de 21t de sidor. (agosto2018). Departamento de Ingeniería Mecánica, UNEXPO-Vicerrectorado Puerto Ordaz, Ciudad Guayana, Venezuela

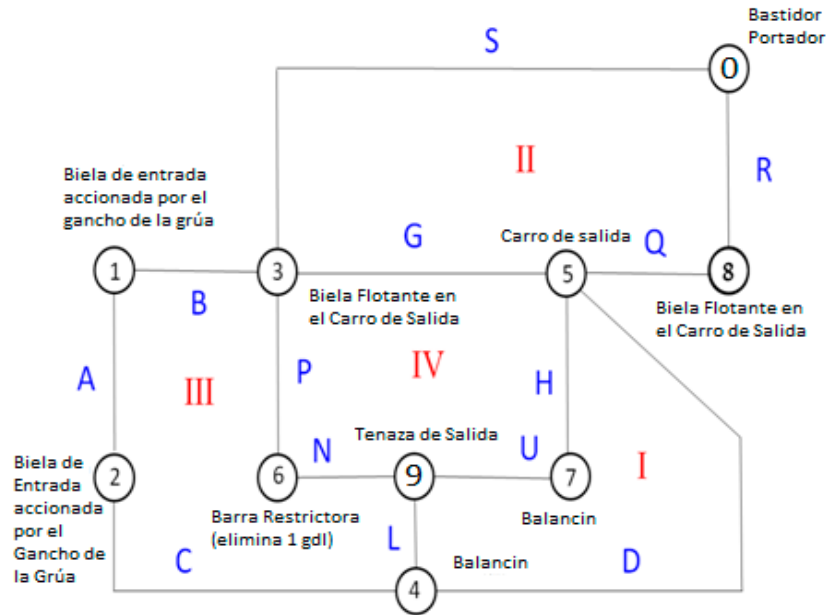


Figura 3. Diagrama de vinculaciones cinemáticas de la segunda etapa de trabajo del eslabonamiento.

14.2. Cinemática en el campo de las posiciones de una pinza cargabobinas

La pinza carga bobinas, cuyo levantamiento cinemático se muestra en la Figura 1, cuenta con trece pares cinemáticos rotatorios de un grado de libertad f_1 , designados como: A, B, C, D, G, H, P, Q, R, S, L, N y U. Además, dispone de diez eslabones constituyentes n , numerados como 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11. En esta secuencia no se ha dispuesto el número 2 para asignarlo posteriormente a un eslabón imaginario, que se introduce en el levantamiento cinemático para facilitar la construcción de un diagrama de vinculaciones cinemáticas. A continuación, en la figura 4 se muestra el esquema cinemático de la pinza cargabobinas sin la barra se izaje, que es el gancho al que se monta en la grúa.

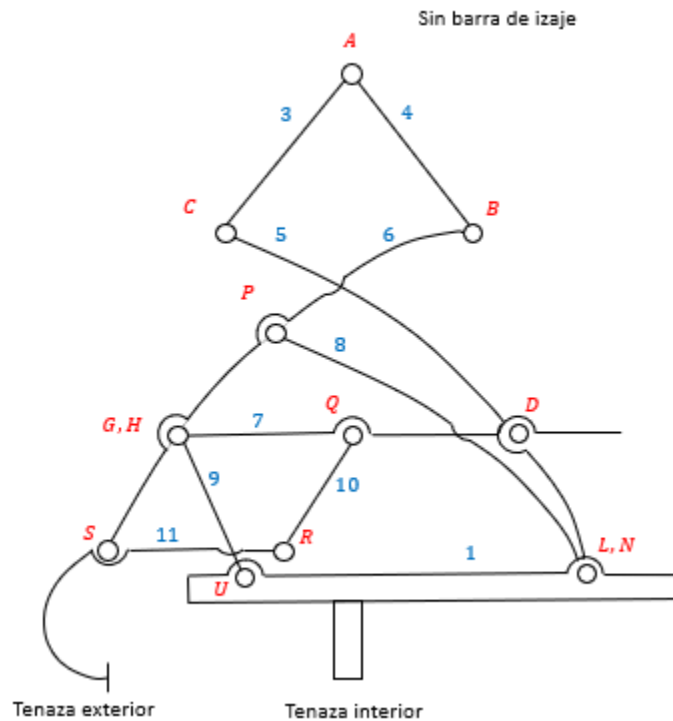


Figura 4. Esquema cinemático de la pinza carga bobinas sin barra de izaje

14.3. Movilidad de la pinza

$$m = 3(n - 1) - 2f_1 \quad (1)$$

Siendo:

m : movilidad del mecanismo

n : número de eslabones del mecanismo ($n = 10$)

f_1 : número de pares cinemáticos de un grado de libertad ($f_1 = 13$ pares rotatorios)

Reemplazando $n = 10$ y $f_1 = 13$ en (1), se obtiene que la movilidad de este mecanismo es $m = 1$, con lo cual es suficiente conocer una sola coordenada generalizada de entrada para resolver su cinemática en el campo de las posiciones. Se asumirá que la altura L_2 de ubicación del par cinemático A respecto a una referencia horizontal en la superficie plana superior de la bobina, será la coordenada generalizada de entrada del mecanismo.

En la figura 5 podemos observar el proceso de ingeniería inversa para deducir la obtención del esquema cinemático, desde la foto de la pinza cargabobinas de Sidor, la simulación en el software de CAD y así poder obtener finalmente el esquema cinemático.

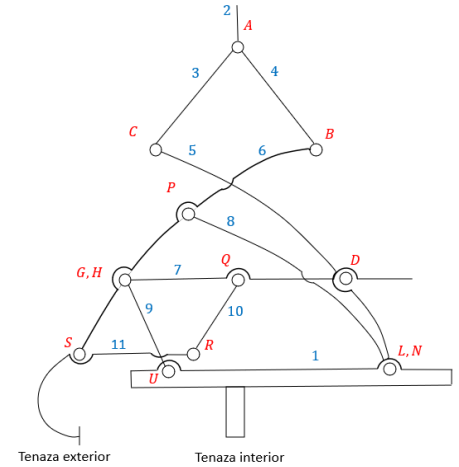
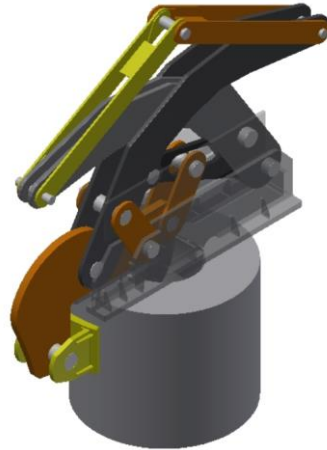


Figura 5. Ingeniería inversa para la obtención de su esquema cinemático

14.4. Funcionamiento de la pinza

La pinza carga bobinas se mueve en un plano vertical y consta de dos tenazas como elementos de salida, numeradas como los eslabones 1 y 11 en la Figura 1a. Estas tenazas no se mueven juntas simultáneamente, sino que se mueve una primera y la otra después. El eslabón 1 es la tenaza interior y el eslabón 11 es la tenaza exterior. En la figura 6 se muestran ambas pinzas (exterior e interior) con la que se sujetara la carga.

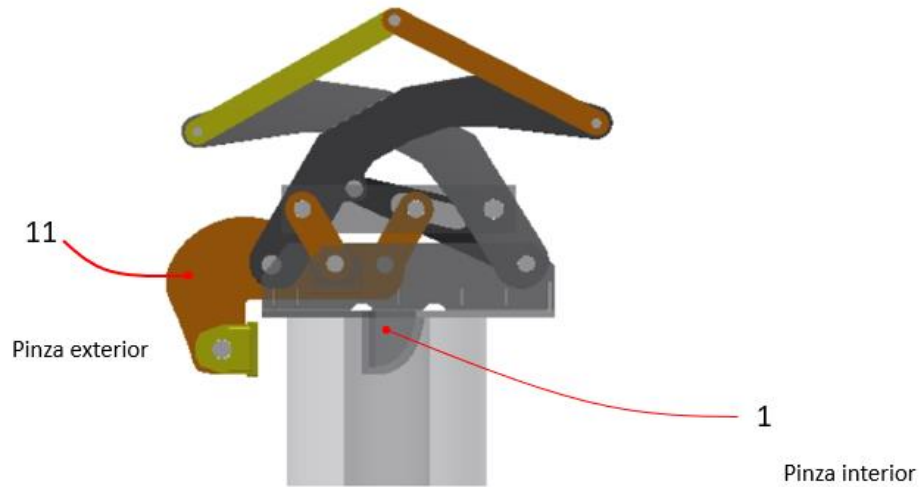


Figura 6. Identificación del movimiento de las pinzas

Para levantar la bobina, se conecta en A el gancho del polipasto de una grúa puente. Sosteniendo en “A” toda la pinza, el operador de la grúa posiciona la barra cilíndrica protuberante de la tenaza interior 1 en el interior del agujero cilíndrico de la bobina a levantar. En esta etapa, la superficie inferior plana del eslabón 1 descansa sobre la superficie superior plana de la bobina, como se muestra en la Figura 7. A continuación, el operador levanta los eslabones 3 y 4 mediante el gancho en el punto A.

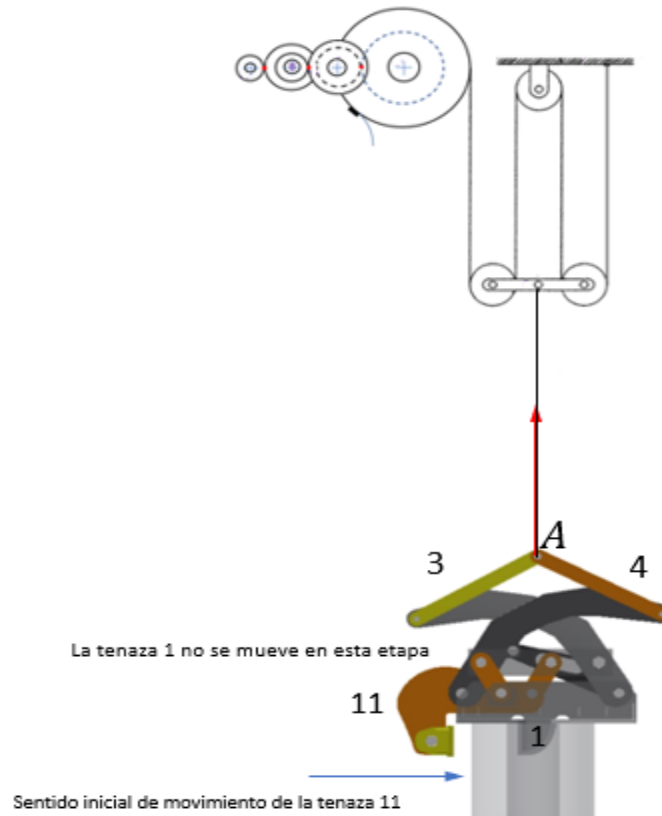


Figura 7. Proceso que se realiza para mover los eslabones 3 y 4

Durante esta fase, la tenaza interior (eslabón 1) permanece detenida, mientras que la tenaza exterior 11 se mueve horizontalmente hacia la derecha hasta topar con la superficie cilíndrica exterior de la bobina, como se indica en la Figura 8. Cuando esto sucede, la tenaza exterior 11 deja de moverse y se convierte ahora en el bastidor del mecanismo y la tenaza interior 1, antes fija, comienza a trasladarse horizontalmente hacia la izquierda, como se indica en la Figura 8 de igual manera.

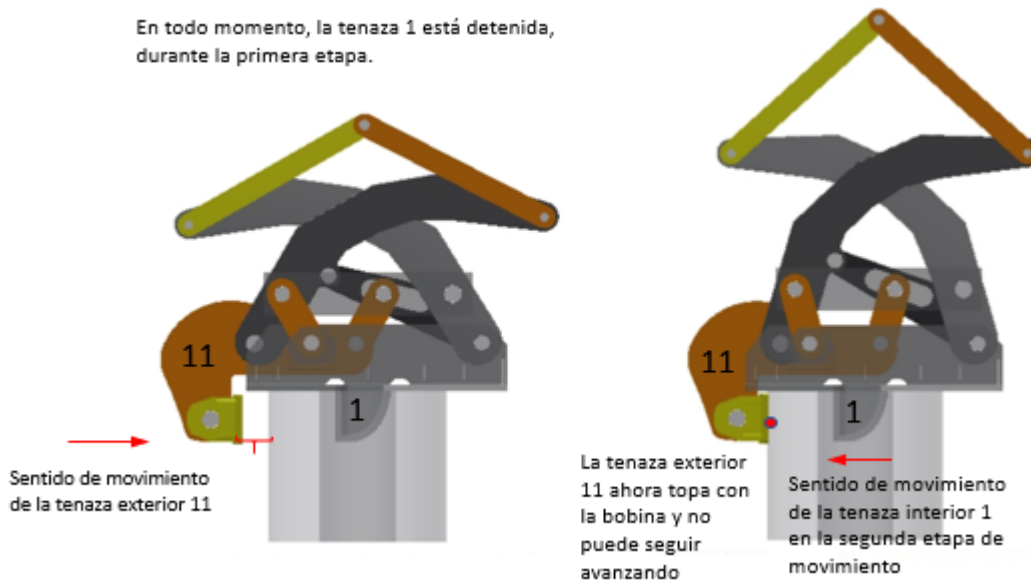


Figura 8. Sentido de movimiento de ambas tenazas (interior y exterior)

Finalmente, cuando la protuberancia cilíndrica interior de la tenaza 1 topa con la superficie cilíndrica interior de la bobina, ambas tenazas ahora detenidas aprietan firmemente la bobina para levantarla con seguridad, como se indica en la Figura 9. Así, este mecanismo, consiste de dos inversiones cinemáticas de una misma cadena cinemática.

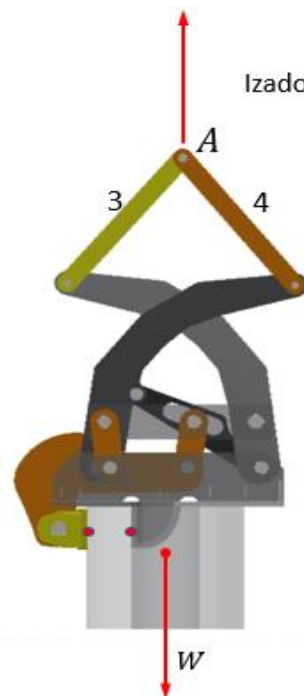


Figura 9. Sujeción de la bobina mediante las dos mordazas

NOTA: Cabe resaltar que en la figura 10 las muescas que se ven presentes en los eslabones no están relacionadas con el diseño o funcionamiento de la pinza, únicamente son usadas para medir de manera precisa los ángulos presentes en todo el documento. Esto como respuesta de que nuestro software utilizado únicamente traza los desplazamientos angulares en función del punto inicial y el final del eslabón.

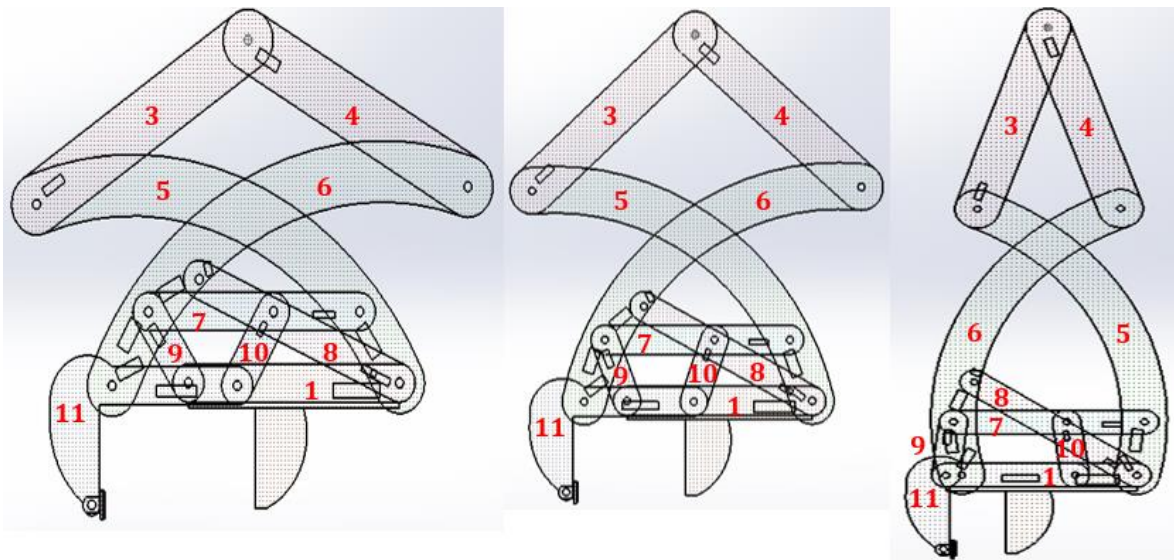
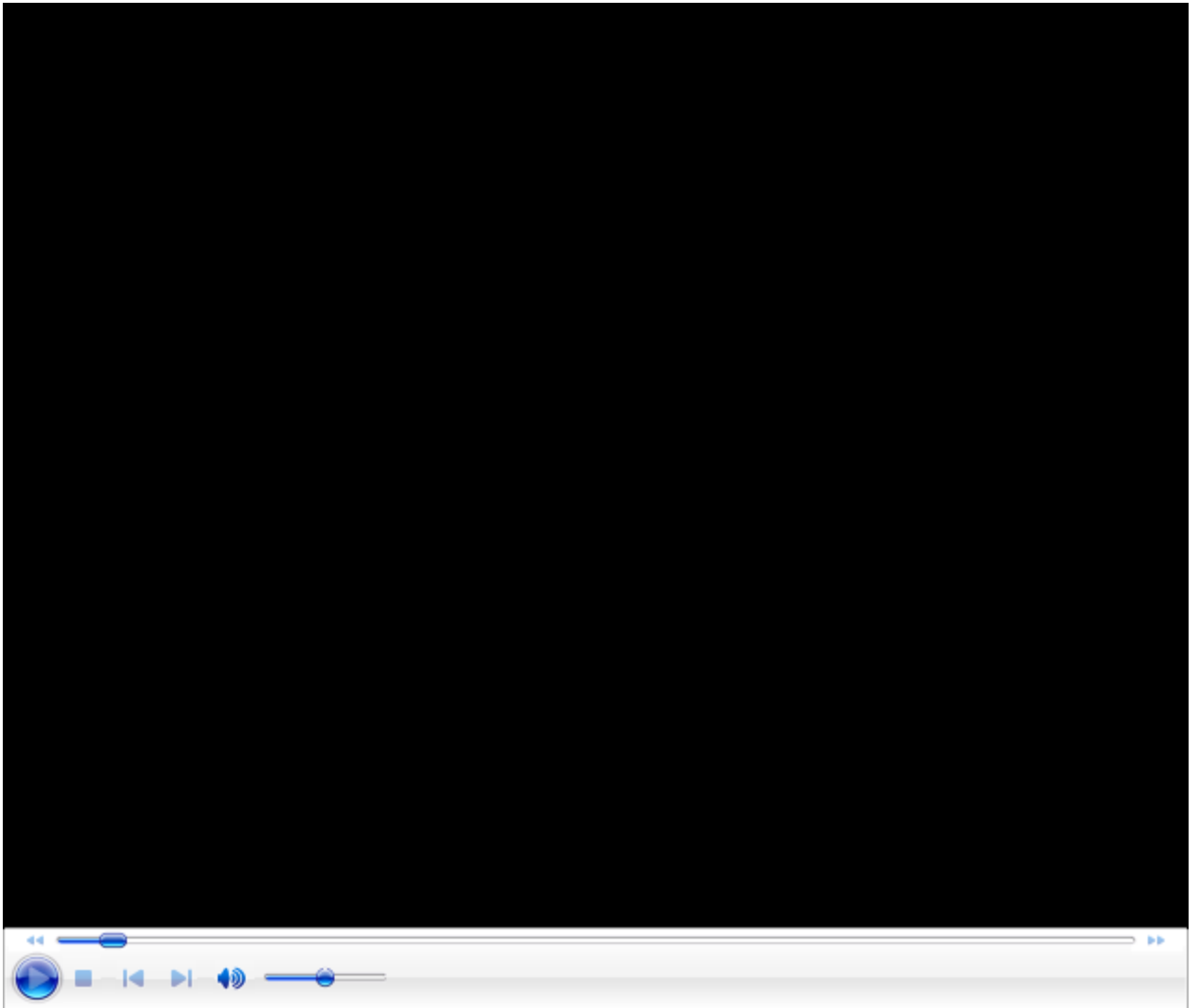


Figura 10. Etapa de movimiento de las dos inversiones cinemáticas



Video 1. Video de la pinza cargabobinas puesta en práctica en la vida real

En este primer video se puede apreciar de mejor manera el mecanismo que permite liberar la pinza. Funciona básicamente con una protuberancia que se encuentra en el eslabón B y es guiada al B, donde se realiza la liberación del mecanismo y así pueda empezar a trabajar. Este mecanismo no es analizado en la presente investigación

Al igual que en la figura 10, en la figura 11 se muestra el movimiento que realizan los eslabones y las tenazas de la pinza, solo que en esta se muestra con su diagrama cinemático. Seguidamente es mostrado el mismo proceso en la figura 12, solo que ahora simulado en el software CAD.

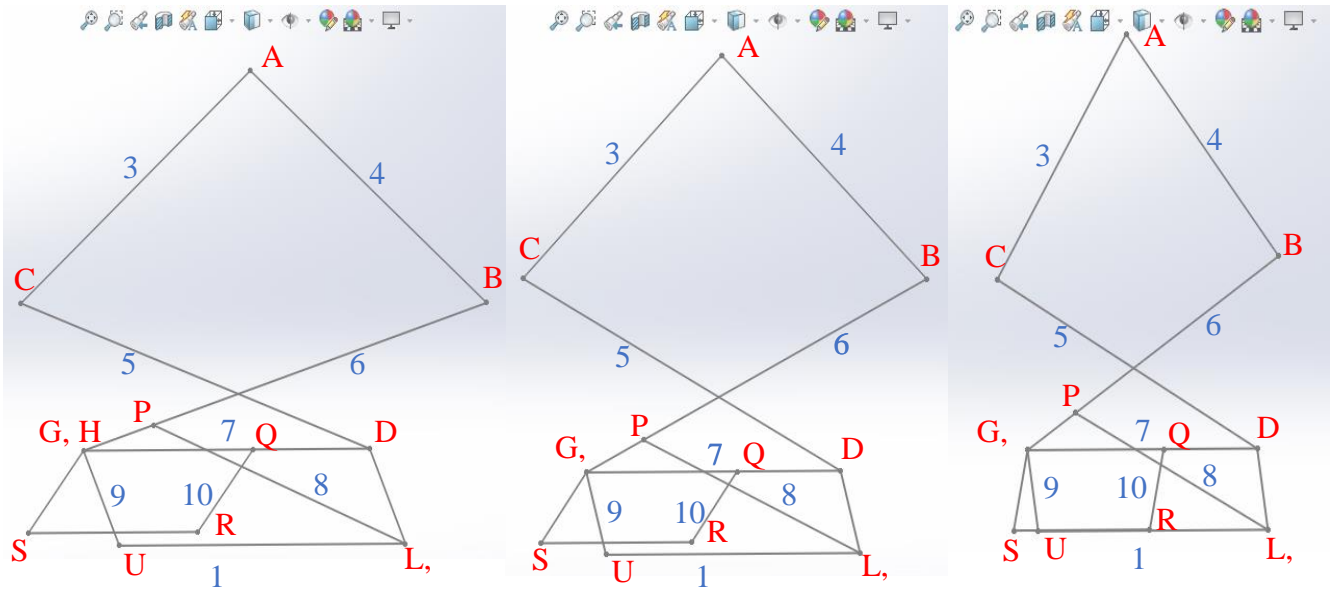


Figura 11. Etapa de movimiento de las dos tenazas en esquema cinemático

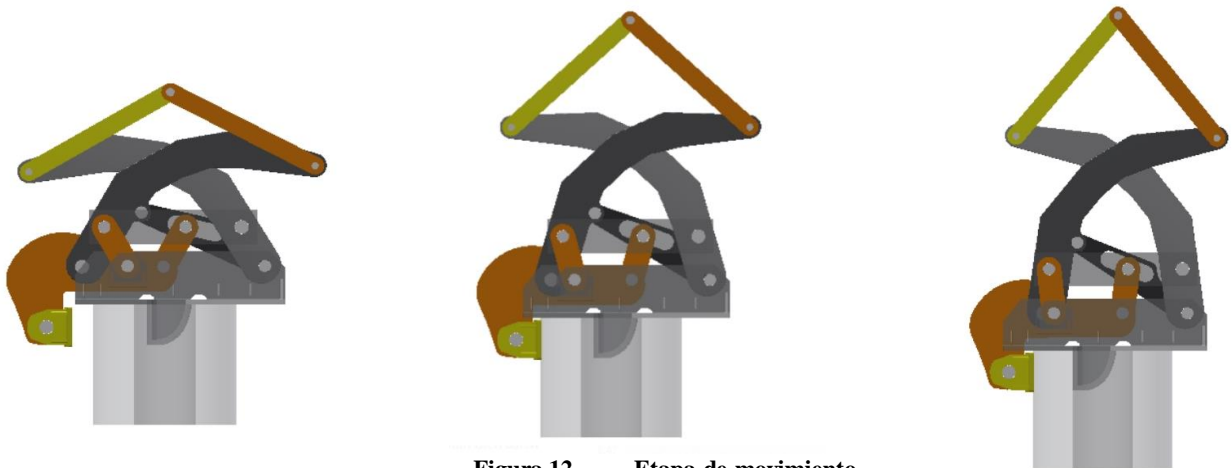


Figura 12. Etapa de movimiento de las dos tenazas

A medida que A sube, la pinza exterior se mueve hacia la derecha hasta topar con la bobina. Al hacerlo, se produce una inversión cinemática, con lo que la tenaza exterior deja

de moverse y la tenaza interior, antes fija, se desplaza hacia la izquierda hasta topar con la superficie interior de la bobina. Representado en la Figura 13.



Figura 13. Sentido de movimiento de la tenaza exterior

Puesto que, en todo momento, en la primera inversión cinemática del mecanismo, el punto A se mueve sobre una línea recta vertical, se introducirá una rueda imaginaria 2, moviéndose en rodadura sobre un camino recto vertical también imaginario, con lo que el esquema cinemático de la Figura 1 se convierte en el de la Figura 14. Se han añadido los pares cinemáticos A' y A'' y se supondrá que las barras 3 y 4 se articulan a esta rueda imaginaria mediante estos dos nuevos pares imaginarios. Al agregar este elemento imaginario y este camino de rodadura imaginario, se aprecian los ciclos cinemáticos más simples que conforman el mecanismo durante la primera inversión cinemática.

Con la introducción del elemento imaginario 2 y de los pares A' (rotatorio) y A'' (puntual), la movilidad $m = 1$ dada en (1), no cambia, como se deriva de (2) y se indica en (3).

$$m = 3(n - 1) - 2f_1 - f_2 \quad (2)$$

Siendo ahora que $n = 11$, $f_1 = 14$ pares rotatorios y $f_2 = 1$ para puntual. Tenemos la movilidad m dada en (3).

$$m = 3(11 - 1) - 2(14) - (1) = 1 \quad (3)$$

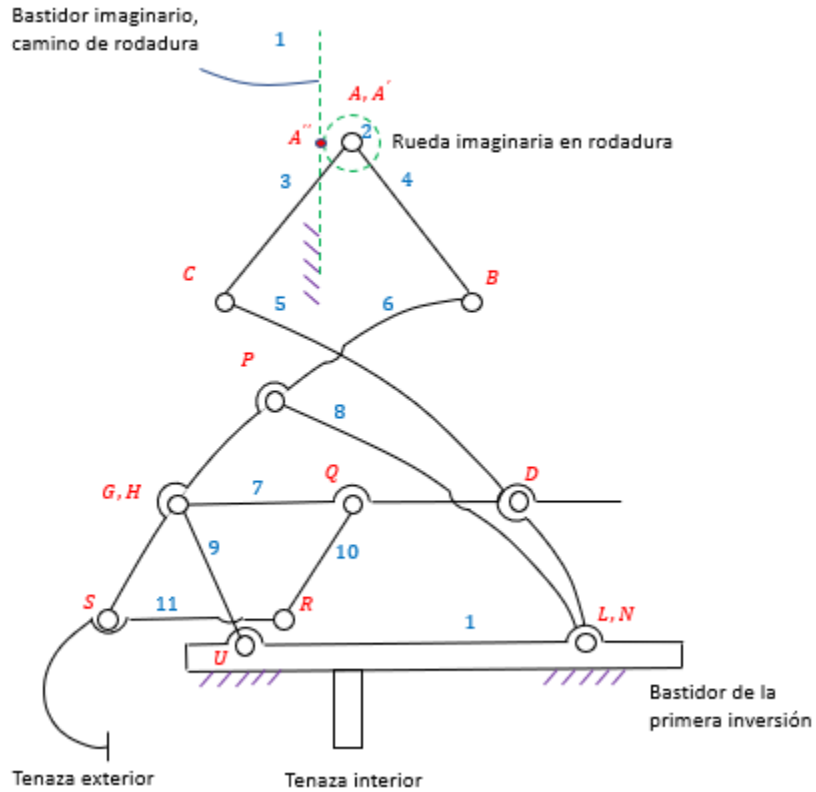


Figura 14. Incorporación de una rueda imaginaria 2 y de un bastidor imaginario para la rueda

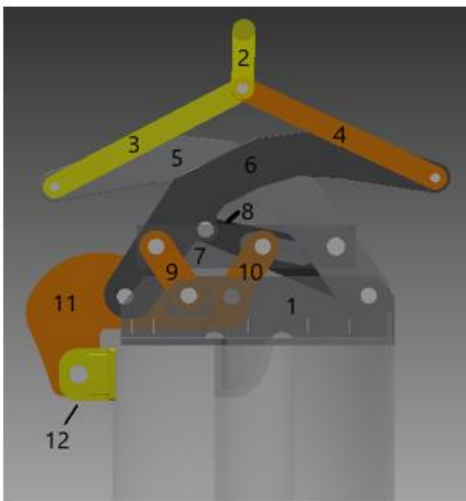


Figura 14a, representación por número de eslabones

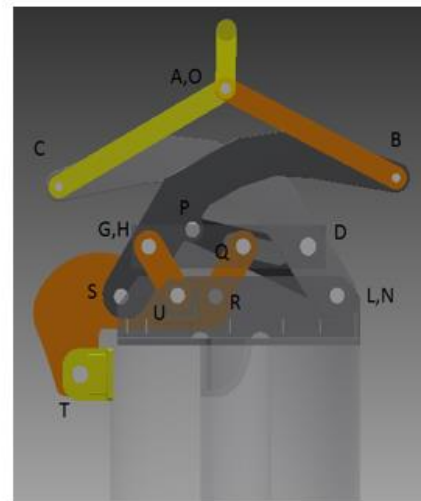


Figura 14b, representación por nodos

14.5. Datos geométricos del eslabonamiento para la pinza cargabobinas

Designación	Longitud Nominal
$a_2 = l_1$	1350 mm
a_1	675 mm 726.64 a 1044.56
$a_3 = a_2 - a_1$	675 mm 502.15 a 747.60
$a_4 = l_{11}$	800 mm
b_2	0 mm
b_4	0 mm
β_{62}	11.7875 grados
β_{61}	31.3636 grados
β_{63}	14.004 grados
β_{64}	20.3510 grados
$\beta_{65} = \beta_{63} + \beta_{64}$	34.3556 grados
β_{72}	0 grados
β_{71}	0 grados
β_7	0 grados
β_5	33.6539 grados
β_{51}	40.3459 grados
l_3	1600 mm
l_4	1600 mm
l_{65} (BS)	2500 mm
l_{64} (SP)	785mm
l_{61} (GS)	450 mm
l_{62} (PG) FALTA GB	365mm
l_{63} (BP)	1785mm
l_{66} (BG)	2143.6 mm
l_{51} (LC)	2500 mm
l_{53} (CD)	2140mm
l_{52} (DL)	450 mm
l_{72} (QG)	800 mm
l_{73} (DQ)	550 mm
l_{71} (DG)	1350 mm
l_8	1390mm
l_9	450 mm
l_{10}	450 mm
l_{11}	800 mm
φ_{11}	0° (solo en la segunda inversión)
φ_1	0°

Tabla 1. Designación y longitudes nominales según la norma IFToMM

En la tabla 1 podemos apreciar la designación y longitudes nominales según la norma IFToMM de todos los ángulos y distancias utilizadas en este trabajo.

Seguidamente en las tablas 3 y 4 podemos observar las igualdades de los ángulos ϕ y β presentes en los eslabones 5 y 6 que más adelante utilizaremos.

Phi 52	$\varphi_{52} = \varphi_{51} - \beta_5$
Phi 53	$\varphi_{53} = \varphi_{52} + \beta_{51}$
Phi 61	$\varphi_{61} = \varphi_{62} + \beta_{61}$
Phi 63	$\varphi_{63} = \varphi_{62} - \beta_{62}$
Phi 64	$\varphi_{64} = \varphi_{61} - \beta_{63}$
Phi 65	$\varphi_{65} = \varphi_{64} - \beta_{64}$

Tabla 2. Igualdades de los eslabones 5 y 6 para los ángulos Phi para la primera inversión

Phi 52	$\varphi_{52} = \varphi_{51} - \beta_5$
Phi 53	$\varphi_{53} = \varphi_{52} + \beta_{51}$
Phi 61	$\varphi_{61} = \varphi_{64} + \beta_{63}$
Phi 62	$\varphi_{62} = \varphi_{61} - \beta_{61}$
Phi 63	$\varphi_{63} = \varphi_{62} - \beta_{62}$
Phi 64	$\varphi_{64} = \varphi_{65} + \beta_{64}$

Tabla 3. Igualdades de los eslabones 5 y 6 para los ángulos Phi para la segunda inversión

Como podemos observar en la figura 15, a cada eslabón asignamos un número y a los nodos una letra; estos representan la distancia que hay entre cada punto de intersección, por los cuales tendrá un movimiento orientado.

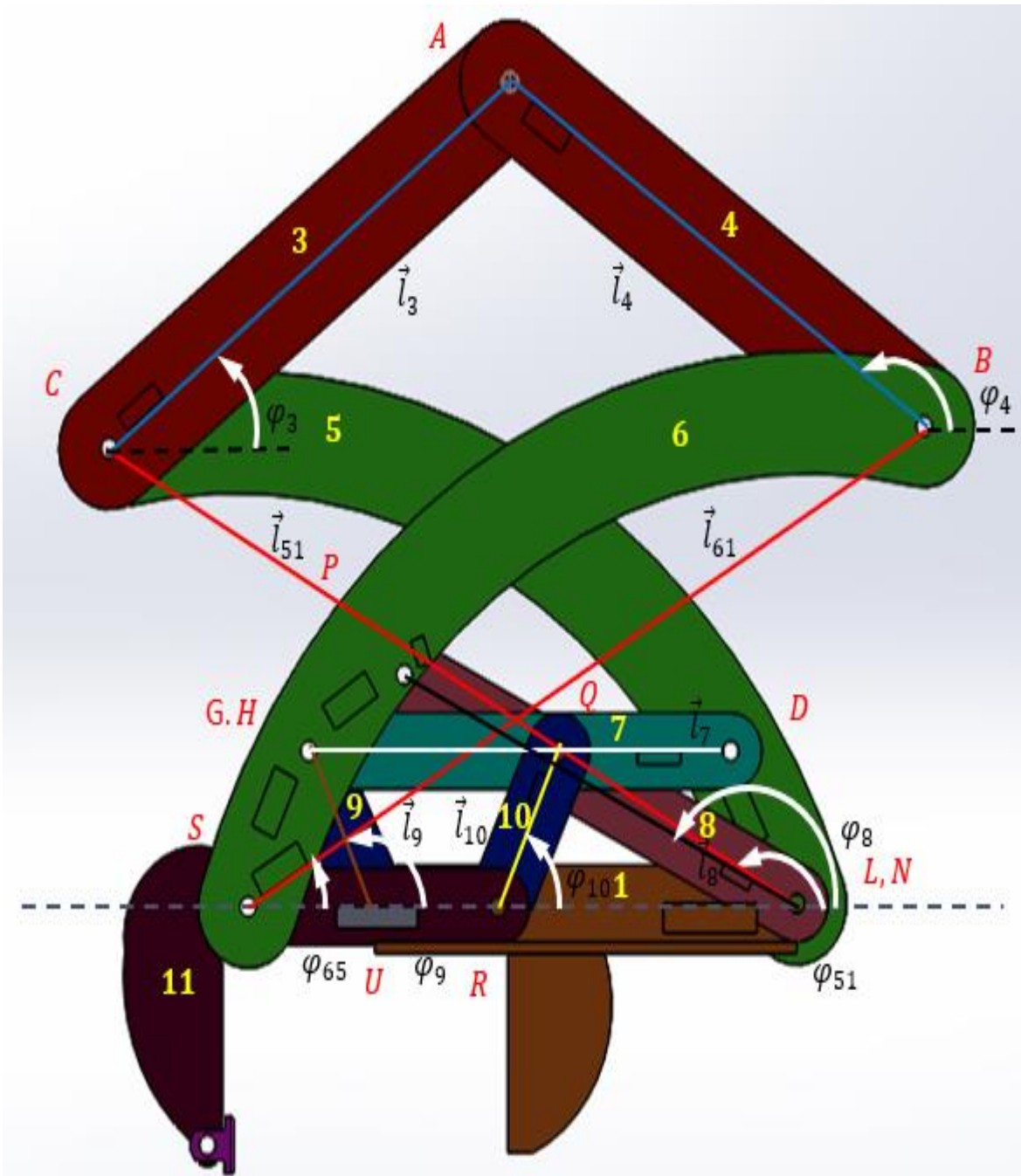


Figura 15. Representación básica por número de eslabones y nodos de la pinza simulada

Ahora que ya entramos en contexto y conocemos un poco más sobre ella, podemos ser menos técnicos y deducir que la pinza cargabobinas cuenta con 11 eslabones principalmente. Podemos observar que tiene muchos ángulos iguales, rectas paralelas y eslabones de las mismas dimensiones. Cada ángulo será diferente a medida que se desplace verticalmente, lo cual nos interesa mucho para analizar su comportamiento.

14.6. Grafo de vinculaciones cinemáticas entre eslabones

En la Figura 16, se representa el diagrama de vinculaciones cinemáticas que se adoptará en este trabajo. Este consta de cinco ciclos cinemáticos independientes, designados del I al V.

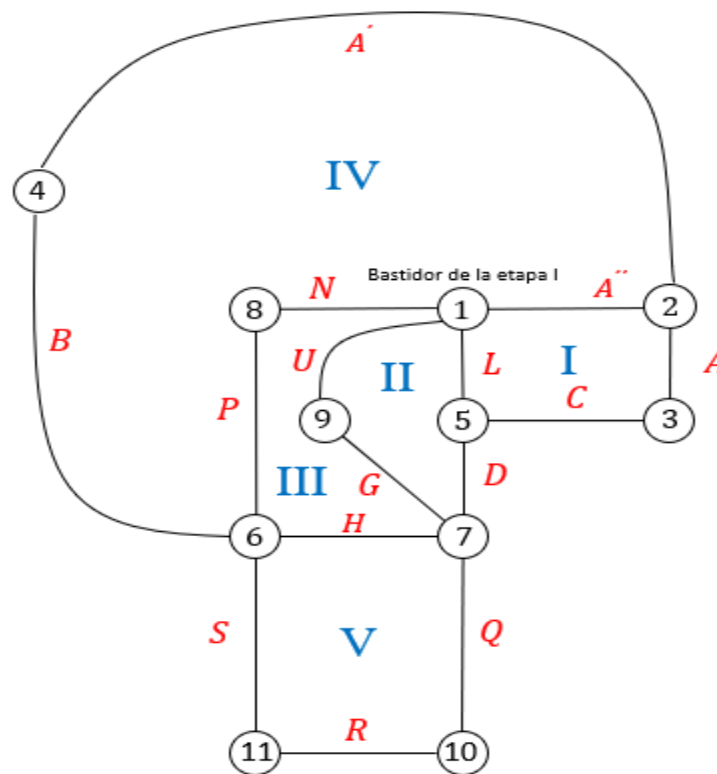


Figura 16. Diagrama de vinculaciones cinemáticas con los cinco ciclos cinemáticos independientes del mecanismo. Se ha incluido un eslabón imaginario 2 y un camino de rodadura para éste. Se ha supuesto que el eslabón 6 se articula a 7, en lugar de a 9

En la figura 17 y 18 están representadas todas las distancias y ángulos presentes en la primera inversión cinemática.

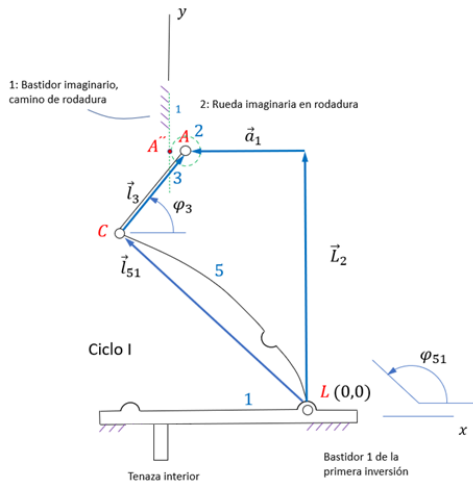


Figura 19. 7a. Ciclo I

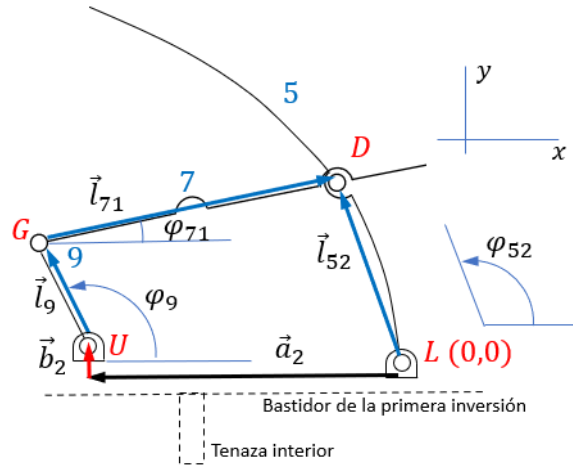


Figura 20. 7b. Ciclo II

En las figuras 19 y 20 se muestran los ciclos cinemáticos I y II del mecanismo durante la primera inversión cinemática.

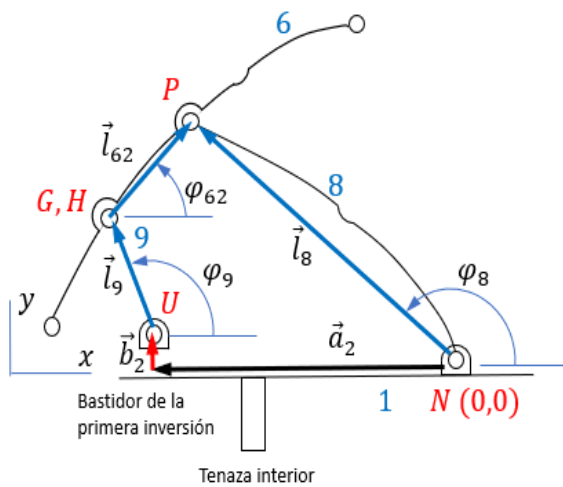


Figura 21. 8a. Ciclo III

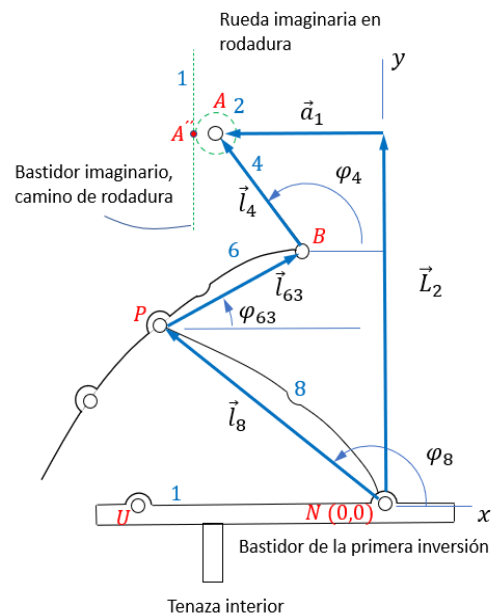


Figura 22. 8b. Ciclo IV

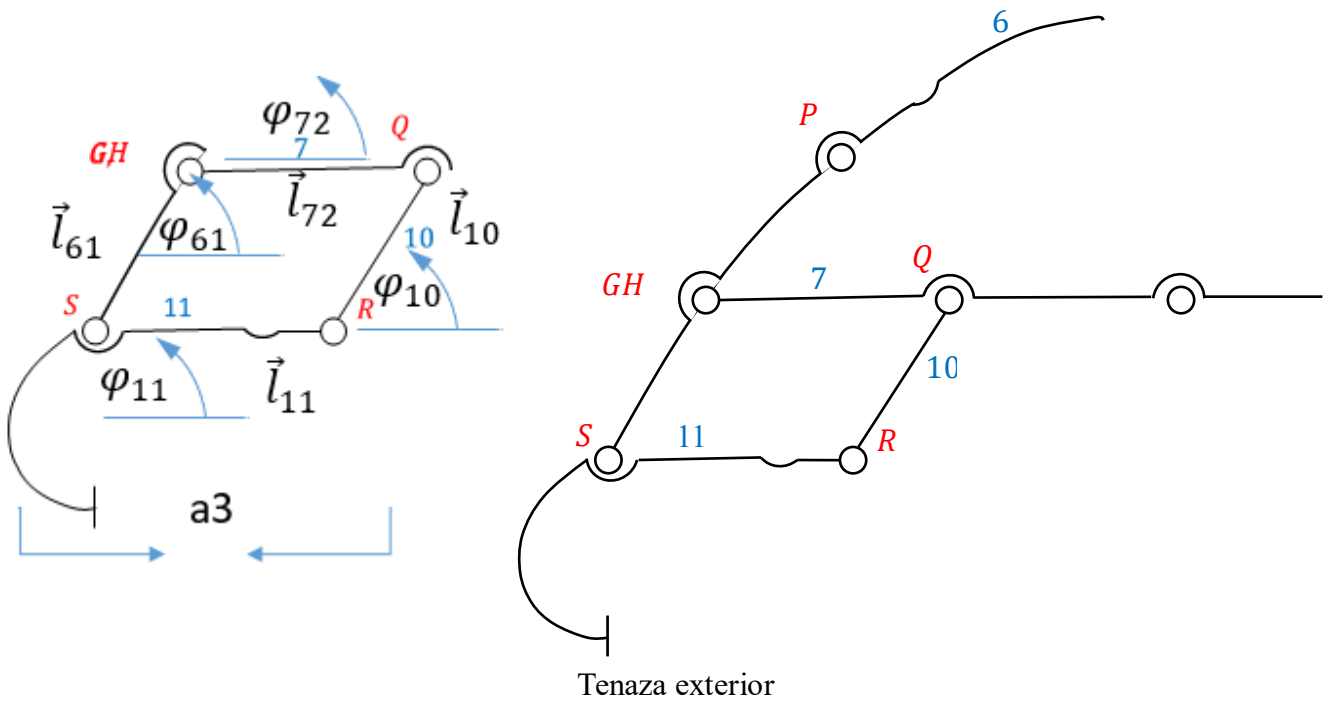


Figura 23. Figura 8c. Ciclo V

El conjunto de figuras 21, 22 y 23 se observan los ciclos cinemáticos III, IV y V de la primera inversión cinemática.

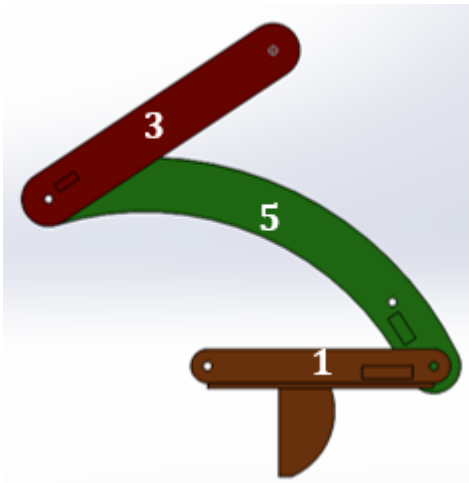


Figura 24. Primer subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo I. Simulado en SolidWorks.

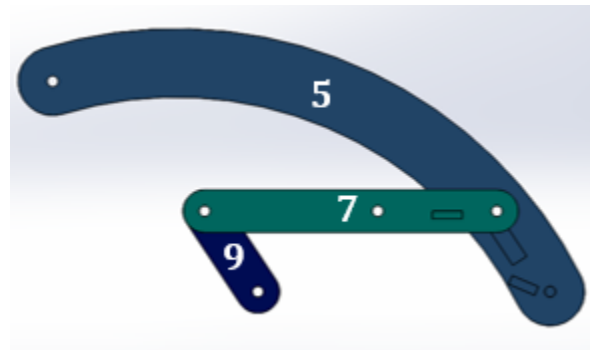


Figura 25. Segundo subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo II. Simulado en SolidWorks

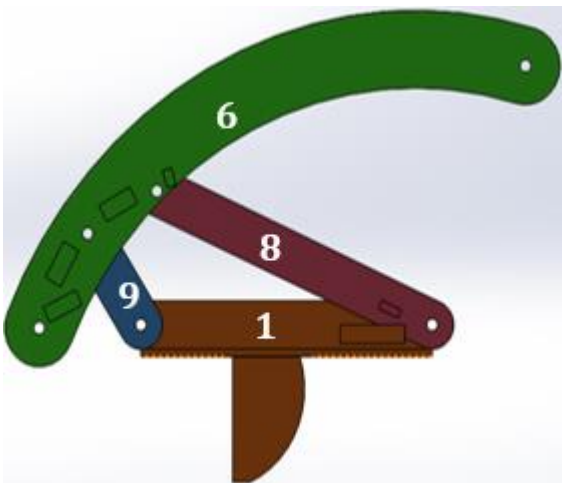
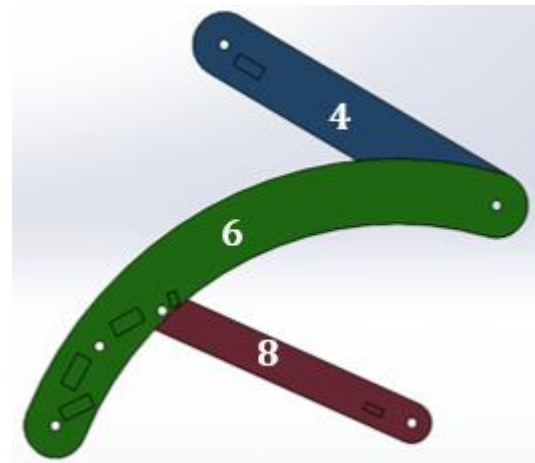


Figura 26. Tercer subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo III. Simulado en SolidWorks



BOBINAS EN EL CAMPO DE LAS POSICIONES

➤ Capítulo II

En este segundo capítulo se analizará su primer movimiento de la pinza cargabobinas, el cual lo realiza la mordaza exterior. Se dará solución a los ángulos de salida presentes en la primera inversión para los ciclos I, II, III, IV y V.

15.1. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo I durante la primera inversión cinemática (tenaza interior detenida y tenaza exterior en movimiento).

Este subciclo, mostrado en la Figura 29, contiene a los eslabones 1, 2, 3 y 5. Es un subciclo de movilidad 2, en el que el giro de la rueda 2 respecto a su eje es una movilidad local. La movilidad que queda es la equivalente a la de un mecanismo de manivela-corredera con corrimiento horizontal a_1 .

La coordenada de entrada de este mecanismo es la altura variable L_2 y las coordenadas de salidas son los ángulos variables que forman los eslabones 3 y 5 respecto a la horizontal positiva.

Conocido el vector, \vec{L}_2 esto es, conocido el vector vertical que va desde la articulación L en la pinza interior fija hasta la cota de las articulaciones A, A' y A'', se obtendrán los ángulos de salida variable φ_3 y φ_{51} .

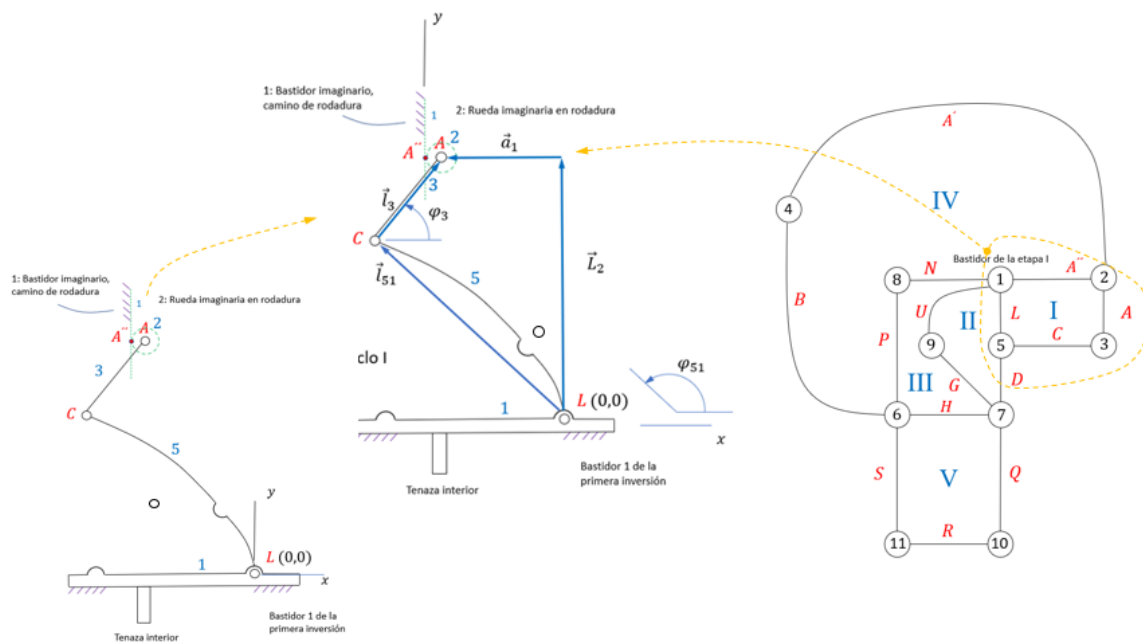


Figura 29. CICLO I

La ecuación de lazo vectorial que gobierna este ciclo se escribe en (4). Se genera partiendo de la articulación L y regresando a L, y haciendo un recorrido horario.

$$\vec{l}_{51} + \vec{l}_3 - \vec{a}_1 - \vec{L}_2 = \vec{0} \quad (4)$$

Al proyectar cada vector en sus componentes verticales y horizontales se cumple (5):

$$l_{51}\cos\varphi_{51}\vec{i} + l_{51}\sen\varphi_{51}\vec{j} + l_3\cos\varphi_3\vec{i} + l_3\sen\varphi_3\vec{j} - a_1\vec{i} - L_2\vec{j} = \vec{0} \quad (5)$$

Separando la ecuación (5) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones (6.1) y (6.2), en el que tanto φ_{51} , como φ_3 son incógnitas y l_{51} y l_3 son parámetros geométricos. L_2 es la coordenada de entrada.

$$l_{51}\cos\varphi_{51} + l_3\cos\varphi_3 - a_1 = 0 \quad (6.1)$$

$$l_{51}\sen\varphi_{51} + l_3\sen\varphi_3 - L_2 = 0 \quad (6.2)$$

Solución para φ_{51} y φ_3 del sistema de dos ecuaciones

Aislando la variable de salida φ_{51} en el miembro izquierdo de las ecuaciones (6.1) y (6.2), estas dos ecuaciones se pueden escribir como en (7.1) y (7.2).

$$l_{51}\cos\varphi_{51} = a_1 - l_3\cos\varphi_3 \quad (7.1)$$

$$l_{51}\sen\varphi_{51} = L_2 - l_3\sen\varphi_3 \quad (7.2)$$

Elevando al cuadrado (7.1) y (7.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (8).

$$a_1^2 + L_2^2 + l_3^2 - l_{51}^2 = 2a_1l_3\cos\varphi_3 + 2L_2l_3\sen\varphi_3 \quad (8)$$

15.1.1. Solución para φ_3 , ciclo I

Reemplazando las identidades (9) y (10) en (8), la ecuación (8) se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)$ dada en (11):

$$\cos\varphi_3 = \frac{1 - \tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)^2}{1 + \tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)^2} \quad (9)$$

$$\sen\varphi_3 = \frac{2 \tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)^2} \quad (10)$$

$$X \left(\tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right)\right)^2 + Y \tan\left(\frac{\varphi_3}{2}\right) + Z = 0 \quad (11)$$

Cuyas dos soluciones φ_{3_1} y φ_{3_2} vienen dadas por la ecuación (12). En esta ecuación (12), el posible ángulo variable de salida φ_{3_1} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{3_2} con el signo negativo.

$$\varphi_{31,2} = 2 \operatorname{arc\,tang} \left(\frac{-Y \pm \sqrt{Y^2 - 4XZ}}{2X} \right) \quad (12)$$

Siendo: $X = L_2^2 + 2a_1l_3 + a_1^2 + l_3^2 - l_{51}^2 \quad (13)$

$$Y = -4L_2l_3 \quad (14)$$

$$Z = L_2^2 - 2a_1l_3 + a_1^2 + l_3^2 - l_{51}^2 \quad (15)$$

15.1.2. Solución para φ_{51} , ciclo I

Hay dos valores posibles para φ_3 de acuerdo con (12). Se comprueba en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

Conocido el valor correcto de φ_3 a través de (12), se puede obtener φ_{51} , despejándola de (6.1). Esto da como resultado la ecuación (16).

$$\varphi_{51,2} = \operatorname{arc\,cos} \left(\frac{a_1 - l_3 \cos \varphi_3}{l_{51}} \right) \quad (16)$$

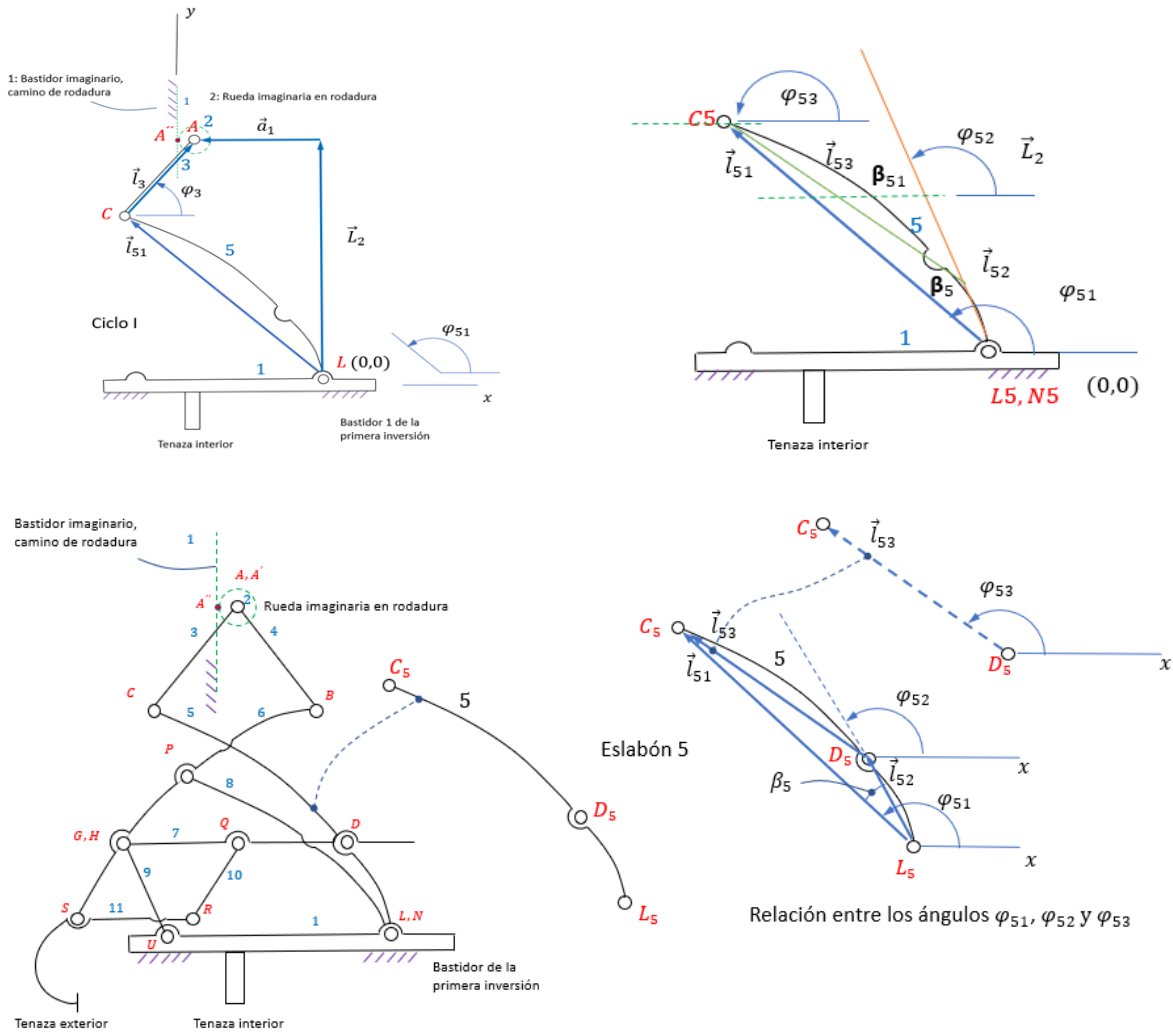


Figura 30. Ciclo 1

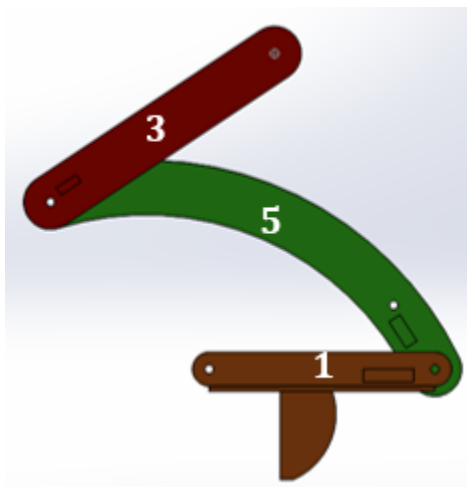


Figura 31. Primer subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo I. Simulado en SolidWorks.

A continuación, en la figura 32 se muestra una hoja de cálculo realizado en Excel, con la finalidad de calcular los ángulos de todos los betas del eslabón 5 y seguidamente en la figura 33 podemos observar al eslabón 5 con sus respectivos ángulos β y φ .

25	Beta 64	Ángulo P5B en grados (beta 64)	20.351022											
26	Beta 65	Beta 65	34.3556914											
27														
28														
29			I53	I51	I52									
30			2140	2500	450									
31														
32		Coseno de Beta 5	0.8324											
33		Ángulo en radianes Beta 5	0.58737186											
34		Ángulo en grados Beta 5	33.6539294											
35														
36														
37		Coseno de Beta 51 prima	-0.76214953											
38		Ángulo en radianes	2.43742323											
39		Ángulo Beta 51 prima en grados	139.654067											
40		Beta 51 en grados	40.3459335											
41														
42														
43			IGB	IGP	IPB									
44			2143.6	365	1785									
45														
46		Coseno del ángulo en GPB	-0.97891175											
47		GPB en radianes	2.93586086											
48		GPB en grados	168.212439											
49		Beta 62	11.7875606											

Figura 32. Programas realizados para conocer las Betas del eslabón 5

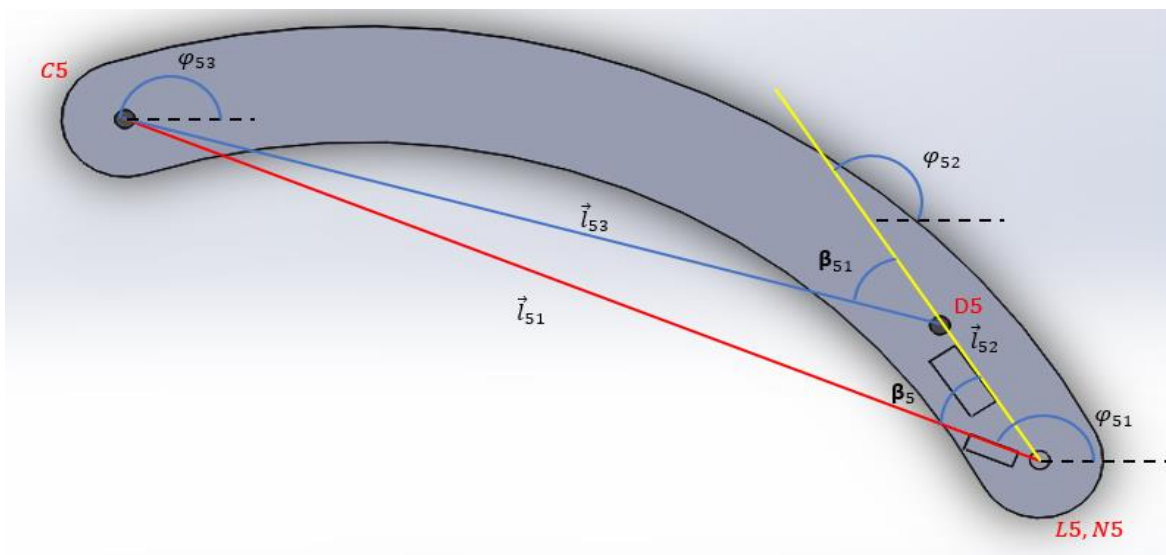


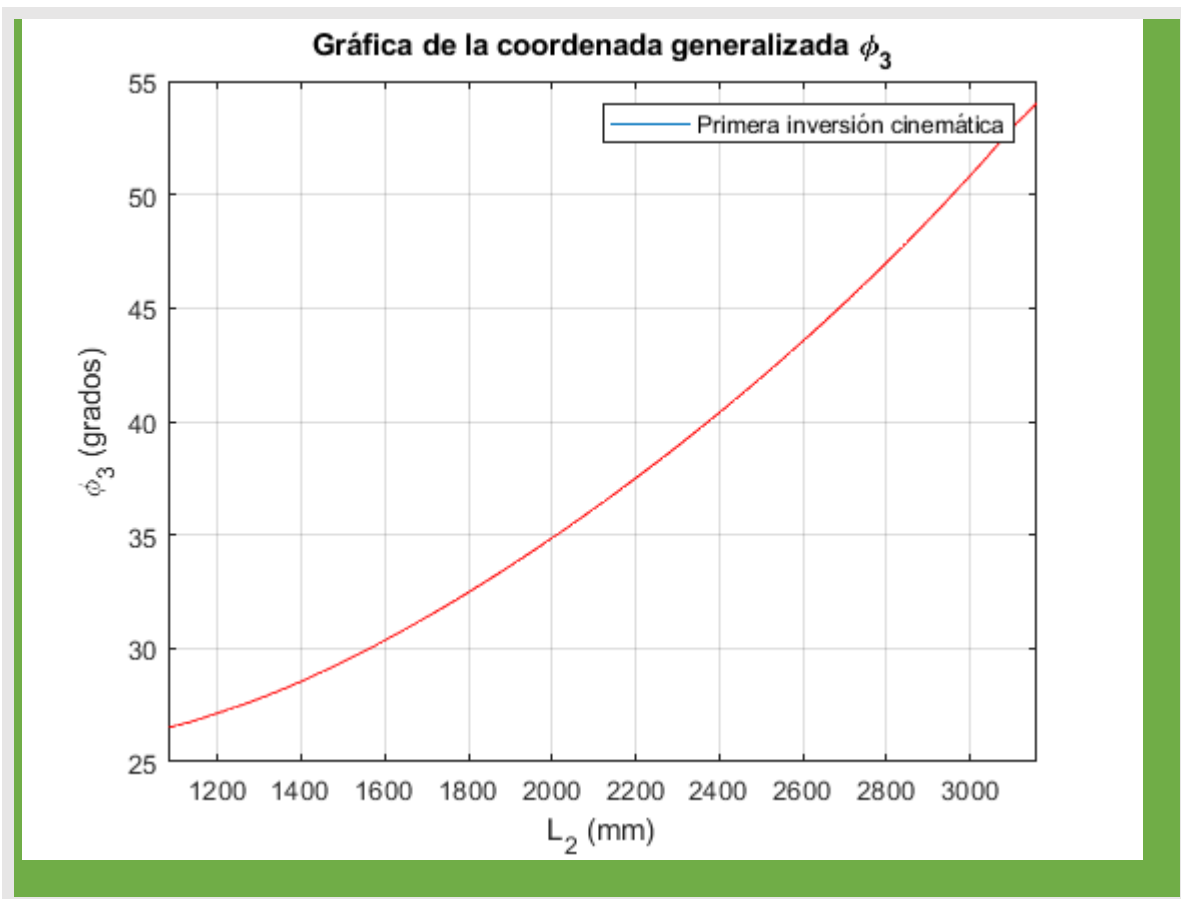
Figura 33. Eslabón 5 con sus respectivos ángulos

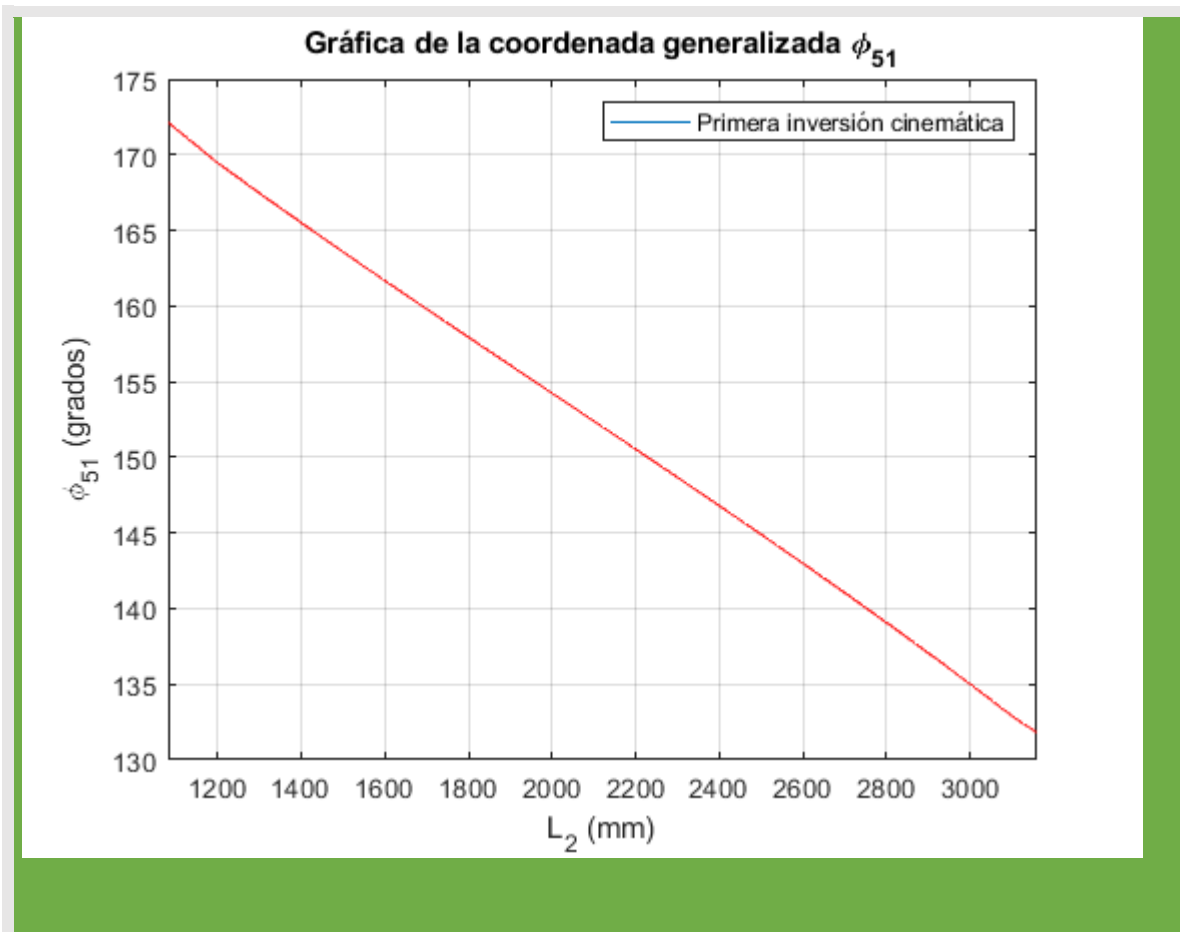
$$\varphi_{53} = \varphi_{52} + \beta_{51} \quad (16.1)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_{51} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre. La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (17).

$$\varphi_{51_2} = 2\pi - \varphi_{51_1} \quad (17)$$

Las Figuras 10 y 11 muestran los ángulos de salida φ_3 y φ_{51} como una función de la altura variable L_2 del ciclo I





Resultado 1. Figuras 10 y 11. Gráficas de φ_3 y φ_{51} en función de la coordenada generalizada de entrada L_2 . (Ciclo I, primera inversión cinemática)

15.2. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo II durante la primera inversión cinemática

Éste es un ciclo de cuatro barras de movilidad 1 formado por los eslabones 1, 5, 7 y 9. Los parámetros geométricos y las coordenadas generalizadas de este ciclo se muestran en la Figura 34.

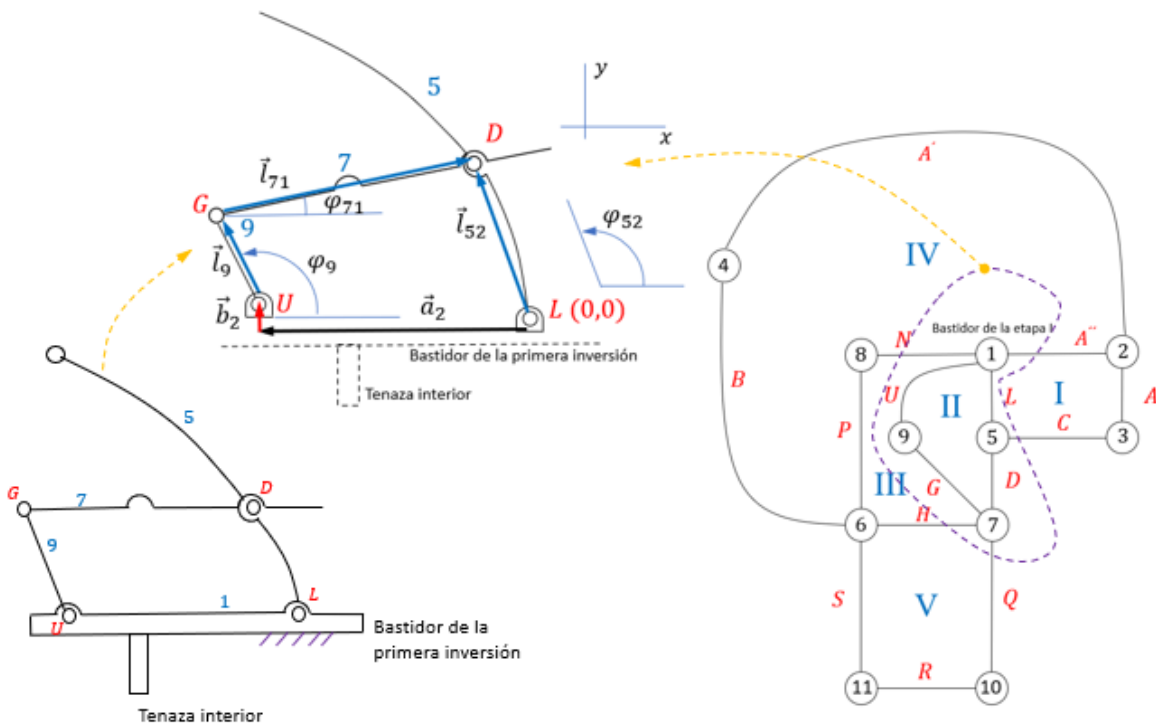


Figura 34. CICLO II

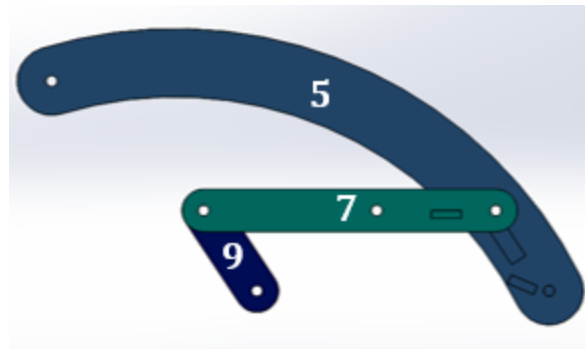


Figura 35. Segundo subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo II. Simulado en SolidWorks

En este ciclo cinemático, el ángulo φ_{52} está relacionado con el ángulo φ_{51} hallado en (16), mediante la ecuación (18), en la que el ángulo β_5 es una constante.

Igualdad para φ_{52} del sistema de dos ecuaciones del ciclo II

$$\varphi_{52} = \varphi_{51} - \beta_5 \quad (18)$$

De la ecuación de lazo vectorial en este ciclo, generada partiendo de U y regresando a U, y haciendo un recorrido horario, se cumple (19)

$$\vec{l}_9 + \vec{l}_{71} - \vec{l}_{52} + \vec{a}_2 + \vec{b}_2 = \vec{0} \quad (19)$$

Al proyectar cada vector de (19) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (20):

$$l_9 \cos \varphi_9 \vec{i} + l_9 \sin \varphi_9 \vec{j} + l_{71} \cos \varphi_{71} \vec{i} + l_{71} \sin \varphi_{71} \vec{j} - l_{52} \cos \varphi_{52} \vec{i} - l_{52} \sin \varphi_{52} \vec{j} + a_2 \vec{i} + b_2 \vec{j} = \vec{0} \quad (20)$$

Separando la ecuación (20) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (21.1) y (21.2), en el que tanto φ_9 , como φ_{71} son incógnitas, siendo l_9 , l_{71} , l_{52} , a_2 y b_2 , parámetros geométricos y φ_{52} , la coordenada de entrada conocida hallada en (16).

$$l_9 \cos \varphi_9 + l_{71} \cos \varphi_{71} - l_{52} \cos \varphi_{52} + a_2 = 0 \quad (21.1)$$

$$l_9 \sin \varphi_9 + l_{71} \sin \varphi_{71} - l_{52} \sin \varphi_{52} + b_2 = 0 \quad (21.2)$$

Aislado la variable de salida φ_{71} en el miembro izquierdo de las ecuaciones (21.1) y (21.2), estas dos ecuaciones, se pueden escribir como en (22.1) y (22.2).

$$l_{71} \cos \varphi_{71} = l_{52} \cos \varphi_{52} - l_9 \cos \varphi_9 - a_2 \quad (22.1)$$

$$l_{71} \sin \varphi_{71} = l_{52} \sin \varphi_{52} - l_9 \sin \varphi_9 - b_2 \quad (22.2)$$

Elevando al cuadrado (22.1) y (22.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (23).

$$l_{71}^2 - l_{52}^2 - l_9^2 - a_2^2 - b_2^2 = -2l_{52}l_9(\cos \varphi_{52} \cos \varphi_9 + \sin \varphi_{52} \sin \varphi_9) - 2l_{52}a_2 \cos \varphi_{52} + 2l_9a_2 \cos \varphi_9 - 2l_{52}b_2 \sin \varphi_{52} + 2l_9b_2 \sin \varphi_9 \quad (23)$$

En esta ecuación (23), la incógnita es φ_9 y φ_{52} es la entrada. El resto son los parámetros geométricos del ciclo II.

Para simplificar la expresión (23) se dividirá ésta por el término $2l_{52}l_9$ y se definirán las constantes K_4 , K_5 , K_6 , K_7 y K_8 dadas en (24), (25), (26), (27) y (28).

$$K_4 = \frac{a_2}{l_9} \quad (24)$$

$$K_5 = \frac{a_2}{l_{52}} \quad (25)$$

$$K_6 = \frac{l_{52}^2 + l_9^2 + a_2^2 + b_2^2 - l_{71}^2}{2l_{52}l_9} \quad (26)$$

$$K_7 = \frac{b_2}{l_9} \quad (27)$$

$$K_8 = \frac{b_2}{l_{52}} \quad (28)$$

De esta manera, la ecuación (23) se puede expresar como se escribe en (29).

$$K_6 - (\cos\varphi_{52}\cos\varphi_9 + \operatorname{sen}\varphi_{52}\operatorname{sen}\varphi_9) - K_4\cos\varphi_{52} + K_5\cos\varphi_9 - K_7\operatorname{sen}\varphi_{52} + K_8\operatorname{sen}\varphi_9 = 0 \quad (29)$$

En esta ecuación (29) se desea despejar φ_9 .

Reemplazando las identidades trigonométricas (30.1) y (30.2) en la ecuación (23), ésta última se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right)$, dada en (31):

$$\cos \varphi_9 = \frac{1 - (\operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right))^2}{1 + (\operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right))^2} \quad (30.1)$$

$$\operatorname{sen} \varphi_9 = \frac{2 \operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right)}{1 + (\operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right))^2} \quad (30.2)$$

$$A (\operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right))^2 + B \operatorname{tang}\left(\frac{\varphi_9}{2}\right) + C = 0 \quad (31)$$

Estando los coeficientes A, B y C expresados como se indica en (31.1), (31.2) y (31.3).

$$A = (1 - K_4)\cos\varphi_{52} - K_5 + K_6 - K_7\operatorname{sen}\varphi_{52} \quad (31.1)$$

$$B = 2K_8 - 2\operatorname{sen}\varphi_{52} \quad (31.2)$$

$$C = -(K_4 + 1)\cos\varphi_{52} - K_7\operatorname{sen}\varphi_{52} + K_5 + K_6 \quad (31.3)$$

15.2.1. Solución para φ_{91} en el ciclo II

La ecuación (31) tiene dos soluciones φ_{91} y φ_{92} como se muestra en la ecuación (33). En esta ecuación (33), el posible ángulo variable de salida φ_{91} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{92} con el signo negativo.

$$\varphi_{91,2} = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tang} \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right) \quad (33)$$

De (33) se deduce que φ_9 es función de φ_{52} , el cual a su vez es función de L_2 .

Se debe comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos ángulos φ_{91} o φ_{92} es el que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (34).

$$\varphi_{91_2} = 2\pi - \varphi_{91_1} \quad (34)$$

15.2.2. Solución para φ_{71} en el ciclo II

Conocido el valor correcto de φ_9 a través de (33), se puede obtener φ_{71} , despejándola de (22.1). Esto da como resultado la ecuación (35).

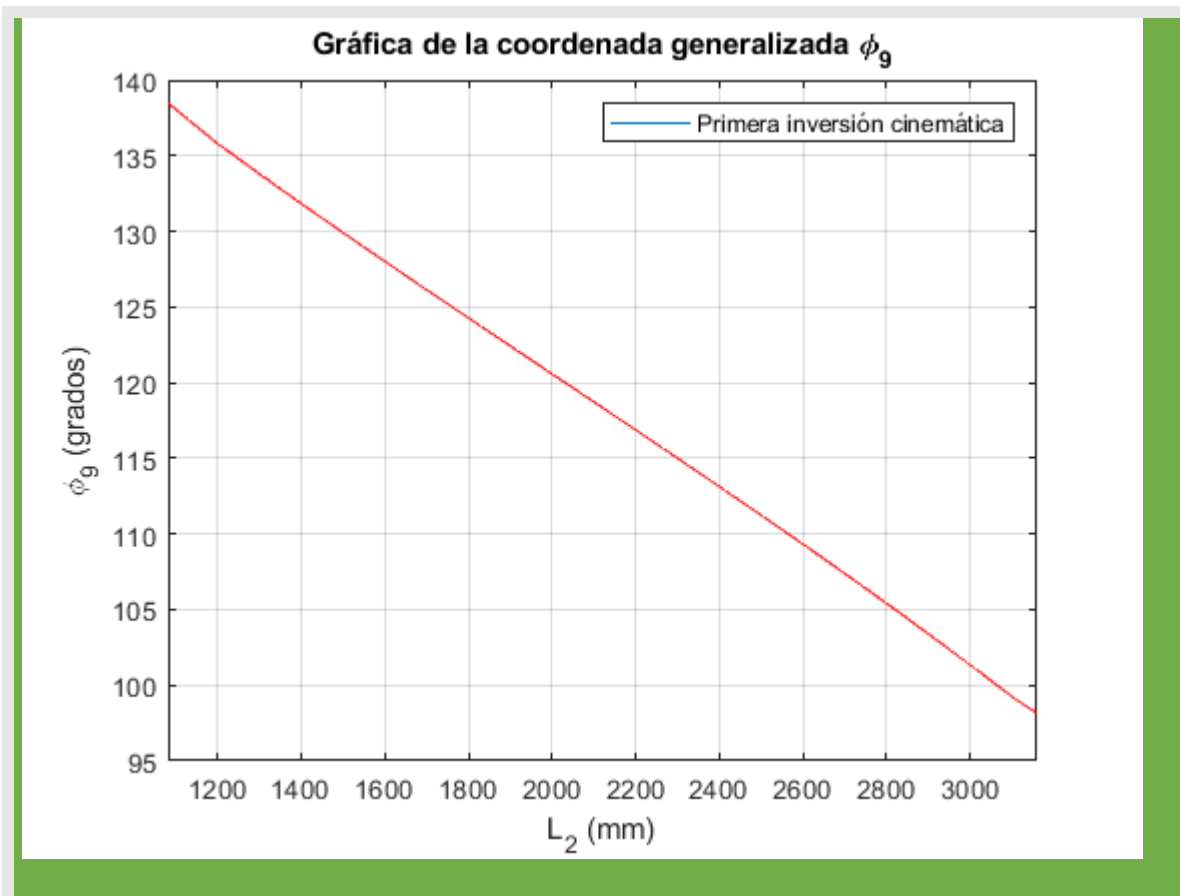
$$\varphi_{71_{1,2}} = \arccos \left(\frac{l_{52} \cos \varphi_{52} - l_9 \cos \varphi_9 - a_2}{l_{71}} \right) \quad (35)$$

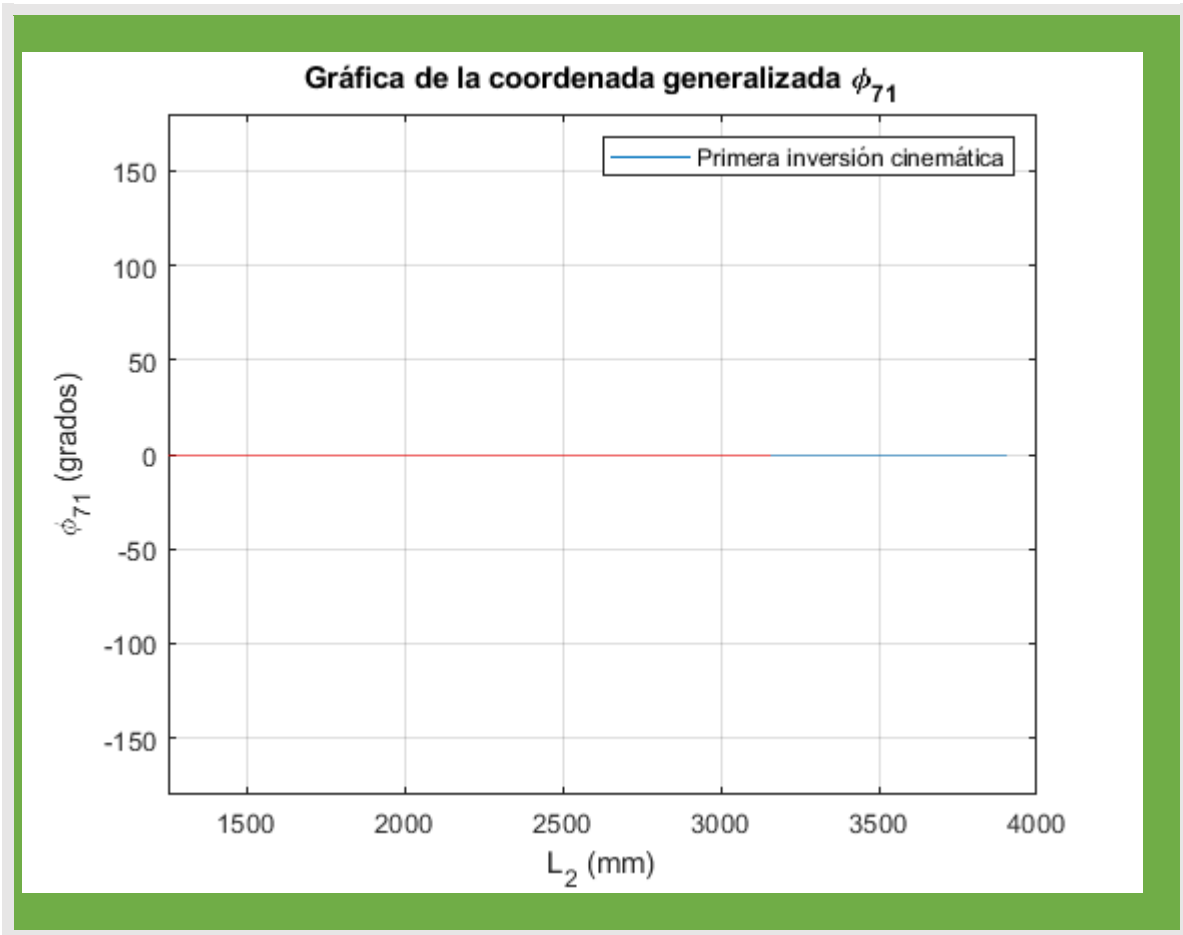
Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_{71} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (36).

$$\varphi_{71_2} = 2\pi - \varphi_{71_1} \quad (36)$$

Las Figuras 12 y 13 muestran los ángulos de salida φ_9 y φ_{71} como una función de la altura variable L_2 del ciclo II





Resultado 2. Figuras 12 y 13. Gráficas de φ_9 y φ_{71} en función de la coordenada generalizada de entrada L_2 . (Ciclo II, primera inversión cinemática)

¿Qué tenemos hasta ahora?

Gráficas de φ_{51} y φ_3 en función de L_2 , ciclo I y gráficas de φ_9 y φ_{71} en función de L_2 , ciclo II, lo podemos observar en la figura 35.

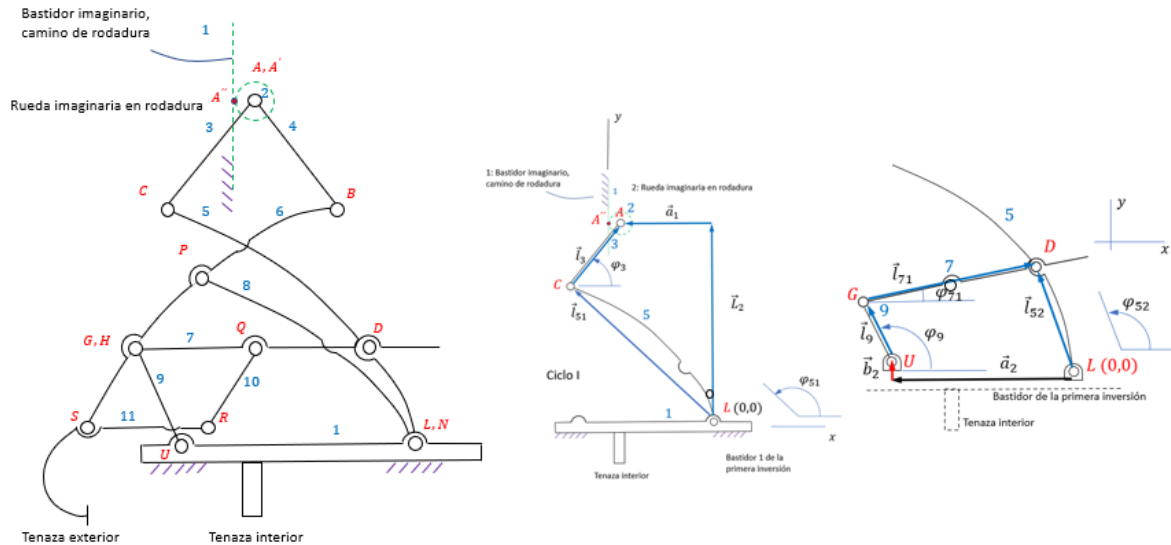


Figura 35. Primeros dos circuitos cinemáticos resueltos

15.3. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo III durante la primera inversión cinemática

El ciclo cerrado III involucra a los eslabones 1, 9, 6 y 8. Estos eslabones conforman un ciclo cerrado de cuatro barras. Los parámetros geométricos y las coordenadas generalizadas de este ciclo se muestran en la Figura 36.

En este ciclo cinemático, el ángulo φ_9 , determinado en el ciclo II anterior, es ya conocido. Se desea encontrar ahora los ángulos φ_{62} y φ_8 en función de los parámetros geométricos correspondientes y en función de φ_9 , el cual a su vez es función de φ_{52} , que se calcula a partir de la coordenada de entrada L_2 .

Como se puede apreciar a continuación la presencia del eslabón 7, le da a este ciclo una movilidad 2. De este ciclo, tomaremos el lazo cerrado.

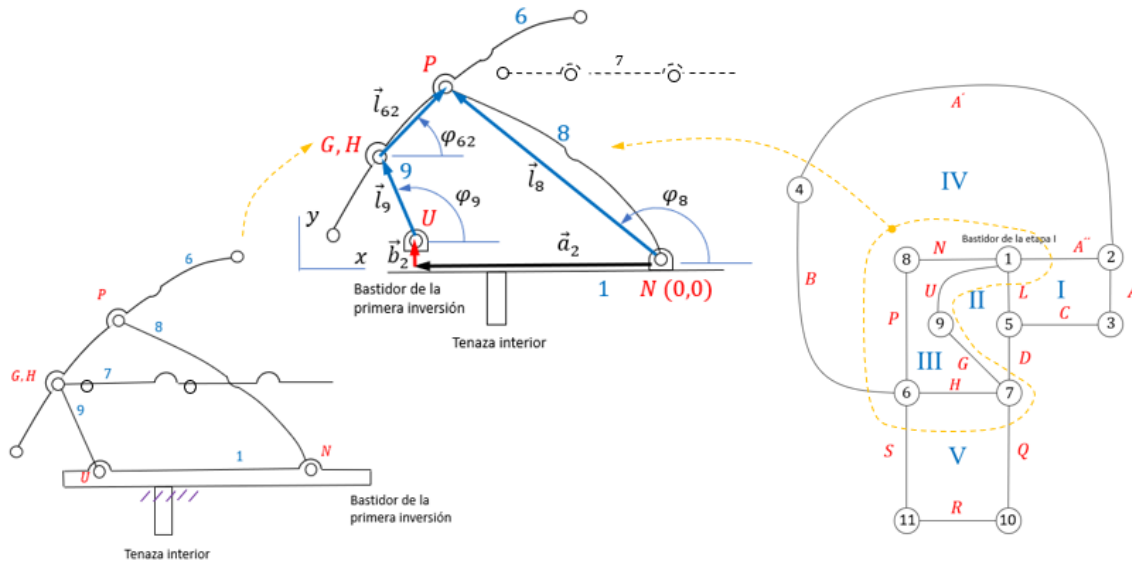


Figura 36. CICLO III

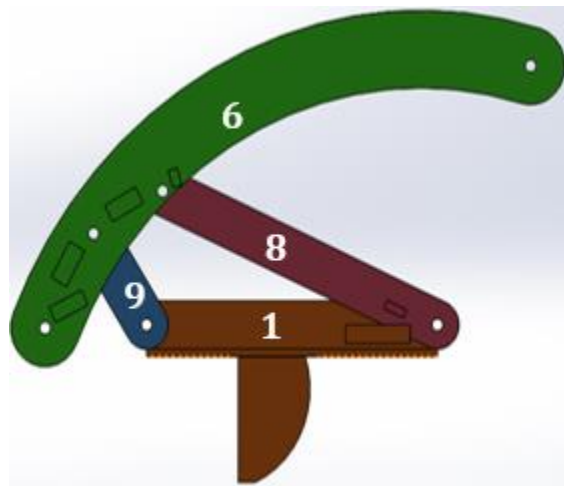


Figura 37. Tercer subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo III. Simulado en SolidWorks

Partiendo de la articulación U y regresando a U y haciendo un recorrido horario, se genera la ecuación de lazo vectorial (37).

$$\vec{l}_9 + \vec{l}_{62} - \vec{l}_8 + \vec{a}_2 + \vec{b}_2 = \vec{0} \quad (37)$$

Al proyectar cada vector de (37) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (38):

$$l_9 \cos \varphi_9 \vec{i} + l_9 \sin \varphi_9 \vec{j} + l_{62} \cos \varphi_{62} \vec{i} + l_{62} \sin \varphi_{62} \vec{j} - l_8 \cos \varphi_8 \vec{i} - l_8 \sin \varphi_8 \vec{j} + a_2 \vec{i} + b_2 \vec{j} = \vec{0} \quad (38)$$

Separando la ecuación (38) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (39.1) y (39.2), en el que tanto φ_{62} , como φ_8 son incógnitas, siendo l_9 , l_{62} , l_8 , a_2 y b_2 , parámetros geométricos y φ_9 , la coordenada de entrada conocida, calculada en (33).

$$l_9 \cos \varphi_9 + l_{62} \cos \varphi_{62} - l_8 \cos \varphi_8 + a_2 = 0 \quad (39.1)$$

$$l_9 \sin \varphi_9 + l_{62} \sin \varphi_{62} - l_8 \sin \varphi_8 + b_2 = 0 \quad (39.2)$$

Las ecuaciones (39.1) y (39.2), aunque relacionan ángulos distintos, son similares a las ecuaciones (21.1) y (21.2) del ciclo II anterior. Siguiendo los mismos pasos que allí se dieron, se aislará la variable de salida φ_{62} en el miembro izquierdo de las ecuaciones (39.1) y (39.2), con el fin de hallar φ_8 . Esto conduce a las ecuaciones (40.1) y (40.2).

$$l_{62} \cos \varphi_{62} = l_8 \cos \varphi_8 - l_9 \cos \varphi_9 - a_2 \quad (40.1)$$

$$l_{62} \sin \varphi_{62} = l_8 \sin \varphi_8 - l_9 \sin \varphi_9 - b_2 \quad (40.2)$$

Elevando al cuadrado (40.1) y (40.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (41).

$$l_{62}^2 - l_8^2 - l_9^2 - a_2^2 - b_2^2 = -2l_8 l_9 (\cos \varphi_8 \cos \varphi_9 + \sin \varphi_8 \sin \varphi_9) - 2l_8 a_2 \cos \varphi_8 + 2l_9 a_2 \cos \varphi_9 - 2l_8 b_2 \sin \varphi_8 + 2l_9 b_2 \sin \varphi_9 \quad (41)$$

En esta ecuación (41), la incógnita es φ_8 y φ_9 es la entrada. El resto de variables son los parámetros geométricos del ciclo III.

Para simplificar la expresión (41) se dividirá ésta por el término $2l_8 l_9$ y se definirán las constantes K_9 , K_{10} , K_{11} , K_{12} y K_{13} dadas en (42), (43), (44), (45) y (46).

$$K_9 = \frac{a_2}{l_9} \quad (42)$$

$$K_{10} = \frac{a_2}{l_8} \quad (43)$$

$$K_{11} = \frac{-l_{62}^2 + l_8^2 + l_9^2 + a_2^2 + b_2^2}{2l_8 l_9} \quad (44)$$

$$K_{12} = \frac{b_2}{l_9} \quad (45)$$

$$K_{13} = \frac{b_2}{l_8} \quad (46)$$

De esta manera, la ecuación (41) se puede expresar como se escribe en (47).

$$K_{11} - (\cos\varphi_8 \cos\varphi_9 + \sin\varphi_8 \sin\varphi_9) - K_9 \cos\varphi_8 + K_{10} \cos\varphi_9 - K_{12} \sin\varphi_8 + K_{13} \sin\varphi_9 = 0 \quad (47)$$

En esta ecuación (47) se desea despejar φ_8 .

Reemplazando las identidades trigonométricas (48) y (49) en la ecuación (47), ésta última se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right)$, mostrada en (50):

$$\cos \varphi_8 = \frac{1 - (\tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right))^2}{1 + (\tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right))^2} \quad (48)$$

$$\sin \varphi_8 = \frac{2 \tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right)}{1 + (\tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right))^2} \quad (49)$$

$$D (\tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right))^2 + E \tan g\left(\frac{\varphi_8}{2}\right) + F = 0 \quad (50)$$

Estando los coeficientes D, E y F expresados como se indica en (51), (52) y (53).

$$D = K_{11} + (1 + K_{10})\cos\varphi_9 + K_9 + K_{13}\sin\varphi_9 \quad (51)$$

$$E = -2\sin\varphi_9 - 2K_{12} \quad (52)$$

$$F = -K_9 + (K_{10} - 1)\cos\varphi_9 + K_{13}\sin\varphi_9 + K_{11} \quad (53)$$

15.3.1 Solución para φ_8 en el ciclo III

La ecuación (50) tiene dos soluciones φ_{8_1} y φ_{8_2} como se muestra en la ecuación (54). En esta ecuación (54), el posible ángulo variable de salida φ_{8_1} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{8_2} con el signo negativo.

$$\varphi_{8_{1,2}} = 2 \arctan g\left(\frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D}\right) \quad (54)$$

De (33) se deduce que φ_8 es función de φ_9 , el cual a su vez lo es de φ_{52} y éste es función de L_2 .

Se debe comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos ángulos φ_{8_1} o φ_{8_2} es el que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (55).

$$\varphi_{8_2} = 2\pi - \varphi_{8_1} \quad (55)$$

15.3.2. Soluciones para φ_{62} en el ciclo III

Conocido el valor correcto de φ_8 a través de (54), se puede obtener φ_{62} , despejándolo de (40.1). Esto da como resultado la ecuación (56).

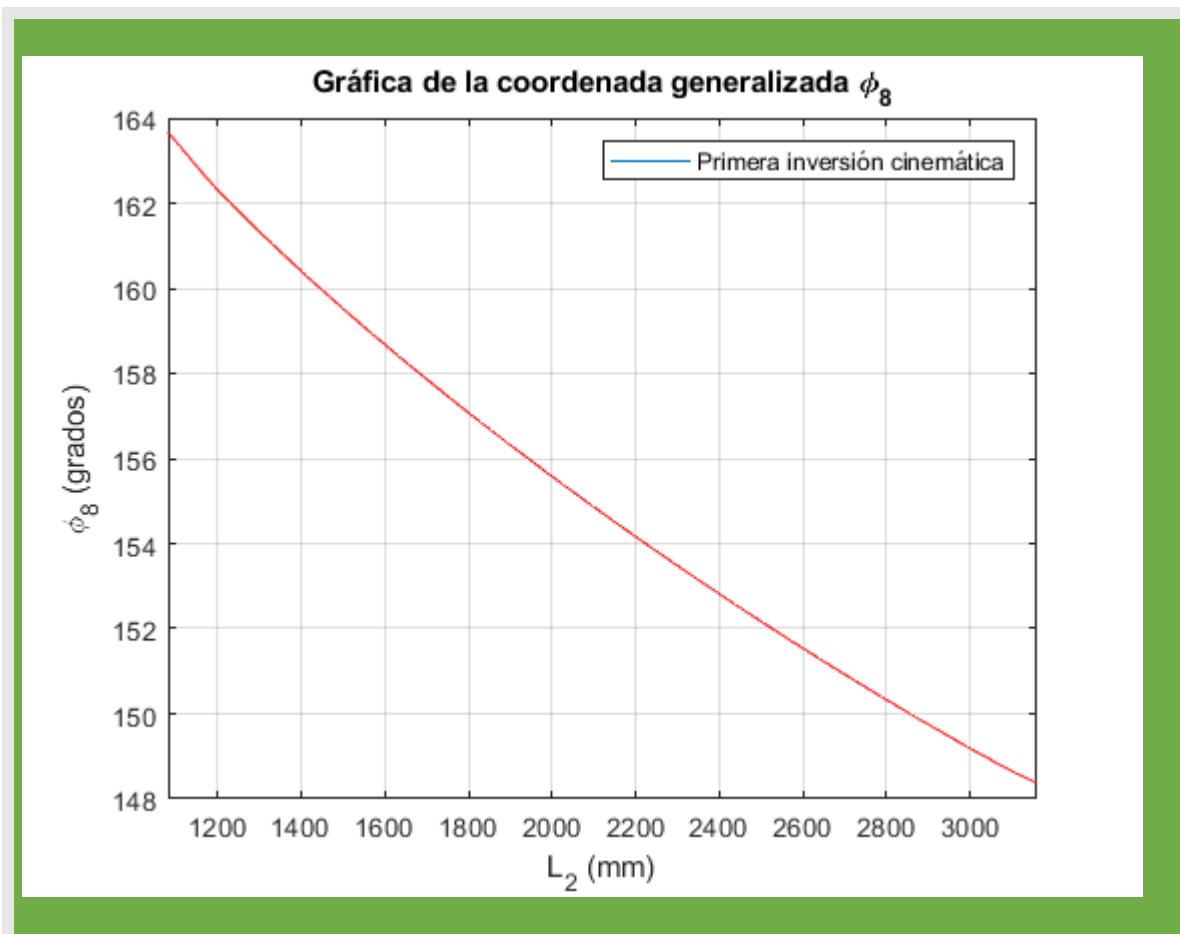
$$\varphi_{62_{1,2}} = \arccos\left(\frac{l_8 \cos \varphi_8 - l_9 \cos \varphi_9 - a_2}{l_{62}}\right) \quad (56)$$

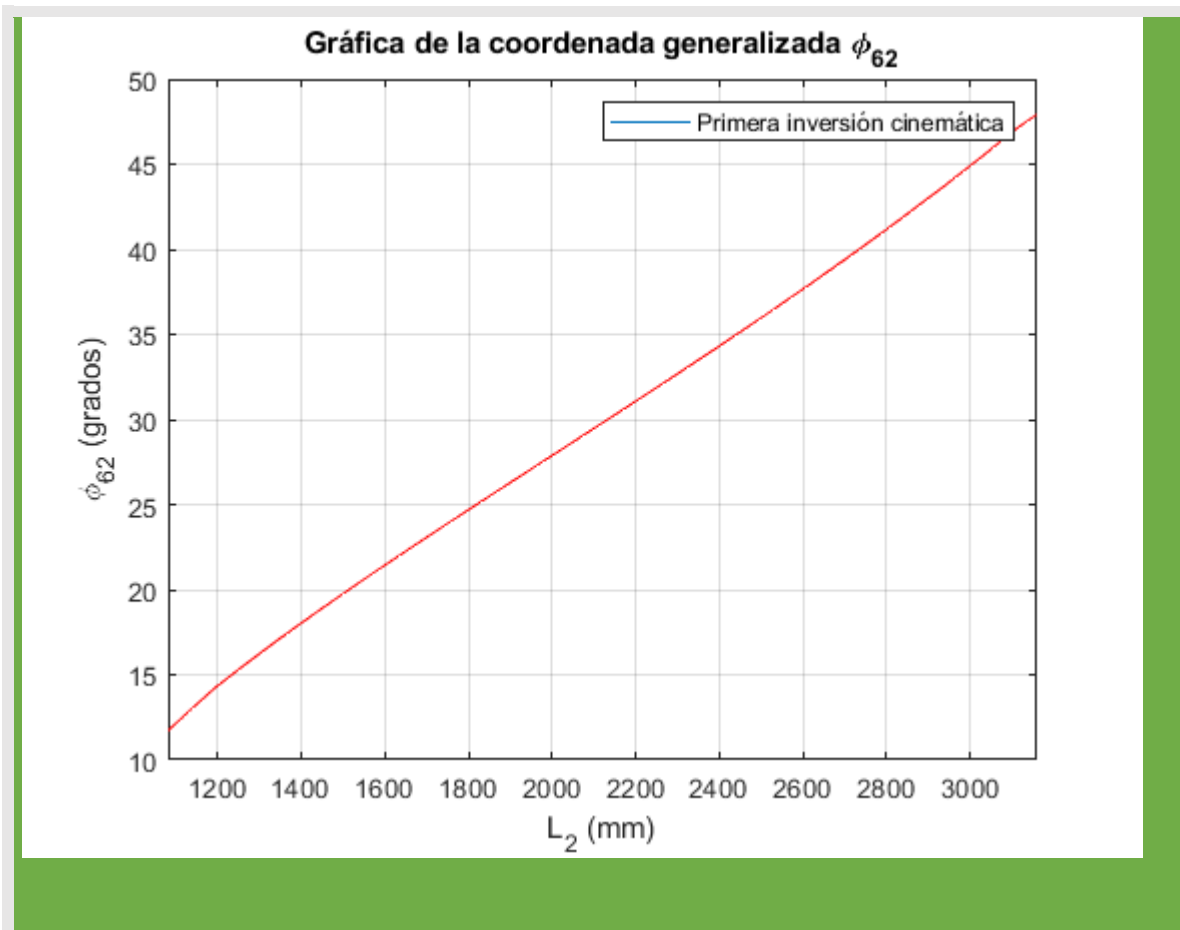
Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_{62} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (57).

$$\varphi_{62_2} = 2\pi - \varphi_{62_1} \quad (57)$$

Las Figuras 14 y 15 muestran los ángulos de salida φ_8 y φ_{62} como una función de la altura variable L_2 del ciclo III.





Resultado 3. Figuras 14 y 15. Ángulos de salida φ_8 y φ_{62} como una función de la altura variable L_2 . (Ciclo III, primera inversión cinemática)

¿Qué tenemos hasta ahora?

Gráficas de φ_{51} y φ_3 en función de L_2 , ciclo I, de φ_9 y φ_{71} en función de L_2 , ciclo II y de φ_8 y φ_{62} en función de L_2 , ciclo III, como se puede observar en la figura 38.

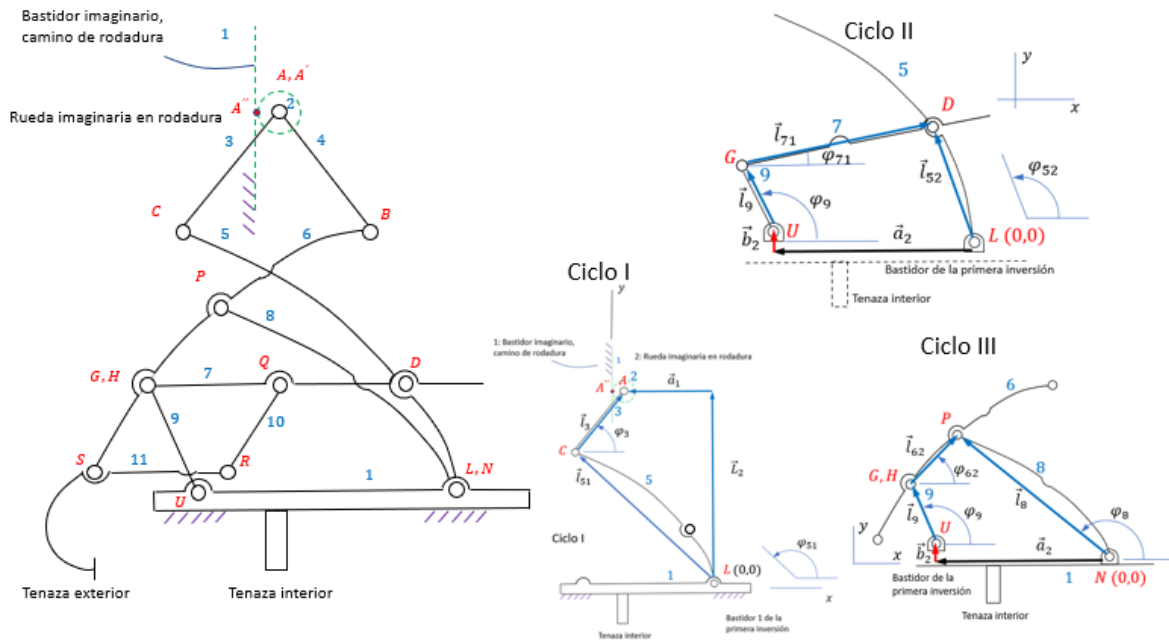


Figura 38. Primeros tres circuitos cinemáticos resueltos

15.4. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo IV durante la primera inversión cinemática

El ciclo cerrado IV involucra a los eslabones 1, 8, 6, 4 y 2. Estos eslabones conforman un ciclo cinemático cerrado de movilidad 3. Una de estas tres movilidades, es una movilidad local correspondiente al giro de la rueda respecto a su eje. Las otras dos, son las entradas φ_8 y φ_{63} , ya conocidas al resolver la cinemática de los ciclos anteriores. Es de hacer notar que el ángulo φ_{63} está relacionado con φ_{62} , hallado en el ciclo III anterior. Esta relación se indica en la ecuación (58), atendiendo la Figura 39.

Presentaremos las ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo IV durante la primera inversión

$$\varphi_{63} = \varphi_{62} - \beta_{62} \quad (58)$$

Se desarrollaron programas en Excel que nos permitieron calcular los diferentes ángulos que necesitábamos para diseñar, en especial el eslabón 5 y el 6. Este nos permitió conocer las “Beta” y las distancias que no conocíamos de los eslabones; posteriormente pudimos asegurar los valores con las mediciones realizadas en el software de CAD. Así comprobamos que nuestros cálculos trigonométricos son correctos.

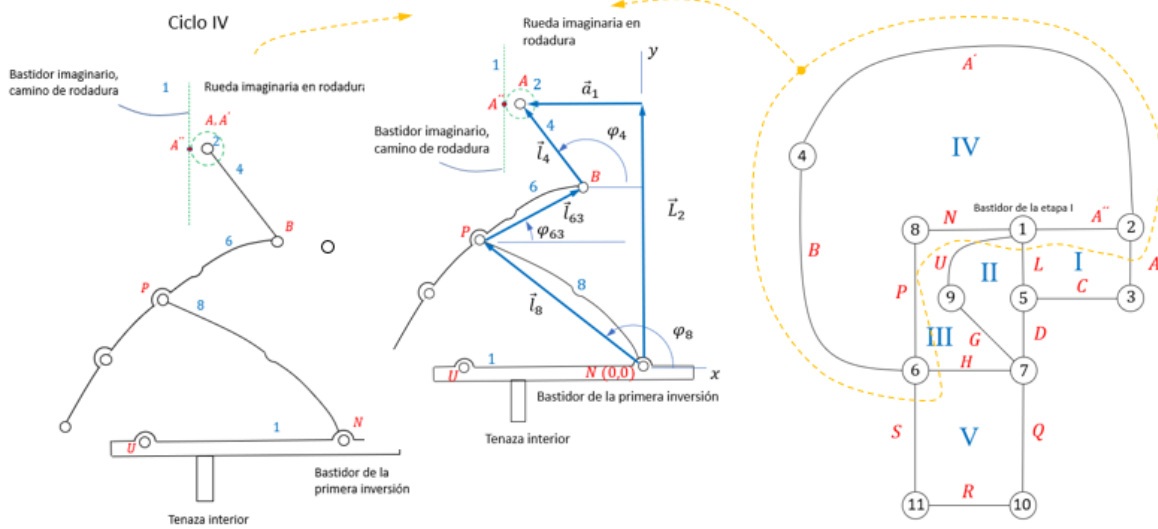


Figura 39. CICLO IV

En este caso podemos observar en la figura 40 podemos observar de igual manera que en el eslabón 5 una hoja de calculo que fue diseñada para conocer los ángulos para beta y fi del eslabón 6. Seguidamente en la figura 42 podemos ver el proceso y la geometría para el mismo eslabón 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ángulos del eslabón 6 (Triángulo SGP)												
2			l61	l62	l64		l61	l62	l64		l63	l65	
3			450	365	785		450	365	785		1785	2500	
4													
5	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	coseno del ángulo en S	0.97027601										
6		Ángulo en S en radianes	0.24442759										
7	Beta 63	S en grados (Beta 63)	14.0046694										
8													
9	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Coseno del ángulo en G	-0.85388128										
10		G en radianes	2.59419391										
11		Angulo G en grados	148.636365										
12													
13	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Coseno del ángulo en P	0.95445424										
14		P en radianes	0.30297116										
15		P en grados	17.358969										
16													
17		Suma de los tres ángulos	180.000003										
18													
19	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Beta 61	31.3636353										
20	Los puntos G, P y B de 6 NO están sobre la misma recta												
21		Beta 63=Ángulo en S	14.0046694										
22													
23	Eslabón 6 (Triángulo SPB)	coseno del ángulo PSB	0.93757962										
24		Ángulo PSB en radianes	0.35519233										
25	Beta 64	Ángulo PSB en grados (beta 64)	20.351022										

Figura 40. Programas realizados para conocer las Betas del eslabón 6

A pesar de ser este ciclo más complejo desde el punto de vista cinemático que los ciclos anteriores, es el más simple de resolver debido a que solo hay una variable desconocida, que es φ_4 . Los parámetros geométricos y las coordenadas generalizadas de este ciclo se muestran en la Figura 41.

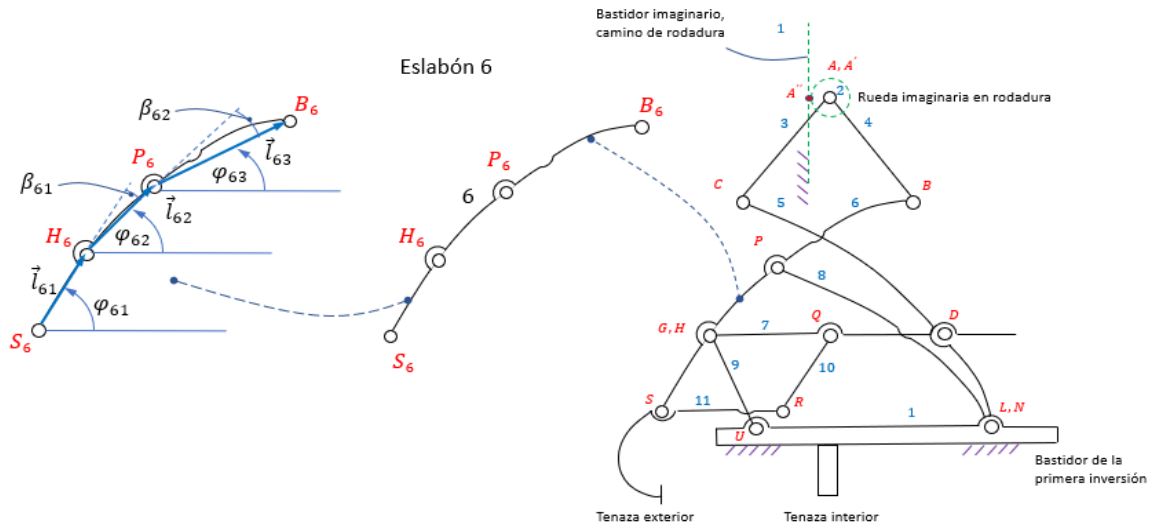


Figura 41. Geometría del eslabón 6

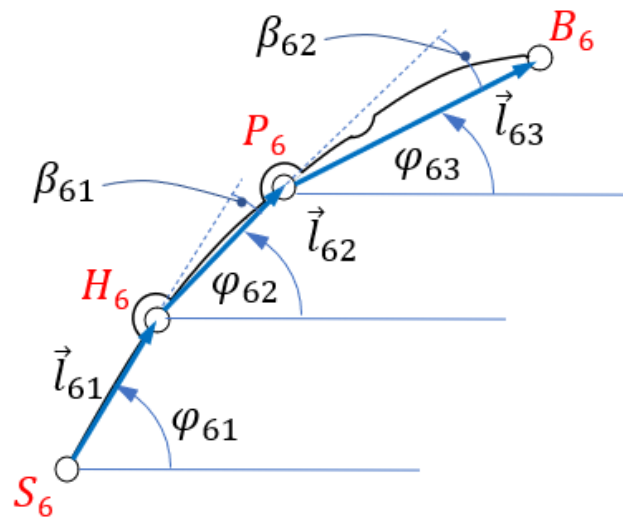


Figura 42. Relaciones geométricas entre los ángulos φ_{63} y φ_{62}
 $\varphi_{61} - \beta_{61} = \beta_{62}$

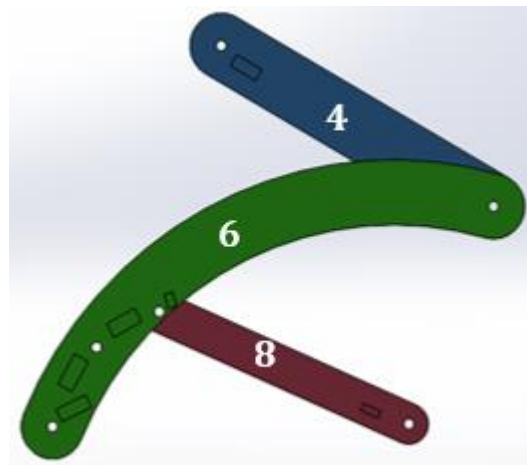


Figura 43. Cuarto subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo IV. Simulado en SolidWorks

De la ecuación de lazo vectorial cerrado en este ciclo, obtenida partiendo de la articulación N y regresando a N mediante un recorrido horario, se cumple (59).

$$\vec{l}_8 + \vec{l}_{63} + \vec{l}_4 - \vec{a}_1 - \vec{L}_2 = \vec{0} \quad (59)$$

Al proyectar cada vector de (58) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (60):

$$l_8 \cos \varphi_8 \vec{i} + l_8 \sin \varphi_8 \vec{j} + l_{63} \cos \varphi_{63} \vec{i} + l_{63} \sin \varphi_{63} \vec{j} + l_4 \cos \varphi_4 \vec{i} + l_4 \sin \varphi_4 \vec{j} - a_1 \vec{i} + L_2 \vec{j} = \vec{0} \quad (60)$$

Separando la ecuación (60) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (60.1) y (60.2).

$$l_8 \cos \varphi_8 + l_{63} \cos \varphi_{63} + l_4 \cos \varphi_4 - a_1 = 0 \quad (61)$$

$$l_8 \sin \varphi_8 + l_{63} \sin \varphi_{63} + l_4 \sin \varphi_4 - L_2 = 0 \quad (62)$$

15.4.1. Soluciones para φ_4 en el ciclo IV

Conocidas las variables φ_8 y φ_{63} , se puede obtener la variable φ_4 de cualquiera de estas dos ecuaciones (61) y (62). Despejándola de (61), se tiene la ecuación (63).

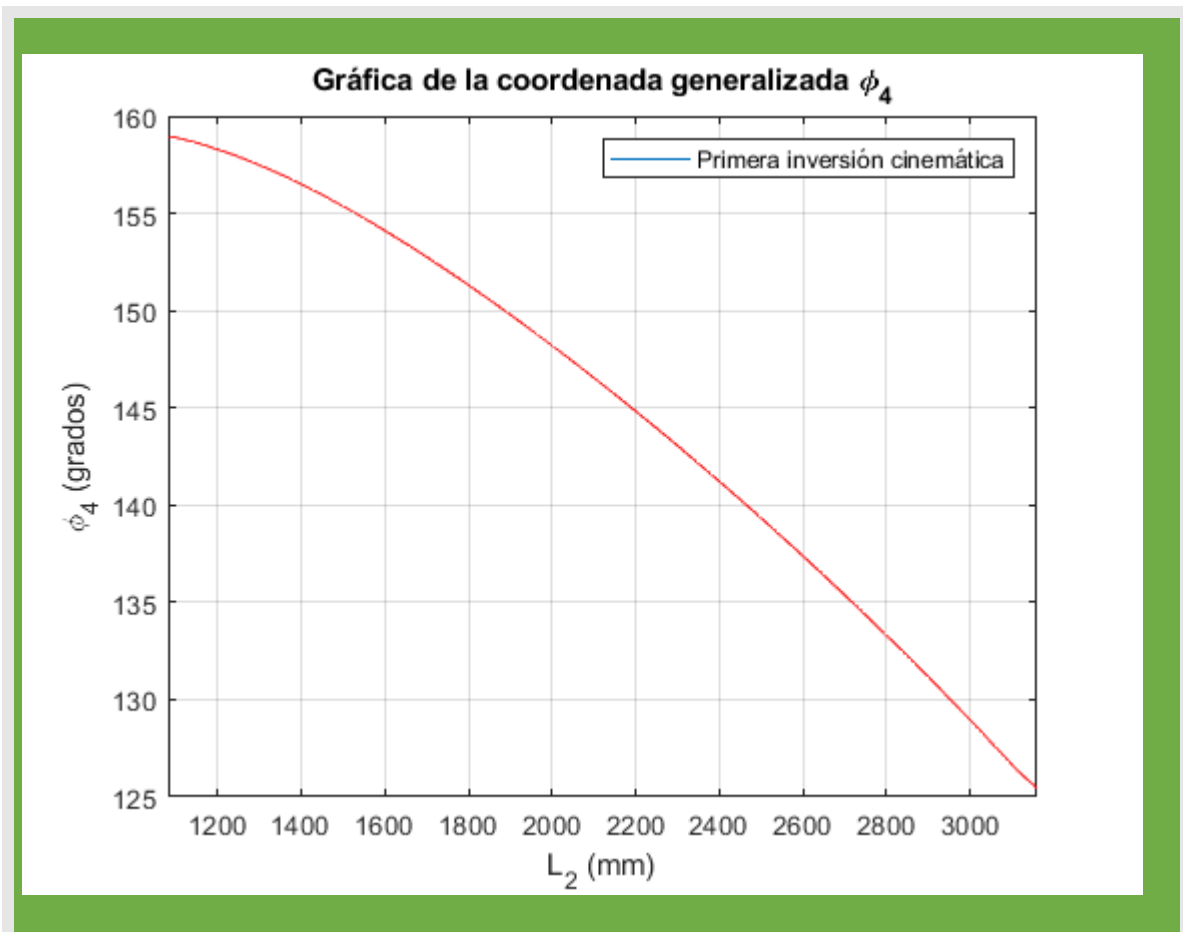
$$\varphi_{4_{1,2}} = \arccos\left(\frac{a_1 - l_8 \cos\varphi_8 - l_{63} \cos\varphi_{63}}{l_4}\right) \quad (64)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_4 y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (65).

$$\varphi_{4_2} = 2\pi - \varphi_{4_1} \quad (65)$$

Las Figuras 17 muestra el ángulo de salida φ_4 como una función de la altura variable L_2 . Del ciclo IV



Resultado 4. Figuras 17. Ángulo de salida φ_4 como una función de la altura variable L_2 . (Ciclo IV, primera inversión cinemática)

15.5. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo V durante la primera inversión cinemática

El ciclo cerrado V involucra a los eslabones 6, 7, 10 y 11. Estos eslabones conforman un ciclo cerrado de cuatro barras y conforman un paralelogramo articulado que contiene un

bastidor móvil. En este ciclo ya se conocen las coordenadas generalizadas, φ_{62} o φ_{72} . La variable φ_{62} es conocida del ciclo III y la variable φ_{72} lo es del ciclo II. Se determinarán las variables φ_{10} y φ_{11} . Los parámetros geométricos y las coordenadas generalizadas de este ciclo se muestran en la Figura 43.

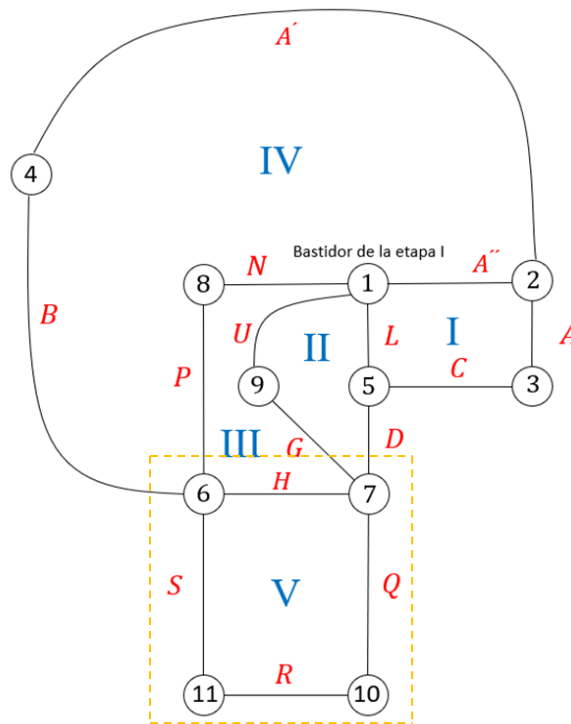


Figura 43. Ciclo V

De acuerdo con la Figura 16 O 17, se cumple la ecuación (66):

$$\varphi_{61} = \varphi_{62} + \beta_{61} \quad (66)$$

El ángulo variable φ_{72} se relaciona con el ángulo variable φ_{71} mediante la ecuación (67), conforme se indica en la Figura 44.

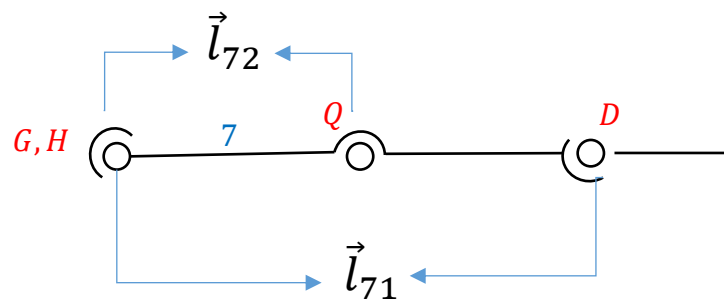


Figura 44. Figura 18. Relación mediante β_7 entre los ángulos φ_{72} y φ_{71} . β_7 es un parámetro geométrico.

$$\varphi_{72} = \varphi_{71} + \beta_7 \quad (67) \text{ CHECAR CON LA 126}$$

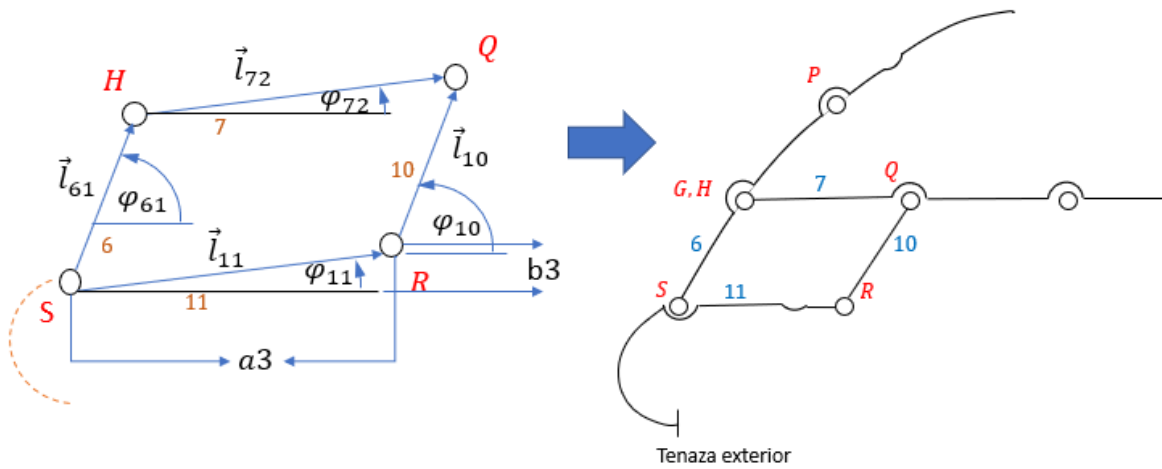


Figura 45. Figura 19. Ciclo V

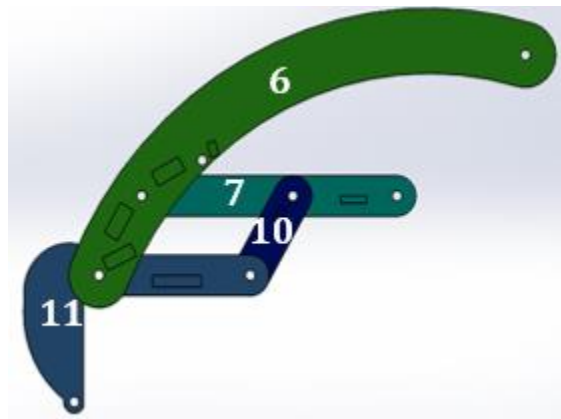


Figura 46. Quinto subciclo cinemático de la primera inversión, designado como ciclo V. Simulado en SolidWorks

De la ecuación de lazo vectorial para este ciclo, obtenida partiendo de la articulación S y regresando a S mediante un recorrido horario, se puede escribir la ecuación (68).

$$\vec{l}_{61} + \vec{l}_{72} - \vec{l}_{10} - \vec{l}_{11} = \vec{0} \quad (68)$$

Al proyectar cada vector de (68) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (69):

$$l_{61}\cos\varphi_{61}\vec{i} + l_{61}\sin\varphi_{61}\vec{j} + l_{72}\cos\varphi_{72}\vec{i} + l_{72}\sin\varphi_{72}\vec{j} - l_{10}\cos\varphi_{10}\vec{i} - l_{10}\sin\varphi_{10}\vec{j} - l_{11}\cos\varphi_{11}\vec{i} - l_{11}\sin\varphi_{11}\vec{j} = \vec{0} \quad (69)$$

Separando la ecuación (69) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (70.1) y (70.2), en el que tanto φ_{10} , como φ_{11} son incógnitas, siendo l_{61} , l_{72} , l_{10} y l_{11} , parámetros geométricos, y φ_{61} la coordenada de entrada conocida mediante (66).

$$l_{61}\cos\varphi_{61} + l_{72}\cos\varphi_{72} - l_{10}\cos\varphi_{10} - l_{11}\cos\varphi_{11} = 0 \quad (70.1)$$

$$l_{61}\sin\varphi_{61} + l_{72}\sin\varphi_{72} - l_{10}\sin\varphi_{10} - l_{11}\sin\varphi_{11} = 0 \quad (70.2)$$

Aislando en (70.1) y (70.2) la variable φ_{10} para hallar φ_{11} , se escriben las ecuaciones (71.1) y (72.2)

$$l_{10}\cos\varphi_{10} = l_{61}\cos\varphi_{61} + l_{72}\cos\varphi_{72} - l_{11}\cos\varphi_{11} \quad (71.1)$$

$$l_{10}\sin\varphi_{10} = l_{61}\sin\varphi_{61} + l_{72}\sin\varphi_{72} - l_{11}\sin\varphi_{11} \quad (71.2)$$

Elevando al cuadrado (71.1) y (72.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (73).

$$(l_{10}^2 - l_{11}^2 - l_{61}^2 - l_{72}^2) = 2l_{61}l_{72}(\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{72} + \sin\varphi_{61}\sin\varphi_{72}) - (2l_{11}l_{61}\cos\varphi_{61} + 2l_{11}l_{72}\cos\varphi_{72})\cos\varphi_{11} - (2l_{11}l_{61}\sin\varphi_{61} + 2l_{11}l_{72}\sin\varphi_{72})\sin\varphi_{11} \quad (73)$$

En la ecuación (73) se despejará la única incógnita que es φ_{11} . Para hacerlo, hay que notar que en (73), todos los términos entre paréntesis son conocidos. Por esta razón se agruparán estos términos entre paréntesis en las variables P , Q , R y K_{14} como se indica en las ecuaciones (74), (75), (76) y (77).

$$P = 2l_{61}l_{72}(\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{72} + \sin\varphi_{61}\sin\varphi_{72}) \quad (74)$$

$$Q = (2l_{11}l_{61}\cos\varphi_{61} + 2l_{11}l_{72}\cos\varphi_{72}) \quad (75)$$

$$R = (2l_{11}l_{61}\sin\varphi_{61} + 2l_{11}l_{72}\sin\varphi_{72}) \quad (76)$$

$$K_{14} = (-l_{10}^2 + l_{11}^2 + l_{61}^2 + l_{72}^2) \quad (77)$$

De esta forma, (73) se reduce a (78).

$$Q\cos\varphi_{11} + R\sin\varphi_{11} = S \quad (78)$$

$$\text{Donde } S = P + K_{14} \quad (79)$$

Reemplazando las identidades trigonométricas (80) y (81) en la ecuación (78), ésta última se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan\left(\frac{\varphi_{11}}{2}\right)$, mostrada en (82):

$$\cos \varphi_{11} = \frac{1 - (\tan g(\frac{\varphi_{11}}{2}))^2}{1 + (\tan g(\frac{\varphi_{11}}{2}))^2} \quad (80)$$

$$\text{sen } \varphi_{11} = \frac{2 \tan g(\frac{\varphi_{11}}{2})}{1 + (\tan g(\frac{\varphi_{11}}{2}))^2} \quad (81)$$

$$T (\tan g(\frac{\varphi_{11}}{2}))^2 + U (\tan g(\frac{\varphi_{11}}{2})) + V = 0 \quad (82)$$

En esta ecuación (82), los coeficientes T, U y V vienen dados en (83), (84) y (85).

$$T = Q + S \quad (83)$$

$$U = -2R \quad (84)$$

$$V = S - Q \quad (85)$$

15.5.1. Soluciones para φ_{11} en el ciclo V

La ecuación (82) tiene dos soluciones φ_{11_1} y φ_{11_2} como se muestra en la ecuación (86). En esta ecuación (86), el posible ángulo variable de salida φ_{11_1} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{11_2} con el signo negativo.

$$\varphi_{11_{1,2}} = 2 \arctan g \left(\frac{-U \pm \sqrt{U^2 - 4TV}}{2T} \right) \quad (86)$$

De (86) se deduce que φ_{11} es función de φ_{61} y φ_{72} , los cuales a su vez lo son finalmente de L_2 .

Se debe comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos ángulos φ_{11_1} o φ_{11_2} es el que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (87).

$$\varphi_{11_2} = 2\pi - \varphi_{11_1} \quad (87)$$

15.5.2. Soluciones para φ_{10} en el ciclo V

Determinado el valor correcto de φ_{11} a través de (86), se puede obtener φ_{10} , despejándolo de (71.1). Esto da como resultado la ecuación (88).

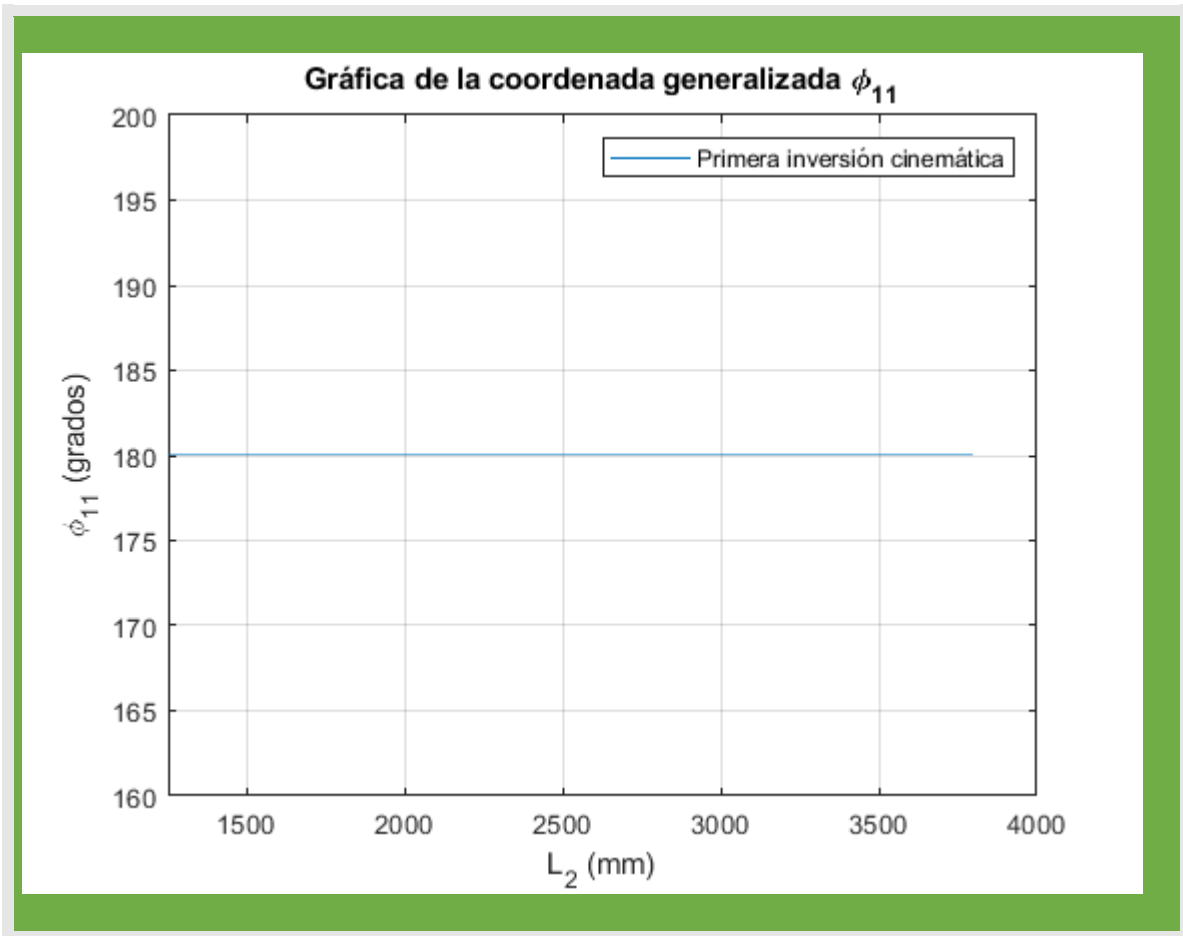
$$\varphi_{10_{1,2}} = \arccos \left(\frac{l_{61} \cos \varphi_{61} + l_{72} \cos \varphi_{72} - l_{11} \cos \varphi_{11}}{l_{10}} \right) \quad (88)$$

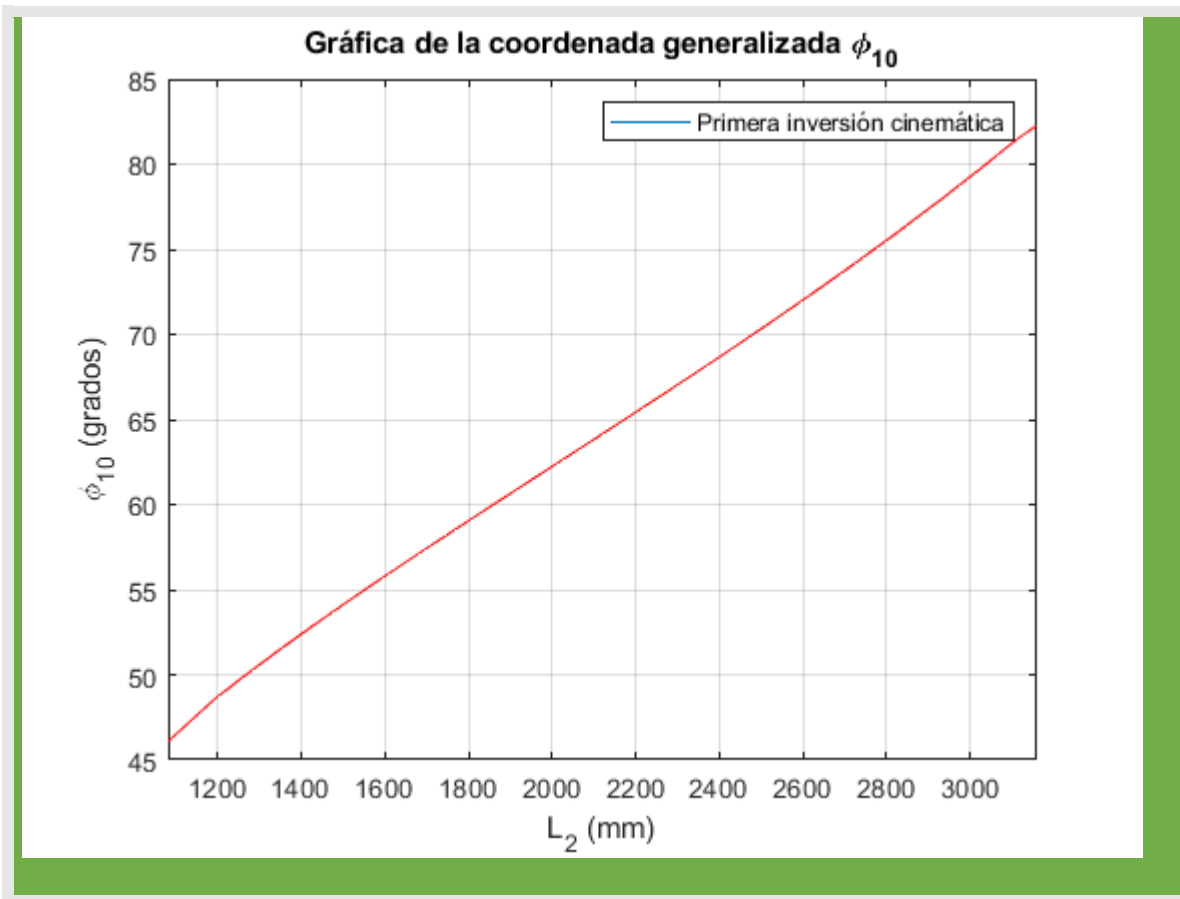
Nuevamente, hay dos valores posibles para ϕ_{10} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (89).

$$\phi_{10_2} = 2\pi - \phi_{10_1} \quad (89)$$

Las Figuras 20 y 21 muestran los ángulos de salida ϕ_{11} y ϕ_{10} como una función de la altura variable L_2 .





Resultado 5. Figuras 20 y 21. Ángulos de salida φ_{11} y φ_{10} como una función de la altura variable L_2 . (Ciclo V, primera inversión cinemática)

En la figura 47 y 48 podemos ver el resultado final de la simulación en SolidWorks para la primera inversión cinemática, pudiendo observar el desplazamiento de la pinza exterior logrando apretar la bobina. Seguidamente en el video 2 tenemos acceso a un video de la simulación de esta primera inversión, donde podemos observar su recorrido y funcionamiento.

NOTA: Como pudimos observar en el análisis, en esta primera inversión cinemática inicia la pinza exterior desde su posición más abierta hasta que esta toque el diámetro exterior de la masa. En este análisis obtenemos una distancia inicial entre pinzas de 1152mm y una distancia final de 634mm, con ello podemos deducir el rango de diámetros con el que podrá trabajar dándole una aplicación real.

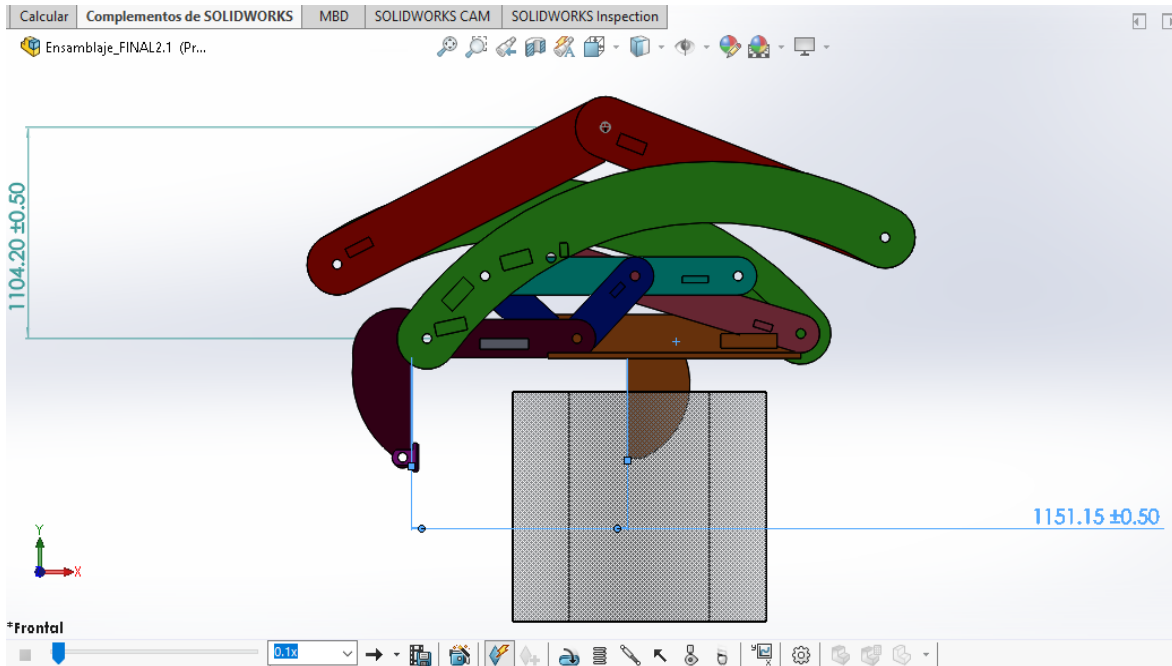


Figura 47. Primera inversión cinemática en su posición inicial

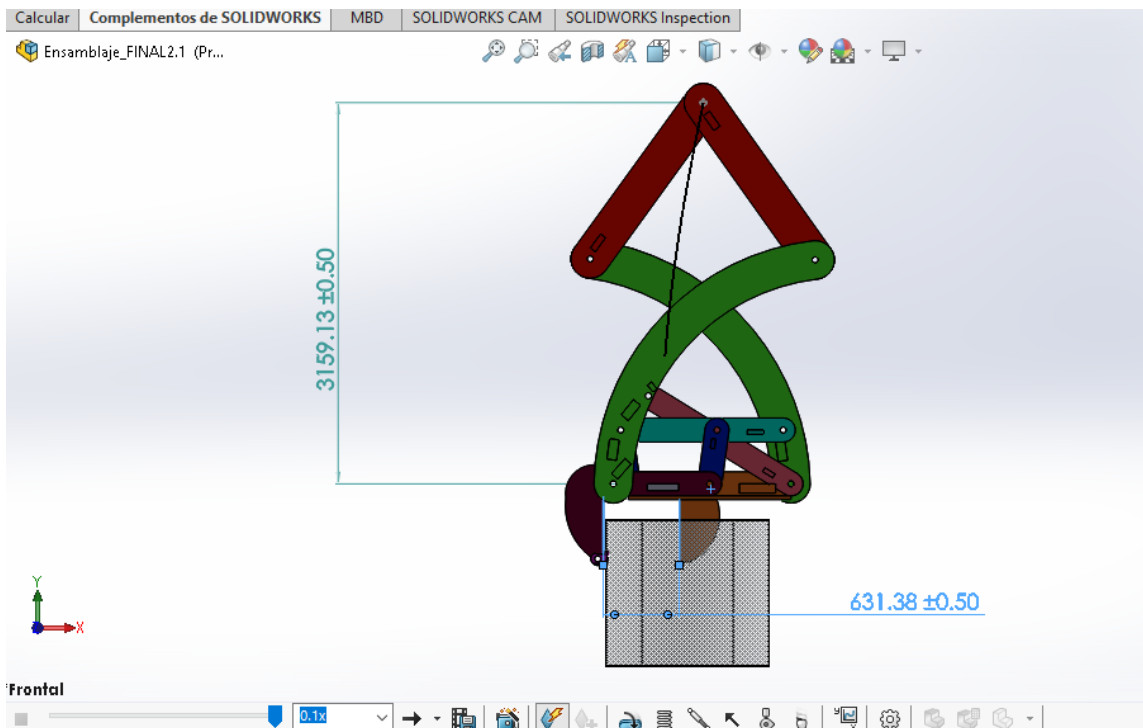


Figura 48. Primera inversión cinemática en su posición final



Simulacion_primera_inversion.mp4

Video 2. Video que simula la primera inversión cinemática

Link del video de la primera inversión cinemática: <https://n9.cl/xe8kb>

Como bien ya sabemos la pinza variara su altura desde 1110 hasta 3150 mm, dando una medición en grados que es la que nos interesa conocer. Presentaremos como ejemplo algunas imágenes con valores al azar, solo para demostrar el correcto funcionamiento de la pinza cargabobinas. Por si se desea ver la tabla completa, adjuntaremos el link por si la desean visualizar.

En la tabla 2 podemos apreciar la variación de la distancia lineal existente entre mordazas con respecto a la coordenada de entrada l2, que es la altura de la pinza.

Coordenada de entrada (l2)	Distancia entre mordazas
1100	1152
1150	1140
1200	1128
1250	1117
1300	1106
1350	1095
1400	1082
1450	1072
1500	1060
1550	1050
1600	1039
1650	1028
1700	1017
1750	1006
1800	995
1850	983
1900	970
1950	959
2000	947

Coordenada de entrada (I2)	Distancia entre mordazas
2050	936
2100	924
2150	913
2200	899
2250	887
2300	876
2350	861
2400	850
2450	835
2500	824
2550	811
2600	797
2650	786
2700	769
2750	758
2800	741
2850	727
2900	711
2950	698
3000	682
3050	667
3100	650
3150	634

Tabla 4. Distancia de la apertura de la mordaza exterior, respecto a la coordenada de entrada (I2, a1)

En la tabla 3 podemos apreciar la variación de la distancia lineal a1 con respecto a la coordenada de entrada I2, que es la altura de la pinza.

Coordenada de entrada (I2)	Distancia a1
1082.28	1044.56796
1092.414546	1043.74183
1102.549091	1042.89976
1112.683637	1042.04141
1122.818182	1041.1673
1132.952728	1040.27751
1143.087273	1039.37261
1153.221819	1038.4515

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a1
1163.356364	1037.51367
1173.49091	1036.56521
1183.625455	1035.59921
1193.76	1034.61487
1205.32	1033.62025
1216.88	1032.60923
1228.44	1031.58308
1240	1030.5413
1251.56	1029.48553
1263.12	1028.4139
1274.68	1027.32958
1286.24	1026.23344
1297.8	1025.1213
1309.36	1023.99227
1321.245	1022.84941
1333.13	1021.69069
1345.015	1020.51965
1356.9	1019.33579
1368.785	1018.13976
1380.67	1016.92641
1392.555	1015.69788
1404.44	1014.45552
1416.325	1013.19959
1428.21	1011.92799
1440.324	1010.64895
1452.438	1009.35148
1464.552	1008.04012
1476.666	1006.71507
1488.78	1005.3767
1500.894	1004.02434
1513.008	1002.65873
1525.122	1001.28284
1537.236	999.890303
1549.35	998.485371
1561.595	997.066215
1573.84	995.635487
1586.085	994.18996
1598.33	992.732614
1610.575	991.26126
1622.82	989.776854
1635.065	988.283556
1647.31	986.780516

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a1
1659.555	985.266452
1671.8	983.738949
1684.094	982.193737
1696.388	980.636602
1708.682	979.067277
1720.976	977.485593
1733.27	975.89301
1745.564	974.286407
1757.858	972.67665
1770.152	971.049713
1782.446	969.40978
1794.74	967.759638
1807.01	966.09684
1819.28	964.424933
1831.55	962.739671
1843.82	961.045083
1856.09	959.338244
1868.36	957.620386
1880.63	955.896538
1892.9	954.166045
1905.17	952.42354
1917.44	950.663696
1929.622	948.895217
1941.804	947.125007
1953.986	945.340343
1966.168	943.543972
1978.35	941.737826
1990.532	939.922317
2002.714	938.104314
2014.896	936.271592
2027.078	934.43029
2039.26	932.580148
2051.3	930.722326
2063.34	928.85528
2075.38	926.978823
2087.42	925.10242
2099.46	923.211322
2111.5	921.314343
2123.54	919.406278
2135.58	917.49321
2147.62	915.571753
2159.66	913.643515

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a1
2171.512	911.708283
2183.364	909.767339
2195.216	907.819084
2207.068	905.864507
2218.92	903.903097
2230.772	901.935247
2242.624	899.962139
2254.476	897.98401
2266.328	895.999542
2278.18	894.009525
2289.791	892.013936
2301.402	890.012583
2313.013	888.003428
2324.624	886.001856
2336.235	883.989135
2347.846	881.969173
2359.457	879.947343
2371.068	877.923926
2382.679	875.899842
2394.29	873.863499
2405.645	871.824701
2417	869.783721
2428.355	867.738556
2439.71	865.686076
2451.065	863.64469
2462.42	861.591044
2473.775	859.535699
2485.13	857.476393
2496.485	855.41459
2507.84	853.351327
2518.893	851.294705
2529.946	849.228461
2540.999	847.163552
2552.052	845.093568
2563.105	843.024856
2574.158	840.953052
2585.211	838.88293
2596.264	836.819791
2607.317	834.748421
2618.37	832.67564
2629.113	830.603366
2639.856	828.531088

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a1
2650.599	826.460571
2661.342	824.385019
2672.085	822.315749
2682.828	820.251539
2693.571	818.182954
2704.314	816.11784
2715.057	814.051233
2725.8	811.979337
2736.201	809.913364
2746.602	807.852233
2757.003	805.805541
2767.404	803.751438
2777.805	801.698329
2788.206	799.647778
2798.607	797.602996
2809.008	795.557949
2819.409	793.520289
2829.81	791.480772
2839.755	789.452722
2849.7	787.441634
2859.645	785.436243
2869.59	783.423135
2879.535	781.436806
2889.48	779.449581
2899.425	777.467423
2909.37	775.497572
2919.315	773.531654
2929.26	771.563125
2938.63	769.586115
2948	767.664442
2957.37	765.756464
2966.74	763.84155
2976.11	761.958937
2985.48	760.07197
2994.85	758.193951
3004.22	756.327196
3013.59	754.47272
3022.96	752.632333
3031.675	750.799232
3040.39	748.985606
3049.105	747.191226
3057.82	745.415752

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a1
3066.535	743.63726
3075.25	741.867751
3083.965	740.108952
3092.68	738.381406
3101.395	736.656822
3110.11	734.94627
3119.914	733.251427
3129.718	731.564502
3139.522	729.90168
3149.326	728.259911
3159.13	726.640184

Tabla 5. Distancia a1 respecto a la coordenada de entrada (l2, a1)

NOTA: Después de analizar los resultados de la primera inversión, la conclusión es que h es igual a cero. Podemos comprobarlo, viendo a que distancia vertical se encuentran los puntos S y R, de los puntos U y L cuando comienza la primera inversión cinemática.

El hecho es que los puntos S y R se mueven horizontalmente y estos puntos no se separan entonces verticalmente de los puntos U y L. Solo se separan horizontalmente de éstos. Y como h mide esa distancia vertical entre S y R de U y L, esta h es cero, porque desde un principio eso es lo que vale. Puedes comprobarlo en SolidWorks.

Podemos deducir que los puntos S y R solo se mueven horizontalmente y estos puntos no se separan, entonces son completamente verticales de los puntos U y L. Solo se separan horizontalmente de éstos. Y como h mide esa distancia vertical entre S y U o entre de R y L, esta distancia vertical llamada " h " es cero. Y siempre es cero porque desde un principio eso es lo que vale. Se comprobó en SolidWorks.

La trayectoria marcada en color negro representa la variación de distancia a1, la cual se comprueba que no es igual a cero. Sin embargo, se aprecia el correcto funcionamiento de la pinza, podemos observar que en cualquier altura que tome, los eslabones 5 y 6 son completamente horizontales todo el tiempo, lo cual nos indica que es simétrica y cargará parejo el peso.

➤ Capítulo III

En el tercer y último capítulo analizamos el segundo movimiento que tiene la pinza cargabobinas, el cual lo realiza la mordaza interior. Damos la solución a los ángulos de salida presentes en esta segunda inversión, para los ciclos VI, VII, VIII, IX y X.

Con esto concluimos el análisis de sus dos movimientos principales, cerrando las mordazas y así logrando sujetar la pieza.

16.1. Segunda inversión cinemática del mecanismo

Como se ha señalado anteriormente, el mecanismo de pinzas carga bobinas se mueve de tal manera que se presenta una inversión cinemática durante la operación. Esto ocurre cuando la pinza exterior topa con la superficie cilíndrica exterior de la bobina y al hacerlo, se detiene, convirtiéndose en el bastidor del mecanismo. Cuando esto ocurre, la tenaza interior, antes detenida durante toda la primera inversión, comienza a desplazarse hacia la izquierda, como se indica en la Figura 4. Teniendo esto en cuenta, todos los eslabones continuarán siendo etiquetados con los números de eslabones que fueron asignados durante la primera inversión cinemática. Esto es, la pinza exterior, convertida ahora en bastidor, seguirá siendo el eslabón 11 y la pinza interior, convertida ahora en un elemento móvil, seguirá siendo el eslabón 1, como se indica en la Figura 49.

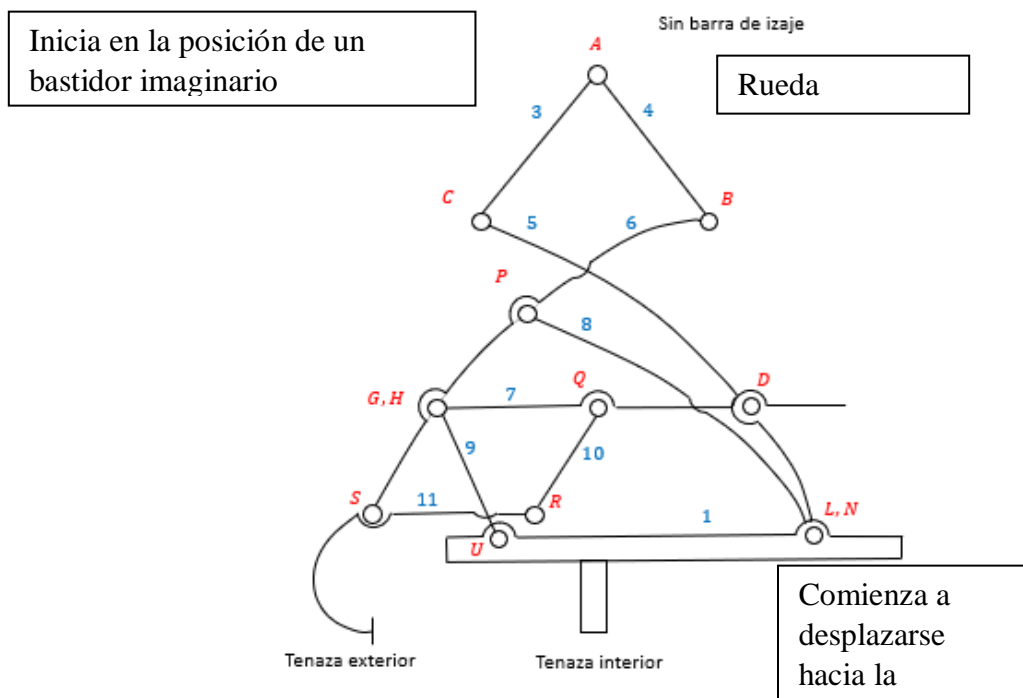


Figura 49. Segunda inversión cinemática. 11 está detenido y 1 se mueve a la izquierda.

En la Figura 49 también se observa el diagrama de vinculaciones cinemáticas durante la segunda inversión. El eslabón 11 es ahora el bastidor y el eslabón 1 se mueve.

OJO CON IMÁGENES 20

16.2. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VI durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).

La primera inversión cinemática ya analizada del mecanismo contiene cinco subciclos cinemáticos, designados como I, II, III, IV y V. La segunda inversión cinemática define otros cinco ciclos, que serán denotados como VI, VII, VIII, IX y X, para diferenciarlos de los anteriores. Seguidamente en las Figuras 50 y 51 tenemos todos los ángulo y medidas presentes en esta segunda inversión, dicho dibujo fue realizado en un software de CAD.

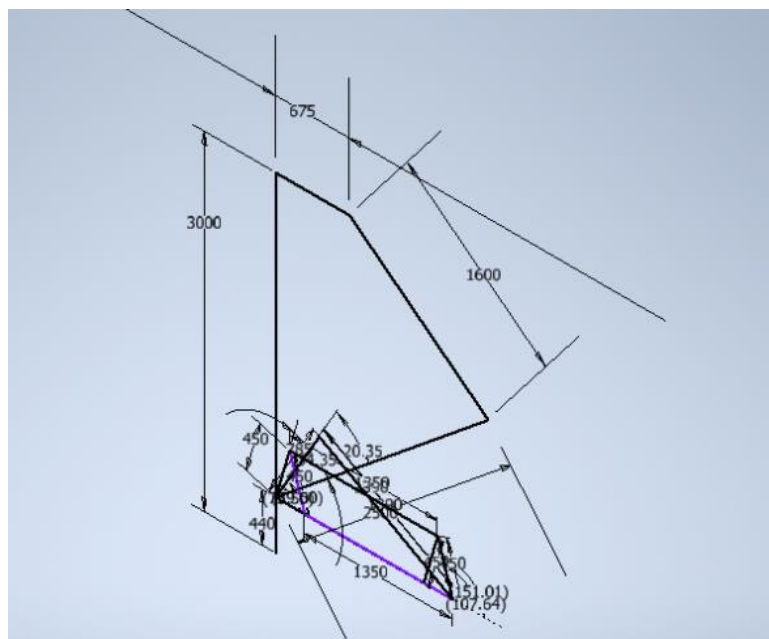


Figura 50. Diagrama cinemático A de todos los ciclos incluidos en la segunda inversión cinemática

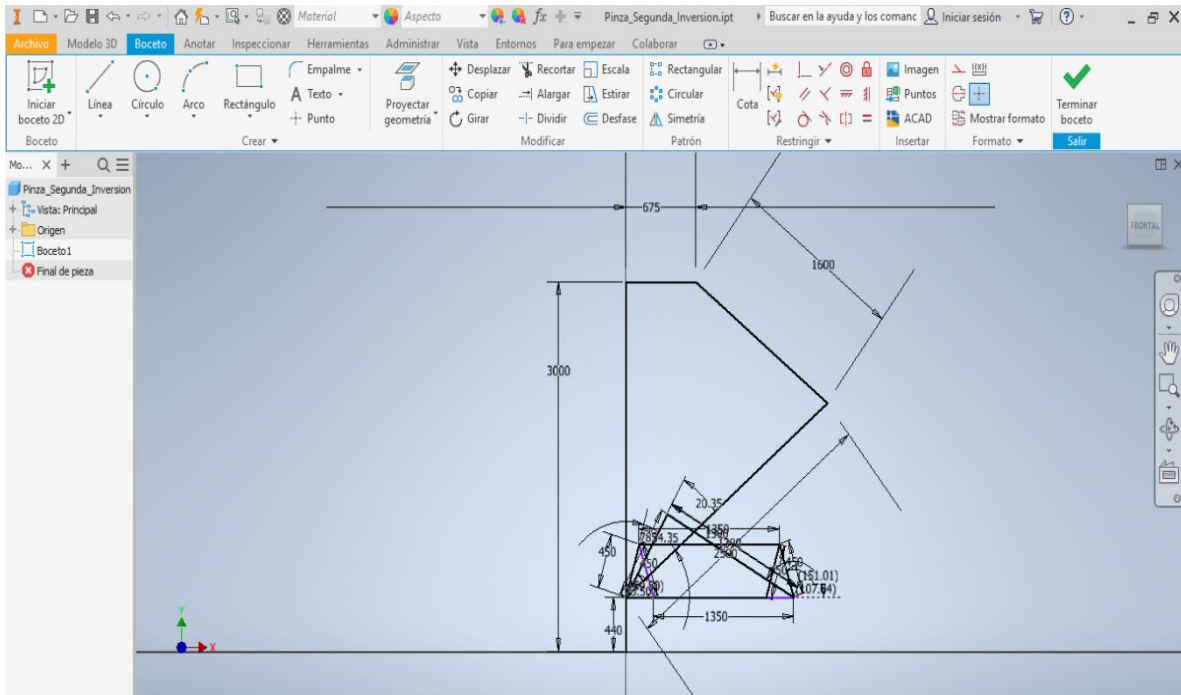


Figura 51. Diagrama cinemático B de todos los ciclos incluidos en la segunda inversión cinemática

CHECAR SI PONER O NO LAS IMÁGENES DE TODOS LOS CICLOS

El subciclo cinemático VI correspondiente a la segunda inversión, mostrado en la Figura 52, contiene a los eslabones 11, 2, 4 y 6. Es un subciclo de movilidad 2, en el que el giro de la rueda 2 respecto a su eje es una movilidad local. La movilidad que queda es la equivalente a la de un mecanismo de manivela-corredera con corrimiento horizontal a_3 .

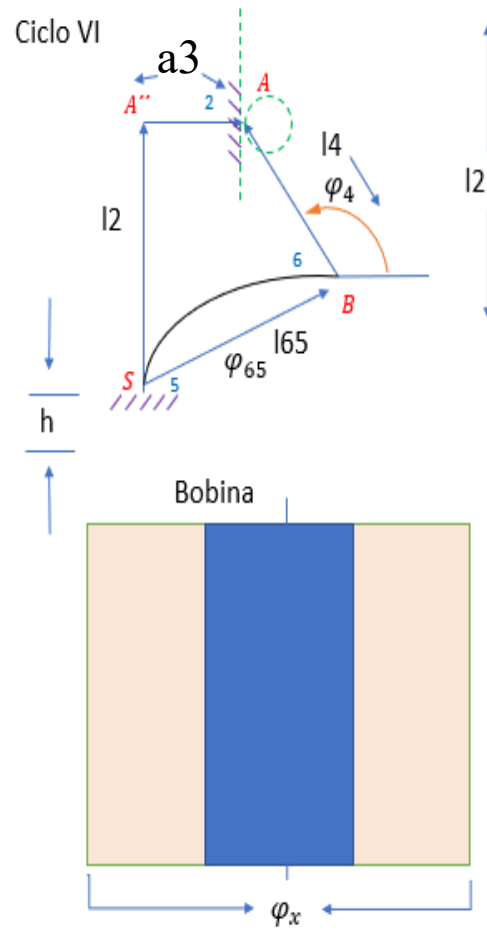


Figura 52. Primer subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo VI

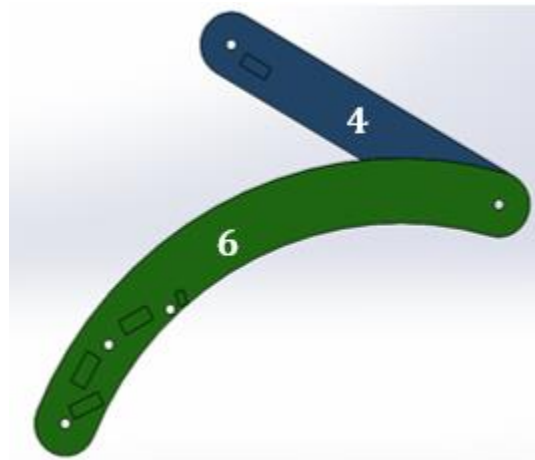


Figura 53. Primer subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo VI. Simulado en SolidWorks.

La coordenada de entrada de este mecanismo sigue siendo la altura variable L_2 y las coordenadas de salida en este subciclo son los ángulos variables que forman los eslabones 4 y 6 (en su tramo S_6B_6) respecto a la horizontal positiva, como se representa en la Figura 53.

El vector \vec{l}_2 de la Figura 21, está relacionado con los vectores \vec{L}_2 y \vec{h} , mediante la ecuación (90).

$$\vec{l}_2 = \vec{L}_2 - \vec{h} \quad (90)$$

El valor de h en la Figura 21, es variable en la práctica, y depende de la excentricidad “e” a la que queda el eje de la protuberancia cilíndrica de la pinza interior 1, respecto al eje de la bobina, durante el proceso de posicionamiento que efectúa el operador de la grúa.

El valor de h en la Figura 21, es variable en la práctica y depende de la excentricidad “e” a la que queda el eje de la protuberancia cilíndrica de la pinza interior 1, respecto al eje de la bobina, durante el proceso de posicionamiento que efectúa el operador de la grúa.

Con estas consideraciones, partiendo de S y haciendo un recorrido anti horario, el lazo vectorial cerrado de vectores, en este ciclo VI, permite escribir la ecuación (91).

16.2.1. Soluciones para φ_{65} en el ciclo VI

Conocido de (90) el vector \vec{l}_2 , esto es, conocido el vector vertical que va desde la articulación S en la pinza exterior fija hasta la cota de las articulaciones A, A' y A'', se obtendrán los ángulos de salida variable φ_4 y φ_{65} .

$$\vec{l}_{65} + \vec{l}_4 - \vec{a}_3 - \vec{l}_2 = \vec{0} \quad (91)$$

Al proyectar cada vector en sus componentes verticales y horizontales se cumple (92):

$$l_{65} \cos \varphi_{65} \vec{i} + l_{65} \sin \varphi_{65} \vec{j} + l_4 \cos \varphi_4 \vec{i} + l_4 \sin \varphi_4 \vec{j} - a_3 \vec{i} - l_2 \vec{j} = \vec{0} \quad (92)$$

Esta ecuación vectorial es cualitativamente igual a la ecuación (5) considerada en el ciclo I.

Separando la ecuación (92) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones (93.1) y (93.2), en el que tanto φ_{65} , como φ_4 son incógnitas y l_{65} , a_3 y l_4 son parámetros geométricos, siendo l_2 es la coordenada variable de entrada.

$$l_{65} \cos \varphi_{65} + l_4 \cos \varphi_4 - a_3 = 0 \quad (93.1)$$

$$l_{65} \sin \varphi_{65} + l_4 \sin \varphi_4 - l_2 = 0 \quad (93.2)$$

Aislado la variable de salida φ_{65} en el miembro izquierdo de las ecuaciones (93.1) y (93.2), estas dos ecuaciones se pueden escribir como en (94.1) y (94.2).

$$l_{65} \cos \varphi_{65} = a_3 - l_4 \cos \varphi_4 \quad (94.1)$$

$$l_{65} \sin \varphi_{65} = l_2 - l_4 \sin \varphi_4 \quad (94.2)$$

Elevando al cuadrado (94.1) y (94.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (95).

$$a_3^2 + l_2^2 + l_4^2 - l_{65}^2 = 2a_3 l_4 \cos \varphi_4 + 2l_2 l_4 \sin \varphi_4 \quad (95)$$

Reemplazando las identidades (9) y (10) en (8), la ecuación (8) se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)$ dada en (98):

$$\cos \varphi_4 = \frac{1 - \left(\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)\right)^2}{1 + \left(\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)\right)^2} \quad (96)$$

$$\sin \varphi_4 = \frac{2 \tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)}{1 + \left(\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)\right)^2} \quad (97)$$

$$X' \left(\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)\right)^2 + Y' \left(\tan\left(\frac{\varphi_4}{2}\right)\right) + Z' = 0 \quad (98)$$

16.2.2. Soluciones para φ_4 en el ciclo VI

Cuyas dos soluciones φ_{4_1} y φ_{4_2} vienen dadas por la ecuación (99). En esta ecuación (99), el posible ángulo variable de salida φ_{4_1} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{4_2} con el signo negativo.

$$\varphi_{4_{1,2}} = 2 \operatorname{arc\,tang} \left(\frac{-Y' \pm \sqrt{Y'^2 - 4X'Z'}}{2X'} \right) \quad (99)$$

Siendo:

$$X' = l_2^2 + 2a_3l_4 + a_3^2 + l_4^2 - l_{65}^2 \quad (100)$$

$$Y' = -4l_2l_4 \quad (101)$$

$$Z' = l_2^2 - 2a_3l_4 + a_3^2 + l_4^2 - l_{65}^2 \quad (102)$$

Hay dos valores posibles para φ_4 durante la segunda inversión cinemática, de acuerdo con (98). Se debe comprobar en el mecanismo real, cuál de los dos es el ángulo que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

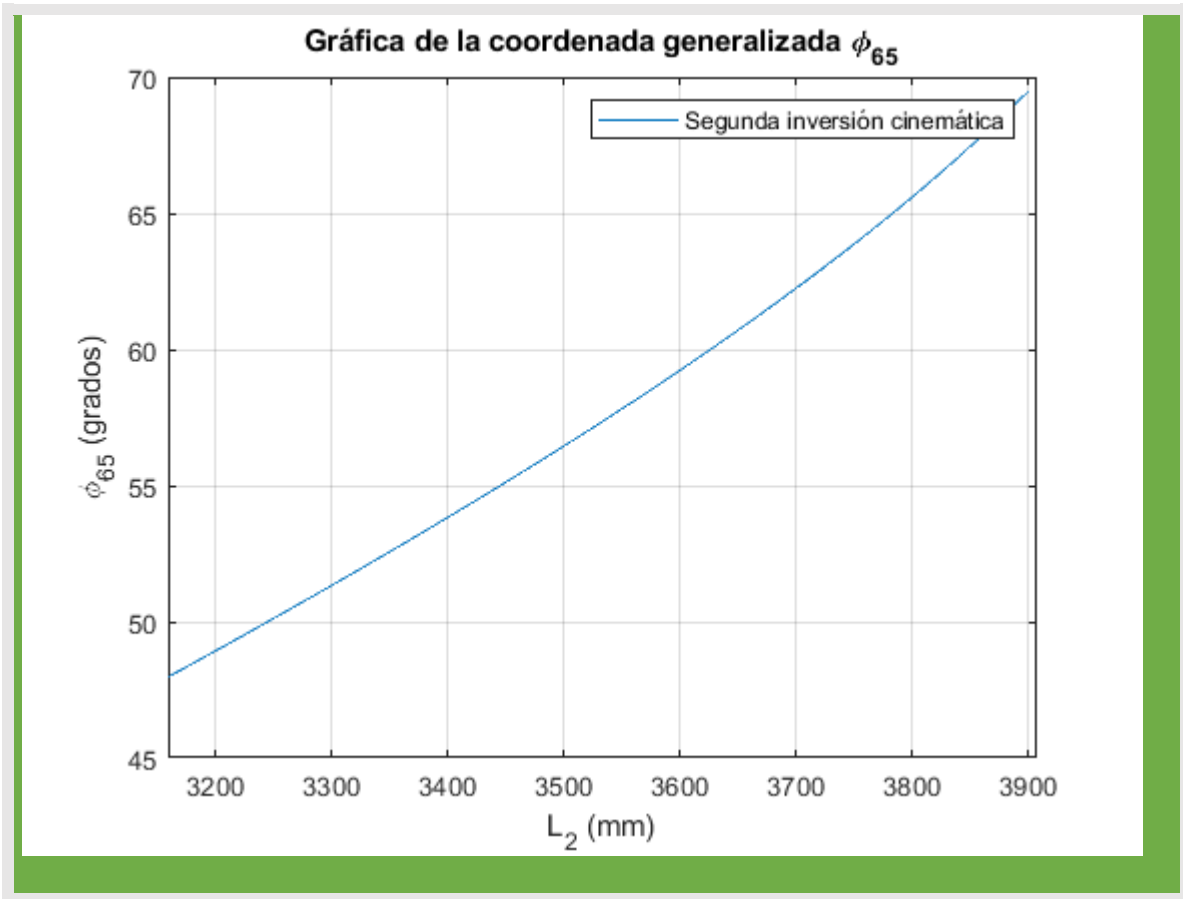
Conocido el valor correcto de φ_4 a través de (99), se puede obtener φ_{65} , despejándola de (94.1). Esto da como resultado la ecuación (103).

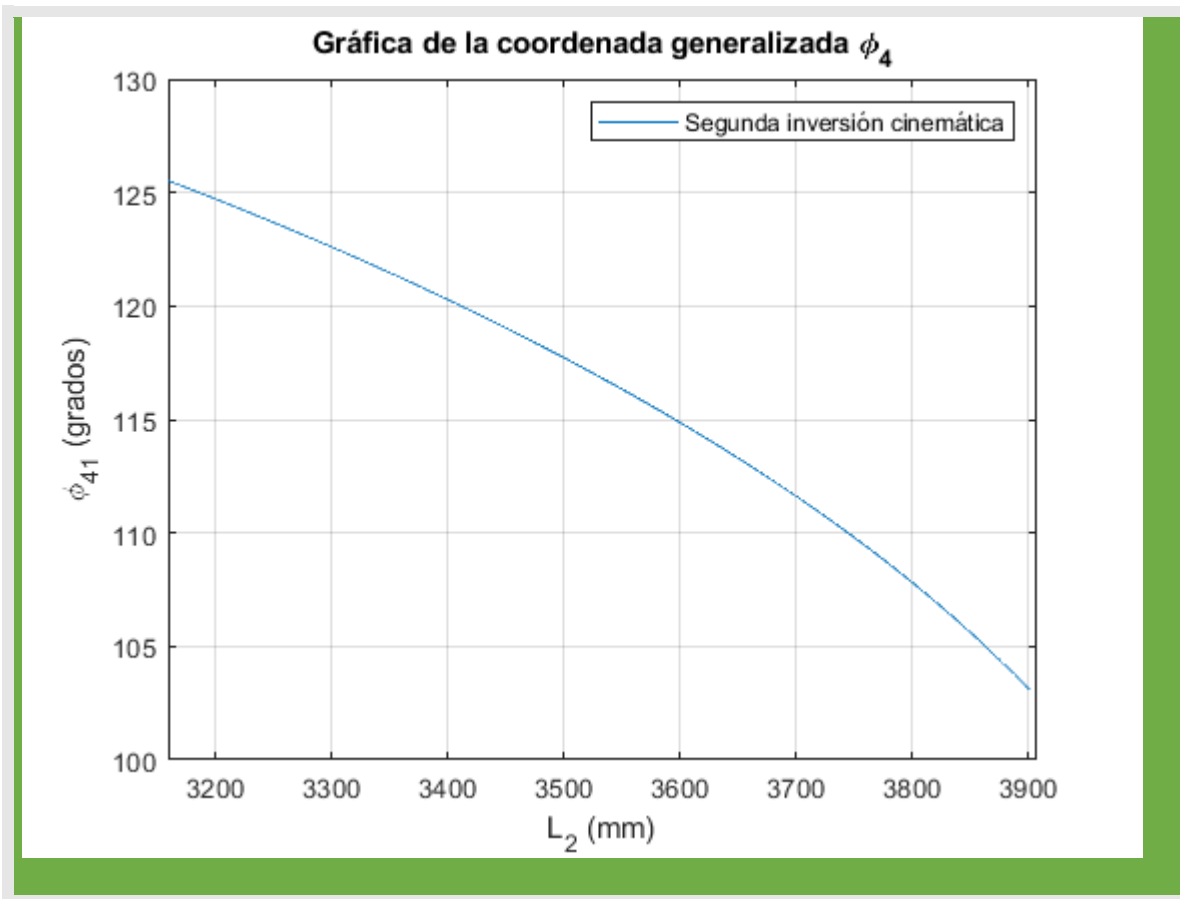
$$\varphi_{65_{1,2}} = \operatorname{arc\,cos} \left(\frac{a_3 - l_4 \cos \varphi_4}{l_{65}} \right) \quad (103)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_{65} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre. La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (104).

$$\varphi_{65_2} = 2\pi - \varphi_{65_1} \quad (104)$$

Las Figuras 22 y 23 muestran los ángulos de salida φ_4 y φ_{65} como una función de la altura variable l_2 para una excentricidad “e” máxima.





Resultado 6. Figuras 22 y 23. Gráficas de ϕ_{65} y ϕ_4 en función de la coordenada generalizada de entrada L_2 . (Ciclo VI, segunda inversión cinemática)

16.3. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VII durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).

El segundo ciclo de la segunda inversión cinemática, designado como ciclo VII, está conformado por los eslabones 11, 6, 7 y 10. Este ciclo se muestra en la Figura 54. Éste es un ciclo de cuatro barras de movilidad 1.

Ciclo VII

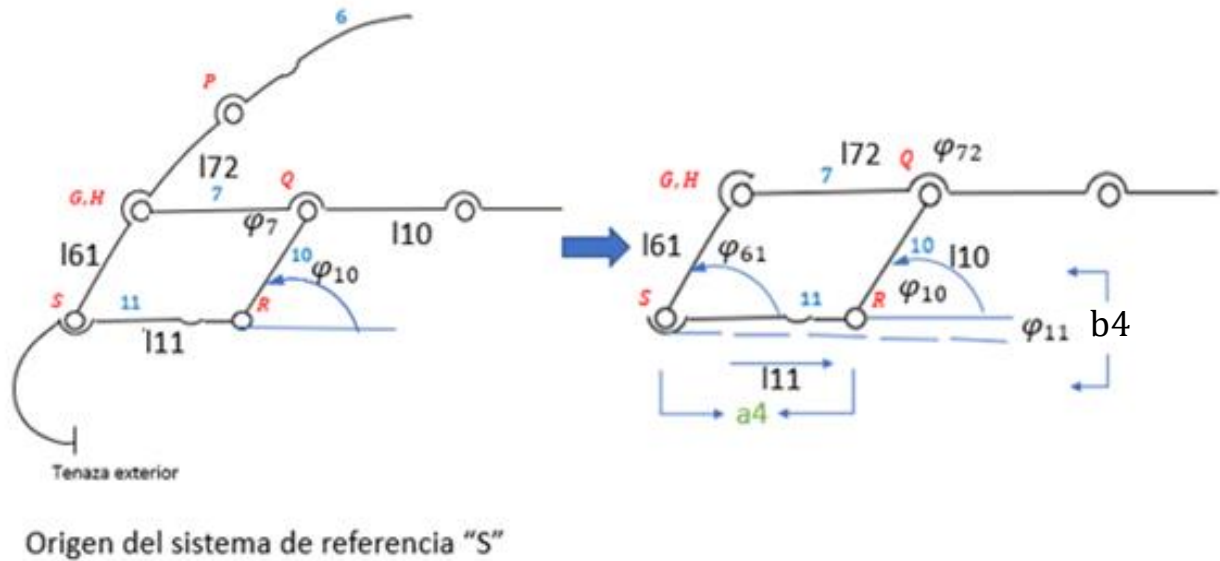


Figura 54. Figura 24. Ciclo VII en la segunda inversión cinemática.

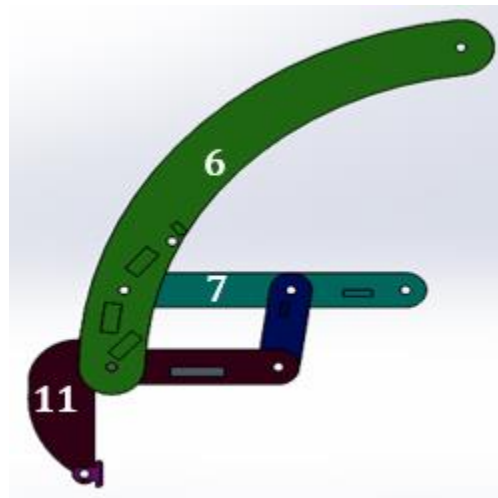


Figura 55. Segundo subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo VII. Simulado en SolidWorks.

En el ciclo VII el eslabón 11, correspondiente a la pinza exterior, está detenido. En este ciclo VII, el ángulo φ_{61} es conocido a partir del ángulo anterior φ_{65} .

Partiendo de S y regresando a S, mediante un recorrido horario se escribe la ecuación de lazo vectorial (105).

$$\vec{l}_{61} + \vec{l}_{72} - \vec{l}_{10} - \vec{b}_4 - \vec{a}_4 = \vec{0} \quad (105)$$

Al proyectar cada vector de (105) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (106):

$$l_{61}\cos\varphi_{61}\vec{i} + l_{61}\sin\varphi_{61}\vec{j} + l_{72}\cos\varphi_{72}\vec{i} + l_{72}\sin\varphi_{72}\vec{j} - l_{10}\cos\varphi_{10}\vec{i} - l_{10}\sin\varphi_{10}\vec{j} - l_{11}\cos\varphi_{11}\vec{i} - l_{11}\sin\varphi_{11}\vec{j} = \vec{0} \quad (106)$$

Siendo los vectores \vec{a}_4 y \vec{b}_4 en (105) las proyecciones sobre los ejes x y y del vector \vec{l}_{11} .
Esto es,

$$\vec{a}_4 = l_{11}\cos\varphi_{11}\vec{i} \quad (107)$$

$$\vec{b}_4 = l_{11}\sin\varphi_{11}\vec{j} \quad (108)$$

Separando la ecuación (106) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (109.1) y (109.2), en el que tanto φ_{72} , como φ_{10} son incógnitas, siendo l_{61} , l_{71} , l_{72} , l_{11} y b_2 , parámetros geométricos y φ_{61} , la coordenada de entrada conocida hallada en (16).

$$l_{61}\cos\varphi_{61} + l_{72}\cos\varphi_{72} - l_{10}\cos\varphi_{10} - l_{11}\cos\varphi_{11} = 0 \quad (109.1)$$

$$l_{61}\sin\varphi_{61} + l_{72}\sin\varphi_{72} - l_{10}\sin\varphi_{10} - l_{11}\sin\varphi_{11} = 0 \quad (109.2)$$

Aislando la variable de salida φ_{10} en el miembro izquierdo de las ecuaciones (109.1) y (109.2), estas dos ecuaciones, se pueden escribir como en (110.1) y (110.2).

$$l_{10}\cos\varphi_{10} = l_{61}\cos\varphi_{61} + l_{72}\cos\varphi_{72} - l_{11}\cos\varphi_{11} \quad (110.1)$$

$$l_{10}\sin\varphi_{10} = l_{61}\sin\varphi_{61} + l_{72}\sin\varphi_{72} - l_{11}\sin\varphi_{11} \quad (110.2)$$

Elevando al cuadrado (110.1) y (110.2) y sumando ambos términos, se llega a la ecuación (111).

$$l_{10}^2 - l_{61}^2 - l_{72}^2 - a_4^2 - b_4^2 = 2l_{61}l_{72}(\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{72} + \sin\varphi_{61}\sin\varphi_{72}) - 2l_{61}a_4\cos\varphi_{61} - 2l_{72}a_4\cos\varphi_{72} - 2l_{61}b_4\sin\varphi_{61} - 2l_{72}b_4\sin\varphi_{72} \quad (111)$$

En la ecuación (111), los términos a_4 y b_4 vienen dados por (112) y (113), siendo $\varphi_{11} = 0^\circ$ en la segunda inversión.

$$a_4 = l_{11}\cos\varphi_{11} \quad (112)$$

$$b_4 = l_{11}\sin\varphi_{11} \quad (113)$$

En esta ecuación (111), la incógnita es φ_{72} , siendo la variable φ_{61} , la entrada.

Para simplificar la expresión (111), se dividirá ésta por el término $2l_{61}l_{72}$ y se definirán las constantes K_4' , K_5' , K_6' , K_7' y K_8' dadas en (114), (115), (116), (117) y (118).

$$K_4' = \frac{a_4}{l_{72}} \quad (114)$$

$$K_5' = \frac{a_4}{l_{61}} \quad (115)$$

$$K_6' = \frac{l_{61}^2 + l_{72}^2 + a_4^2 + b_4^2 - l_{10}^2}{2l_{61}l_{72}} \quad (116)$$

$$K_7' = \frac{b_4}{l_{72}} \quad (117)$$

$$K_8' = \frac{b_4}{l_{61}} \quad (118)$$

De esta manera, la ecuación (111) se puede expresar como se escribe en (119).

$$K_6' + (\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{72} + \sen\varphi_{61}\sen\varphi_{72}) - K_4'\cos\varphi_{61} - K_5'\cos\varphi_{72} - K_7'\sen\varphi_{61} - K_8'\sen\varphi_{72} = 0 \quad (119)$$

En esta ecuación (119) se desea despejar φ_{72} .

Reemplazando las identidades trigonométricas (120) y (121) en la ecuación (119), ésta última se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right)$, dada en (122):

$$\cos\varphi_{72} = \frac{1 - (\tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right))^2}{1 + (\tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right))^2} \quad (120)$$

$$\sen\varphi_{72} = \frac{2 \tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right)}{1 + (\tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right))^2} \quad (121)$$

$$A' (\tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right))^2 + B' \tan\left(\frac{\varphi_{72}}{2}\right) + C' = 0 \quad (122)$$

Estando los coeficientes A' , B' y C' expresados como se indica en (123), (124) y (125).

$$A' = -(1 + K_4')\cos\varphi_{61} + K_5' + K_6' - K_7'\sen\varphi_{61} \quad (123)$$

$$B' = 2\sen\varphi_{61} - 2K_8' \quad (124)$$

$$C' = (1 - K_4')\cos\varphi_{61} - K_7'\sen\varphi_{61} - K_5' + K_6' \quad (125)$$

16.3.1. Soluciones para φ_{72} en el ciclo VII

La ecuación (122) tiene dos soluciones, φ_{72_1} y φ_{72_2} , como se muestra en la ecuación (126). En esta ecuación (126), el posible ángulo variable de salida φ_{72_1} , se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{72_2} , con el signo negativo.

$$\varphi_{72_{1,2}} = 2 \operatorname{arc\,tang} \left(\frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{2A'} \right) \quad (126)$$

De (126) se deduce que φ_{72} es función de φ_{61} , el cual a su vez es función de l_2 .

Se debe comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos ángulos φ_{72_1} o φ_{72_2} es el que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (127).

$$\varphi_{72_2} = 2\pi - \varphi_{72_1} \quad (127)$$

16.3.2. Soluciones para φ_{10} en el ciclo VII

Conocido el valor correcto de φ_{72} a través de (126), se puede obtener φ_{10} , despejándola de (110.1). Esto da como resultado la ecuación (128).

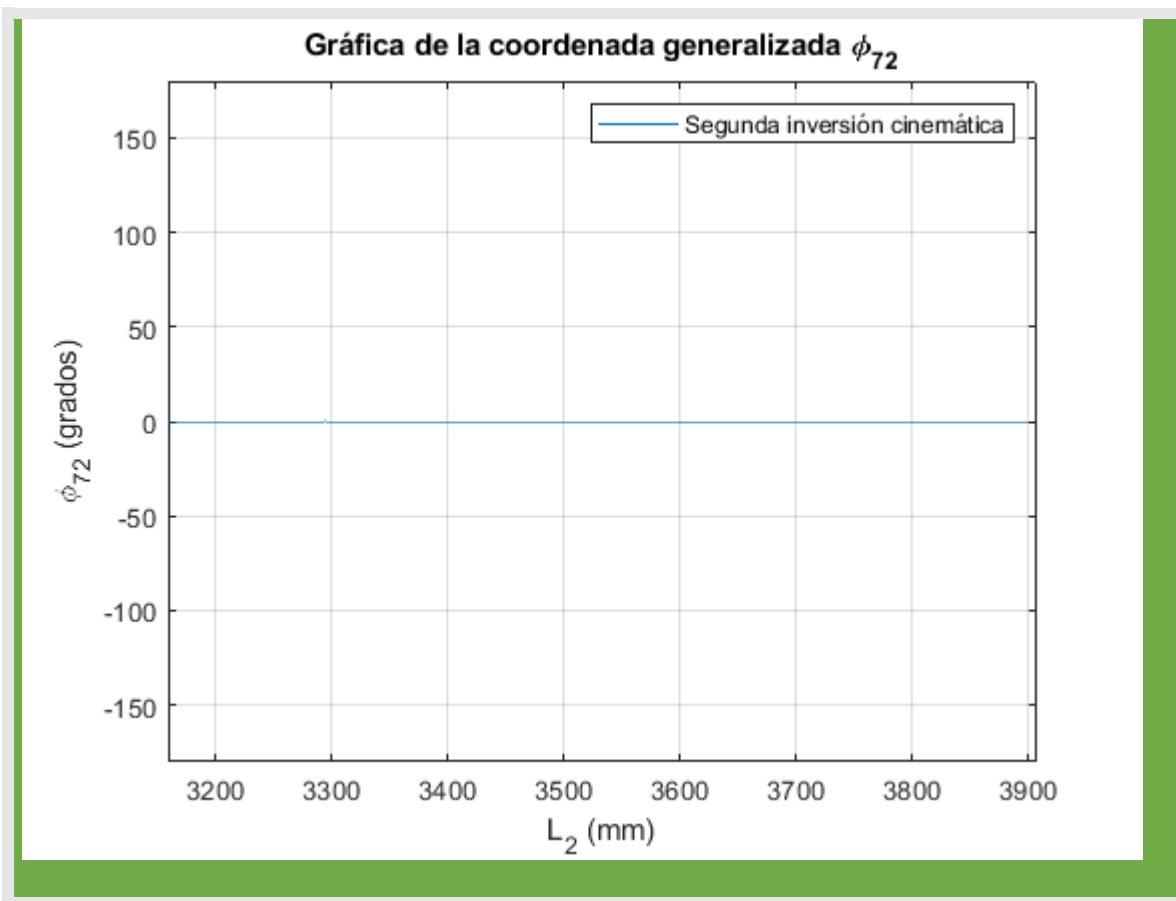
$$\varphi_{10_{1,2}} = \operatorname{arc\,cos} \left(\frac{l_{61} \cos \varphi_{61} + l_{72} \cos \varphi_{72} - a_4}{l_{10}} \right) \quad (128)$$

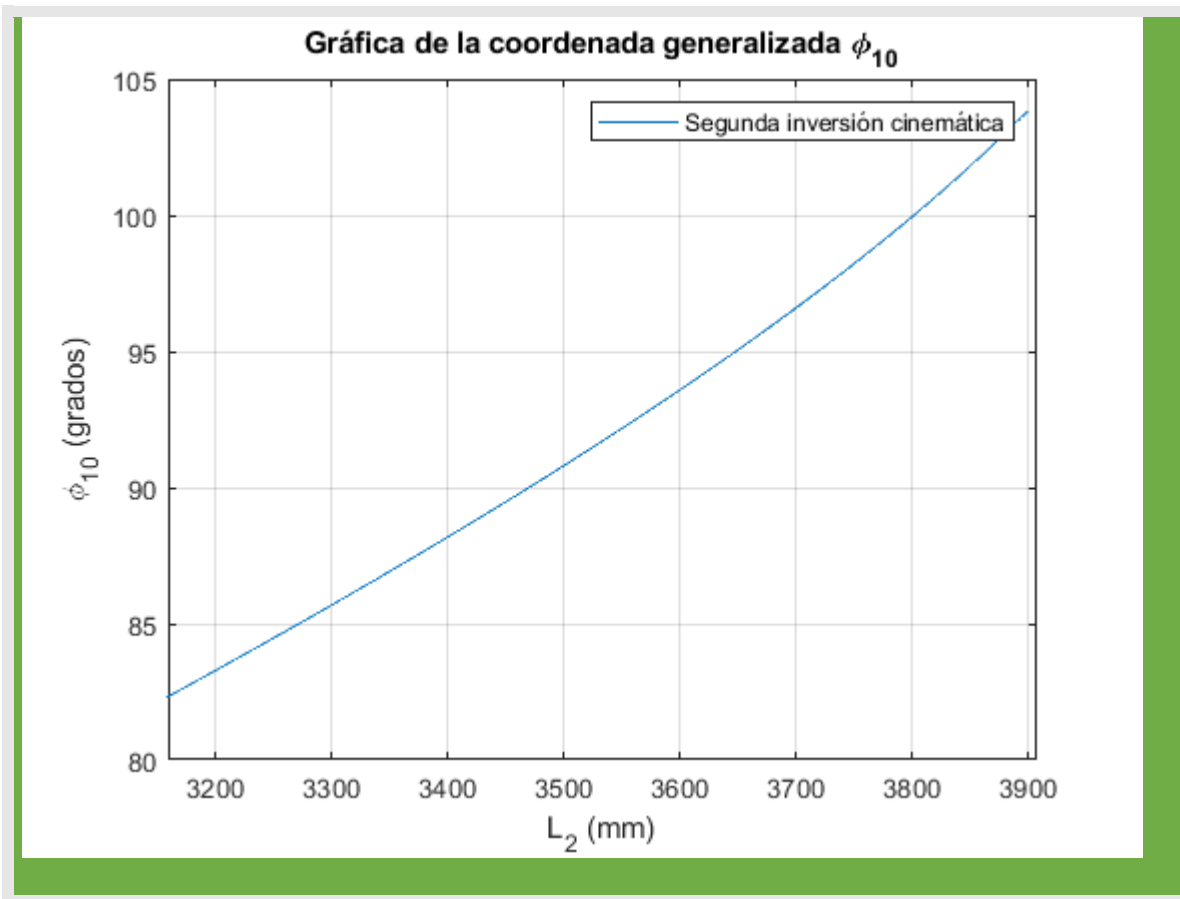
Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_{10} y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre.

La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (129).

$$\varphi_{10_2} = 2\pi - \varphi_{10_1} \quad (129)$$

Las Figuras 25 y 26 muestran los ángulos de salida φ_{72} y φ_{10} como una función de la altura variable l_2 y de la excentricidad “e”.





Resultado 7. Figuras 25 y 26. Gráficas de φ_{72} y φ_{10} en función de la coordenada generalizada de entrada l_2 y la excentricidad “e”. (Ciclo VII, segunda inversión cinemática)

16.4. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo VIII durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).

Hasta ahora se han encontrado las ecuaciones que definen el modo en que las variables φ_4 , φ_{61} , φ_{72} y φ_{10} dependen de la coordenada generalizada de entrada l_2 . En este ciclo VIII, se determinará φ_{52} y φ_8 .

Atendiendo a la Figura 56, se llegará a la articulación N, partiendo de S, mediante dos caminos. El primero, irá de S a N pasando por los eslabones 6, 7 y 5, a través de los vectores \vec{l}_{61} , \vec{l}_{71} y \vec{l}_{52} y el segundo también irá de S a N, pero a través de los vectores, \vec{l}_{64} y \vec{l}_8 .

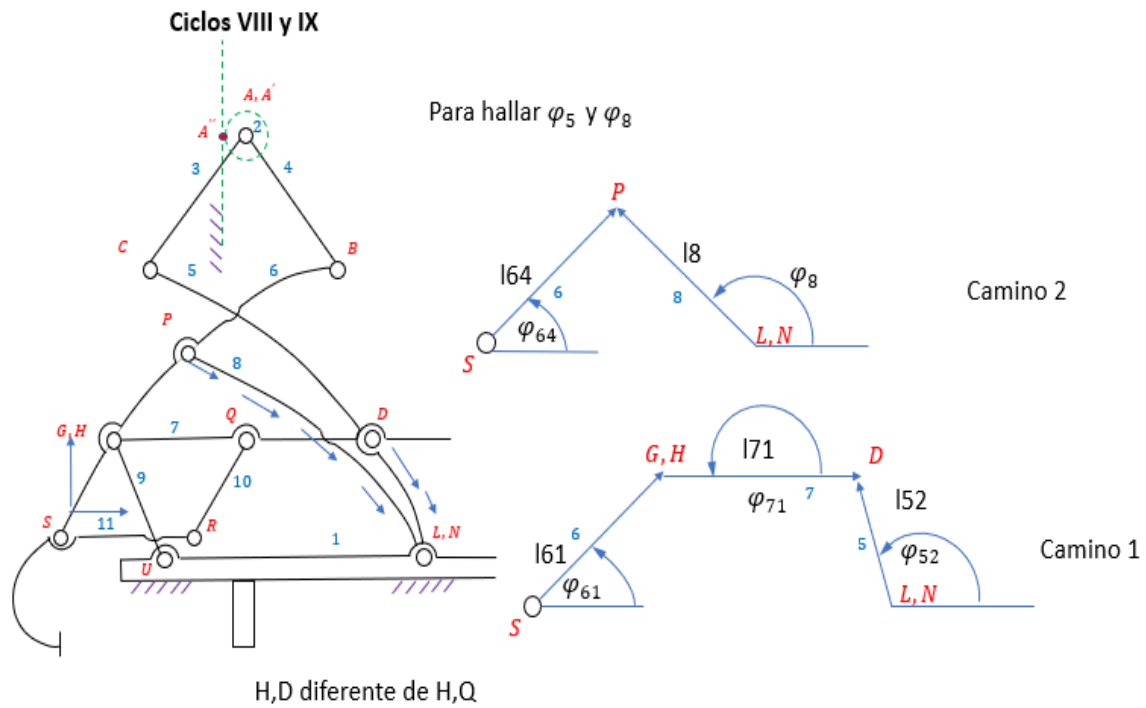


Figura 56. Vectores de los caminos 1 y 2, para llegar a L,N, partiendo de S. Ciclos VII y IX.

Ahora en la figura 57 ya tenemos despejado el primer camino a seguir para hallar φ_5 y φ_8 , teniendo presentes segmentos de los eslabones 5, 6 y 7.

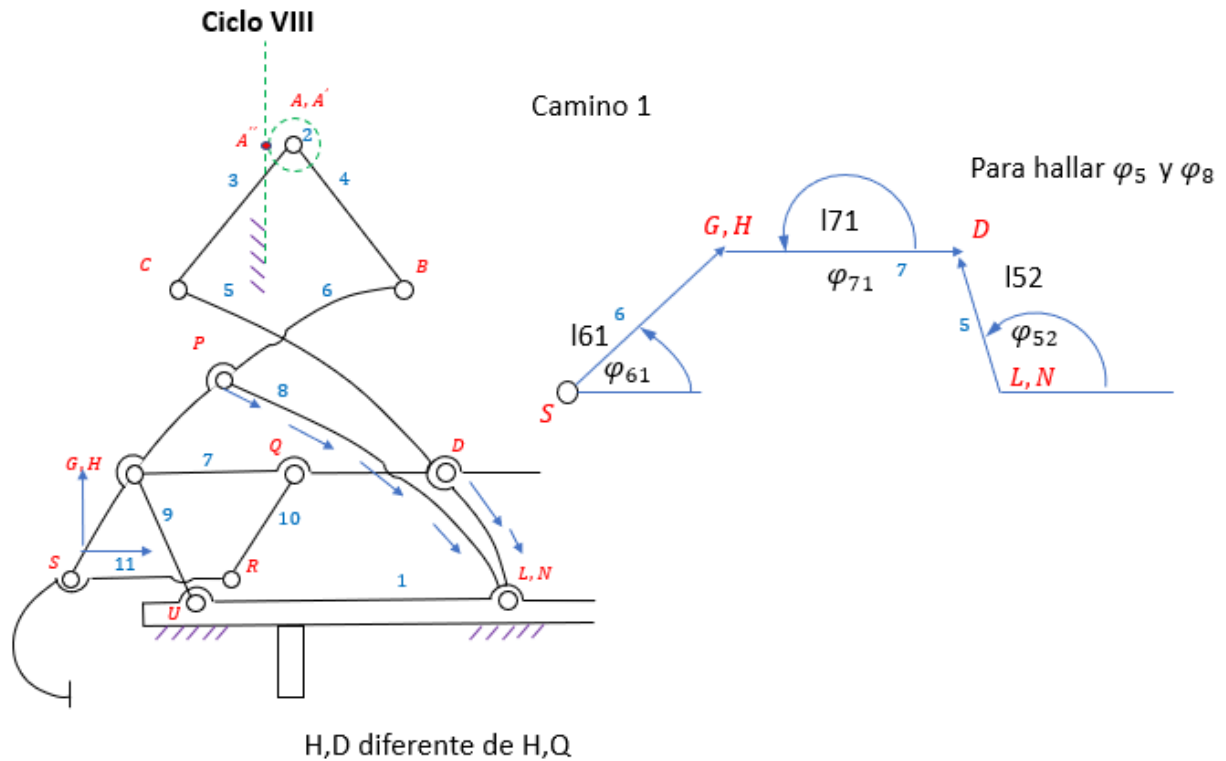


Figura 57. Figura 27. Vector del camino 1, para llegar a L,N, partiendo de S

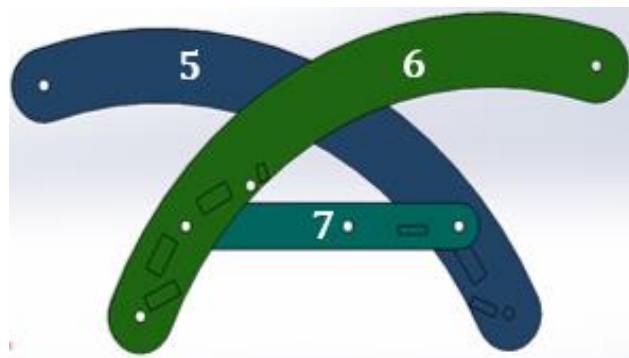


Figura 58. Tercer subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo VIII (camino1). Simulado en SolidWorks.

16.4.1. Soluciones para φ_{61} en el ciclo VIII

La ecuación vectorial para llegar a N, partiendo de S, a través de los caminos 1 y 2 indicados anteriormente, se muestra en la ecuación (130).

$$\vec{l}_{61} + \vec{l}_{71} - \vec{l}_{52} = \vec{l}_{64} - \vec{l}_8 \quad (130)$$

Al proyectar cada vector de (130) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (131):

$$l_{61} \cos \varphi_{61} \vec{i} + l_{61} \sin \varphi_{61} \vec{j} + l_{71} \cos \varphi_{71} \vec{i} + l_{71} \sin \varphi_{71} \vec{j} - l_{52} \cos \varphi_{52} \vec{i} - l_{52} \sin \varphi_{52} \vec{j} = l_{64} \cos \varphi_{64} \vec{i} + l_{64} \sin \varphi_{64} \vec{j} - l_8 \cos \varphi_8 \vec{i} - l_8 \sin \varphi_8 \vec{j} \quad (131)$$

Separando la ecuación (131) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (133.1) y (133.2), en el que tanto φ_{52} , como φ_8 son incógnitas, siendo l_{61} , l_{71} , l_{52} , l_{64} y l_8 , parámetros geométricos. En esta ecuación vectorial (131), la variable φ_{61} , es la coordenada de entrada conocida, la cual está relacionada con el ángulo φ_{65} hallado en la ecuación (103) del ciclo VI anterior. La relación entre estos dos ángulos definidos sobre el eslabón 6, se indica en la ecuación (132.1). En la figura 59 y 60 se muestran todos los ángulos e igualdades para el eslabón 6. (Nota: mostrar en un dibujo, quién es β_{65} en la ecuación 132.1)

$$\varphi_{61} = \varphi_{65} + \beta_{65} \quad (132.1) \quad \Rightarrow \beta_{65} = \beta_{63} + \beta_{64}$$

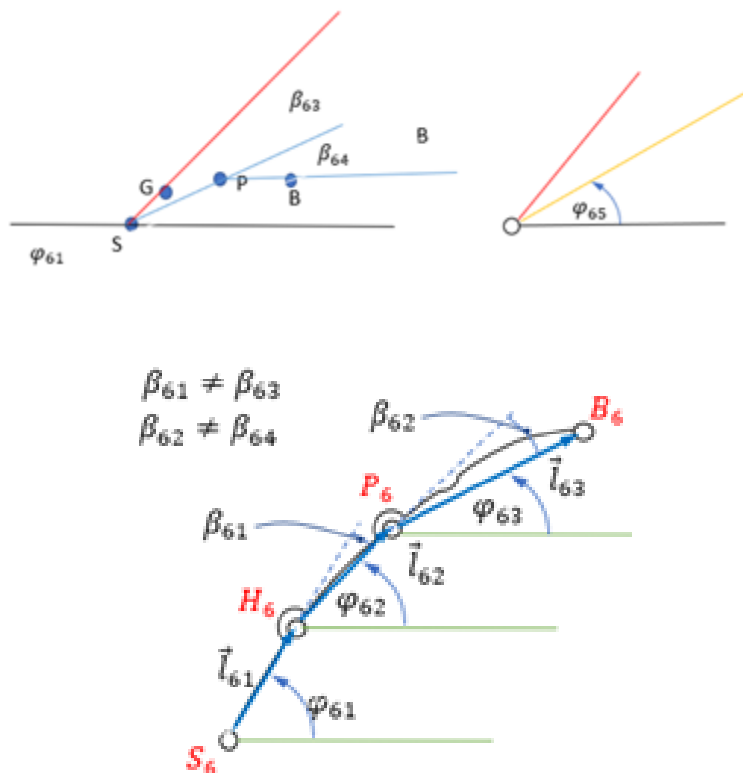


Figura 59. Eslabón 6 con sus respectivos ángulos

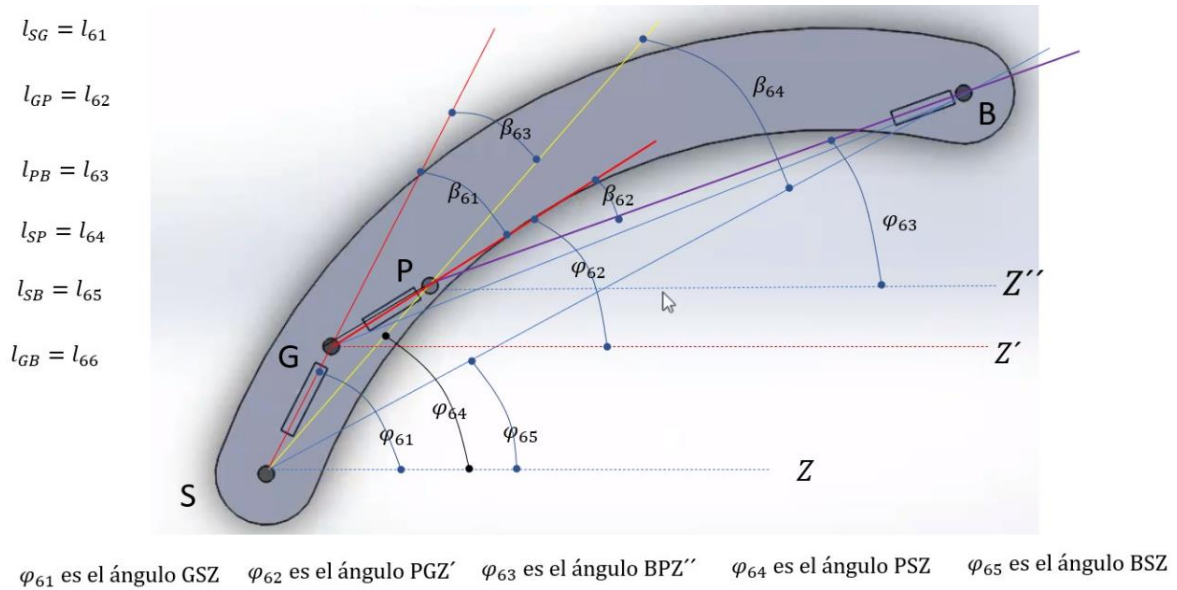


Figura 60. Figura 28. Mostrando quién es Beta 65, Siendo

$$\text{Siendo } \beta_{65} = \beta_{63} + \beta_{64}$$

$$\varphi_{71} = \varphi_{72} - \beta_7 \quad (132.2)$$

$$l_{61} \cos \varphi_{61} + l_{71} \cos \varphi_{71} - l_{52} \cos \varphi_{52} = l_{64} \cos \varphi_{64} - l_8 \cos \varphi_8 \quad (133.1)$$

$$l_{61} \sin \varphi_{61} + l_{71} \sin \varphi_{71} - l_{52} \sin \varphi_{52} = l_{64} \sin \varphi_{64} - l_8 \sin \varphi_8 \quad (133.2)$$

Aislando la variable de salida φ_8 en el miembro izquierdo de las ecuaciones (133.1) y (133.2), estas dos ecuaciones, se pueden escribir como en (134.1) y (134.2).

$$l_8 \cos \varphi_8 = l_{64} \cos \varphi_{64} + l_{52} \cos \varphi_{52} - l_{61} \cos \varphi_{61} - l_{71} \cos \varphi_{71} \quad (134.1)$$

$$l_8 \sin \varphi_8 = l_{64} \sin \varphi_{64} + l_{52} \sin \varphi_{52} - l_{61} \sin \varphi_{61} - l_{71} \sin \varphi_{71} \quad (134.2)$$

Elevando ambos miembros de (134.1) y (134.2) al cuadrado y sumando estos cuadrados se obtiene la ecuación (135).

$$\begin{aligned}
 & l_8^2 - l_{61}^2 - l_{71}^2 - l_{64}^2 - l_{52}^2 - 2l_{61}l_{71}(\cos \varphi_{61} \cos \varphi_{71} + \sin \varphi_{61} \sin \varphi_{71}) + \\
 & 2l_{61}l_{64}(\cos \varphi_{61} \cos \varphi_{64} + \sin \varphi_{61} \sin \varphi_{64}) + 2l_{71}l_{64}(\cos \varphi_{71} \cos \varphi_{64} + \sin \varphi_{71} \sin \varphi_{64}) = \\
 & 2l_{52}l_{64}(\cos \varphi_{52} \cos \varphi_{64} + \sin \varphi_{52} \sin \varphi_{64}) - 2l_{61}l_{52}(\cos \varphi_{61} \cos \varphi_{52} + \sin \varphi_{61} \sin \varphi_{52}) - \\
 & 2l_{71}l_{52}(\cos \varphi_{71} \cos \varphi_{52} + \sin \varphi_{71} \sin \varphi_{52}) \quad (135)
 \end{aligned}$$

En la ecuación (135), todos los términos del miembro izquierdo son conocidos y se agruparán bajo la variable R' indicada en (136).

$$l_8^2 - l_{61}^2 - l_{71}^2 - l_{64}^2 - l_{52}^2 - 2l_{61}l_{71}(\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{71} + \text{sen}\varphi_{61}\text{sen}\varphi_{71}) + 2l_{61}l_{64}(\cos\varphi_{61}\cos\varphi_{64} + \text{sen}\varphi_{61}\text{sen}\varphi_{64}) + 2l_{71}l_{64}(\cos\varphi_{71}\cos\varphi_{64} + \text{sen}\varphi_{71}\text{sen}\varphi_{64}) = R' \quad (136)$$

Sacando factor común $\cos\varphi_{52}$ y $\text{sen}\varphi_{52}$ la ecuación (135) se puede reescribir como se indica en (137)

$$[-2(l_{61}l_{52}\cos\varphi_{61} + l_{71}l_{52}\cos\varphi_{71}) + 2l_{52}l_{64}\cos\varphi_{64}]\cos\varphi_{52} + [-2(l_{61}l_{52}\text{sen}\varphi_{61} + l_{71}l_{52}\text{sen}\varphi_{71}) + 2l_{52}l_{64}\text{sen}\varphi_{64}]\text{sen}\varphi_{52} = R' \quad (137)$$

Sea:

$$P' = [-2(l_{61}l_{52}\cos\varphi_{61} + l_{71}l_{52}\cos\varphi_{71}) + 2l_{52}l_{64}\cos\varphi_{64}] \quad (138)$$

$$Q' = [-2(l_{61}l_{52}\text{sen}\varphi_{61} + l_{71}l_{52}\text{sen}\varphi_{71}) + 2l_{52}l_{64}\text{sen}\varphi_{64}] \quad (139)$$

Reemplazando P' y Q' en (137), esta ecuación se reduce a (140).

$$P' \cos\varphi_{52} + Q' \text{sen}\varphi_{52} - R' = 0 \quad (140)$$

Reemplazando las identidades (141) y (142) en (140), la ecuación (140) se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right)$ dada en (143):

$$\cos\varphi_{52} = \frac{1 - (\text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right))^2}{1 + (\text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right))^2} \quad (141)$$

$$\text{sen}\varphi_{52} = \frac{2 \text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right)}{1 + (\text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right))^2} \quad (142)$$

$$D' (\text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right))^2 + E' \text{tang}\left(\frac{\varphi_{52}}{2}\right) + F' = 0 \quad (143)$$

Siendo:

$$D' = (P' + R') \quad (144)$$

$$E' = -2Q' \quad (145)$$

$$F' = R' - P' \quad (145)$$

16.4.2. Soluciones para φ_{52} en el ciclo VIII

La ecuación (143) tiene dos soluciones φ_{52_1} y φ_{52_2} que vienen dadas por la ecuación (146). En esta ecuación (144), el posible ángulo variable de salida φ_{52_1} se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida φ_{52_2} con el signo negativo.

$$\varphi_{52_{1,2}} = 2 \operatorname{arc\,tang} \left(\frac{-E' \pm \sqrt{E'^2 - 4D'F'}}{2D'} \right) \quad (146)$$

Se debe comprobar en el mecanismo real, cuál de los dos es el ángulo que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

16.4.3. Soluciones para φ_8 en el ciclo VIII

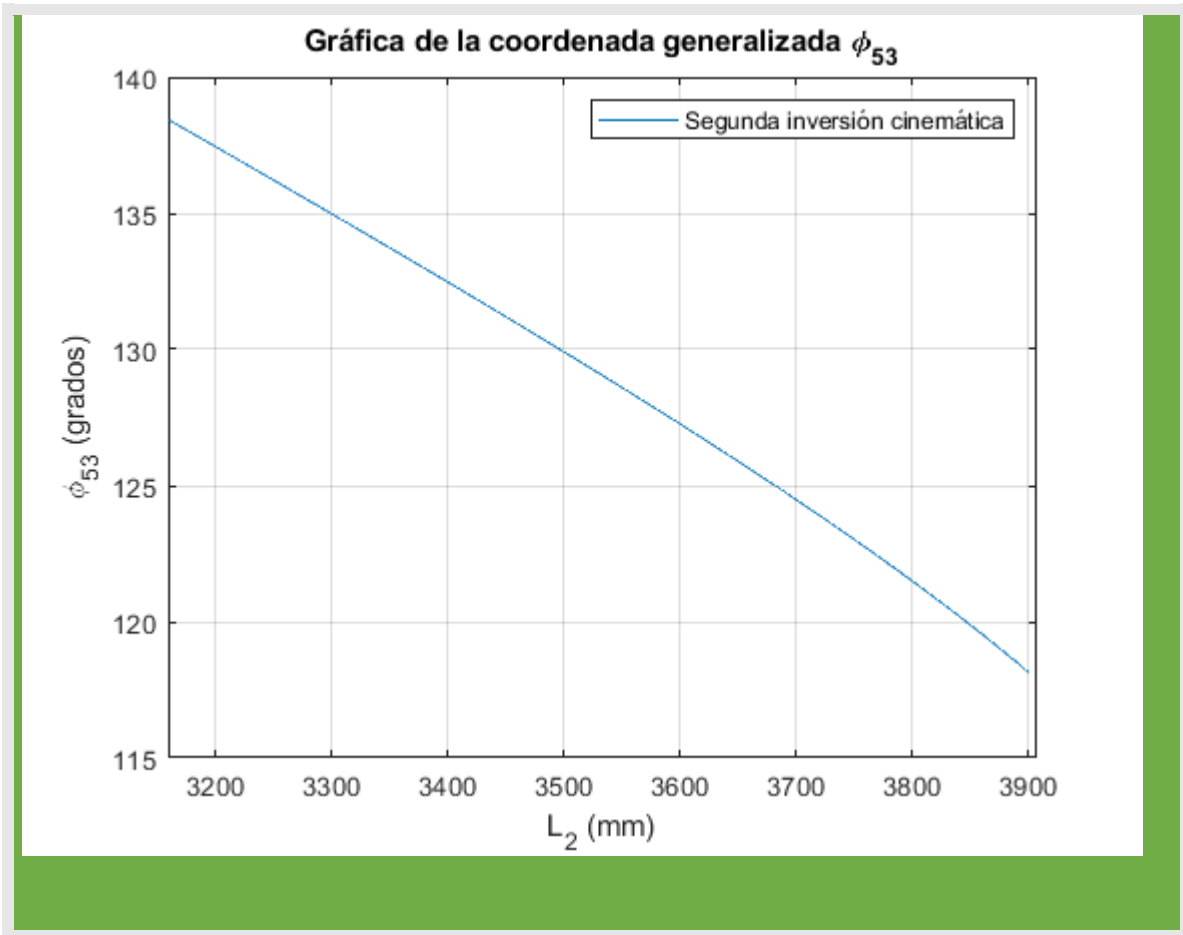
Conocido el valor correcto de φ_{52} a través de (146), se puede obtener φ_8 , despejándola de (133.1). Esto da como resultado la ecuación (147).

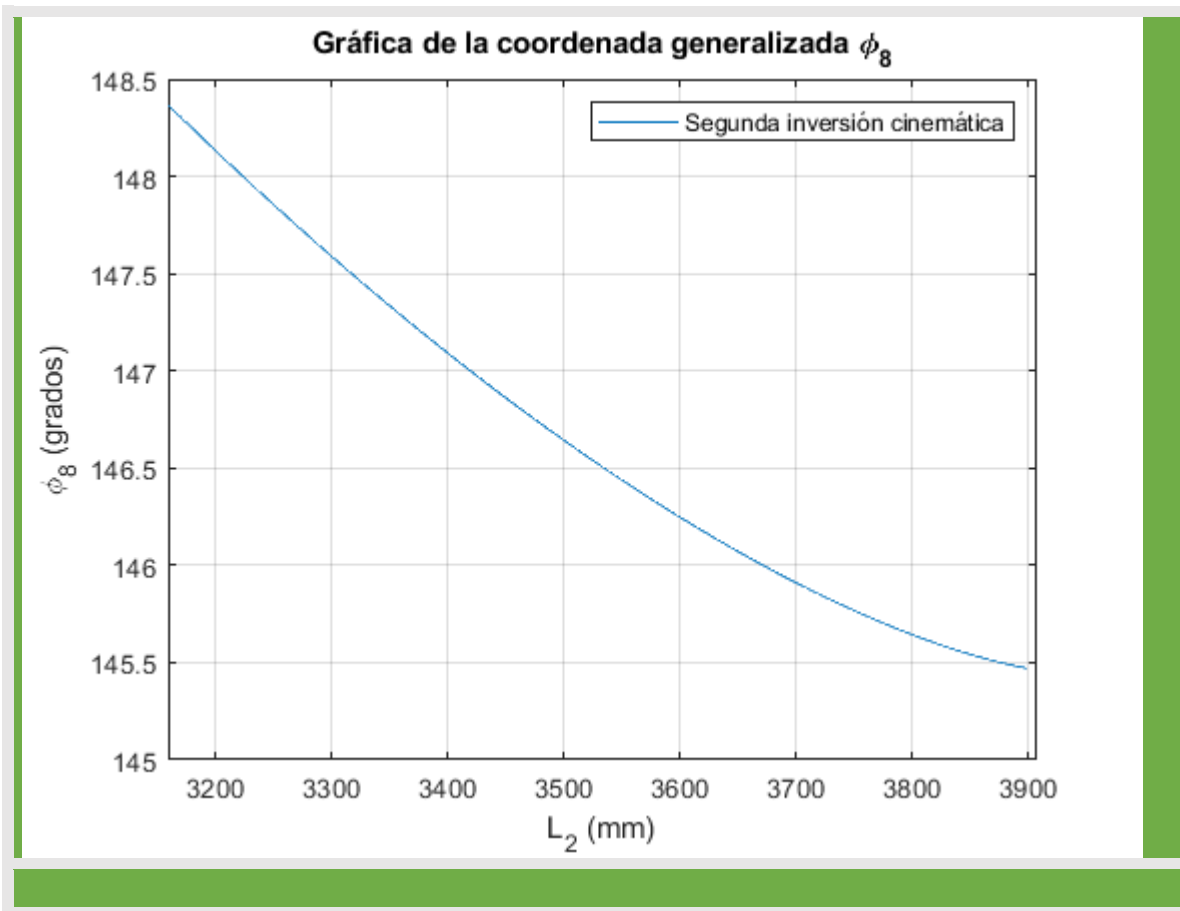
$$\varphi_{8_{1,2}} = \operatorname{arc\,cos} \left(\frac{l_{64} \cos \varphi_{64} + l_{52} \cos \varphi_{52} - l_{61} \cos \varphi_{61} - l_{71} \cos \varphi_{71}}{l_8} \right) \quad (147)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_8 y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre. La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (104).

$$\varphi_{8_2} = 2\pi - \varphi_{8_1} \quad (148)$$

Las Figuras 29 y 30 muestran los ángulos de salida φ_{52} y φ_8 como una función de la altura variable l_2 para una excentricidad “e” máxima.





Resultado 8. Figuras 29 y 30. Gráficas de φ_{53} y φ_8 en función de la coordenada generalizada de entrada l_2 y la excentricidad “e”. (Ciclo VIII, segunda inversión cinemática).

16.5. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo IX durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).

Hasta ahora se han encontrado las ecuaciones que definen el modo en que las variables φ_4 , φ_{61} , φ_{72} , φ_{10} , φ_{52} y φ_8 dependen de la coordenada generalizada de entrada l_2 y de los respectivos parámetros geométricos. En este ciclo IX, se determinará el modo en que cambian los ángulos φ_9 y φ_1 .

Atendiendo a la Figura 61, se llegará a la articulación U, partiendo de S, mediante dos caminos. El primero, irá de S a U pasando por los eslabones 6, 8 y 1, a través de los vectores \vec{l}_{64} , \vec{l}_8 y \vec{l}_1 y el segundo también irá de S a U, pero a través de los vectores, \vec{l}_{61} y \vec{l}_9 .

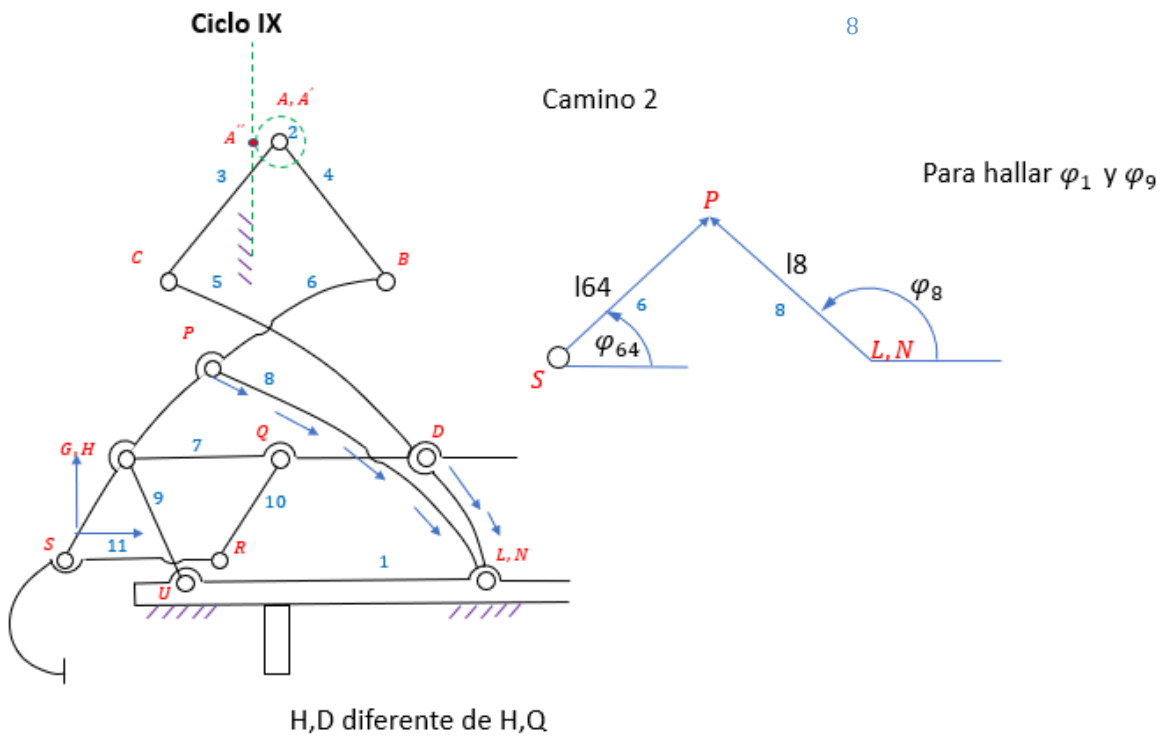


Figura 61. Vector del camino 2, para llegar a L,N partiendo de S.

Figura 61. Vector del camino 2, para llegar a L,N partiendo de S.

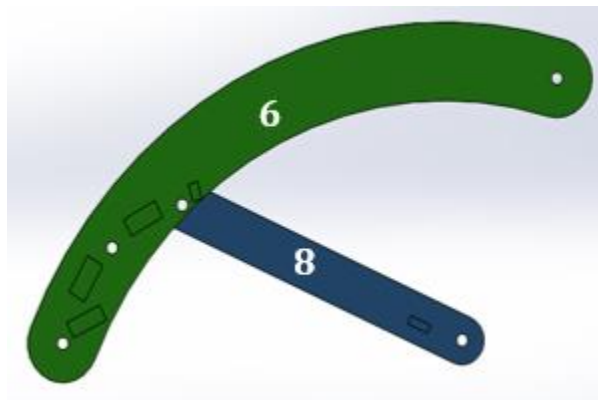


Figura 62. Cuarto subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo IX (camino2). Simulado en SolidWorks.

La ecuación vectorial para llegar a U, partiendo de S, a través de los caminos 1 y 2 indicados anteriormente, se muestra en la ecuación (149).

$$\vec{l}_{64} - \vec{l}_8 + \vec{l}_1 = \vec{l}_{61} - \vec{l}_9 \quad (149)$$

Al proyectar cada vector de (149) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (150):

$$l_{64} \cos \varphi_{64} \vec{i} + l_{64} \operatorname{sen} \varphi_{64} \vec{j} - l_8 \cos \varphi_8 \vec{i} - l_8 \operatorname{sen} \varphi_8 \vec{j} + l_1 \cos \varphi_1 \vec{i} + l_1 \operatorname{sen} \varphi_1 \vec{j} = l_{61} \cos \varphi_{61} \vec{i} + l_{61} \operatorname{sen} \varphi_{61} \vec{j} - l_9 \cos \varphi_9 \vec{i} - l_9 \operatorname{sen} \varphi_9 \vec{j} \quad (150)$$

Separando la ecuación (150) en componentes horizontales y verticales, se llega al sistema de dos ecuaciones indicados en (151.1) y (151.2), en el que tanto φ_1 , como φ_9 son incógnitas, siendo l_{64} , l_8 , l_1 , l_{61} y l_9 , parámetros geométricos. En esta ecuación vectorial (150), las variables φ_{61} y φ_{64} son las coordenadas de entrada conocidas, las cuales están relacionada con el ángulo φ_{65} hallado en la ecuación (103) del ciclo VI anterior. La relación con φ_{65} de estos dos ángulos definidos sobre el eslabón 6, se indican en las ecuaciones (151.1) y (151.2).

$$\varphi_{61} = \varphi_{65} + \beta_{65} \quad (151.1), \text{ siendo } \beta_{65} = \beta_{63} + \beta_{64} \quad (132.1.1)$$

$$\varphi_{64} = \varphi_{65} + \beta_{64} \quad (151.2)$$

$$l_{64} \cos \varphi_{64} + l_1 \cos \varphi_1 - l_8 \cos \varphi_8 = l_{61} \cos \varphi_{61} - l_9 \cos \varphi_9 \quad (152.1)$$

$$l_{64} \operatorname{sen} \varphi_{64} + l_1 \operatorname{sen} \varphi_1 - l_8 \operatorname{sen} \varphi_8 = l_{61} \operatorname{sen} \varphi_{61} - l_9 \operatorname{sen} \varphi_9 \quad (152.2)$$

Aislado la variable de salida φ_9 en el miembro derecho de las ecuaciones (152.1) y (152.2), estas dos ecuaciones, se pueden escribir como en (153.1) y (153.2).

$$l_9 \cos \varphi_9 = l_{61} \cos \varphi_{61} - l_{64} \cos \varphi_{64} + l_8 \cos \varphi_8 - l_1 \cos \varphi_1 \quad (153.1)$$

$$l_9 \operatorname{sen} \varphi_9 = l_{61} \operatorname{sen} \varphi_{61} - l_{64} \operatorname{sen} \varphi_{64} + l_8 \operatorname{sen} \varphi_8 - l_1 \operatorname{sen} \varphi_1 \quad (153.2)$$

Reemplazando la suma de los términos conocidos en (153.1) y (153.2) por las variables H' y M' dadas en (154) y (155), y luego elevando (153.1) y (153.2) al cuadrado y sumándolas se llega a la ecuación (156).

$$H' = l_{61} \cos \varphi_{61} - l_{64} \cos \varphi_{64} + l_8 \cos \varphi_8 \quad (154)$$

$$M' = l_{61} \operatorname{sen} \varphi_{61} - l_{64} \operatorname{sen} \varphi_{64} + l_8 \operatorname{sen} \varphi_8 \quad (155)$$

$$(H'^2 + M'^2 + l_1^2 - l_9^2) - 2H'l_1 \cos \varphi_1 - 2M'l_1 \operatorname{sen} \varphi_1 = 0 \quad (156)$$

En la ecuación (156) si se hacen las sustituciones (157), (158) y (159) en (156), esta última se podrá escribir como se indica en (160):

$$N'' = (H'^2 + M'^2 + l_1^2 - l_9^2) \quad (157)$$

$$P'' = -2H'l_1 \quad (158)$$

$$Q'' = -2M'l_1 \quad (159)$$

$$P'' \cos \varphi_1 + Q'' \sin \varphi_1 + N'' = 0 \quad (160)$$

Reemplazando las identidades (161) y (162) en (160), la ecuación (160) se puede escribir como la ecuación cuadrática en $\tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)$ dada en (163):

$$\cos \varphi_1 = \frac{1 - \left(\tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)\right)^2}{1 + \left(\tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)\right)^2} \quad (161)$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{2 \tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)}{1 + \left(\tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)\right)^2} \quad (162)$$

$$R'' \left(\tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)\right)^2 + S'' \tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) + T'' = 0 \quad (163)$$

Siendo:

$$R'' = (N'' - P'') \quad (164)$$

$$S'' = 2Q'' \quad (165)$$

$$T'' = P'' + N'' \quad (166)$$

16.5.1. Soluciones para φ_1 en el ciclo IX

La ecuación (163) tiene dos soluciones $\varphi_{1,1}$ y $\varphi_{1,2}$ que vienen dadas por la ecuación (167). En esta ecuación (167), el posible ángulo variable de salida $\varphi_{1,1}$ se corresponde con el signo positivo de la raíz y el posible ángulo de salida $\varphi_{1,2}$ con el signo negativo.

$$\varphi_{1,2} = 2 \arctan \left(\frac{-S'' \pm \sqrt{S''^2 - 4(R'')(T'')}}{2R''} \right) \quad (167)$$

Se debe comprobar en el mecanismo real, cuál de los dos es el ángulo que ocurre con el fin de asignar el signo adecuado.

16.5.2. Soluciones para φ_9 en el ciclo IX

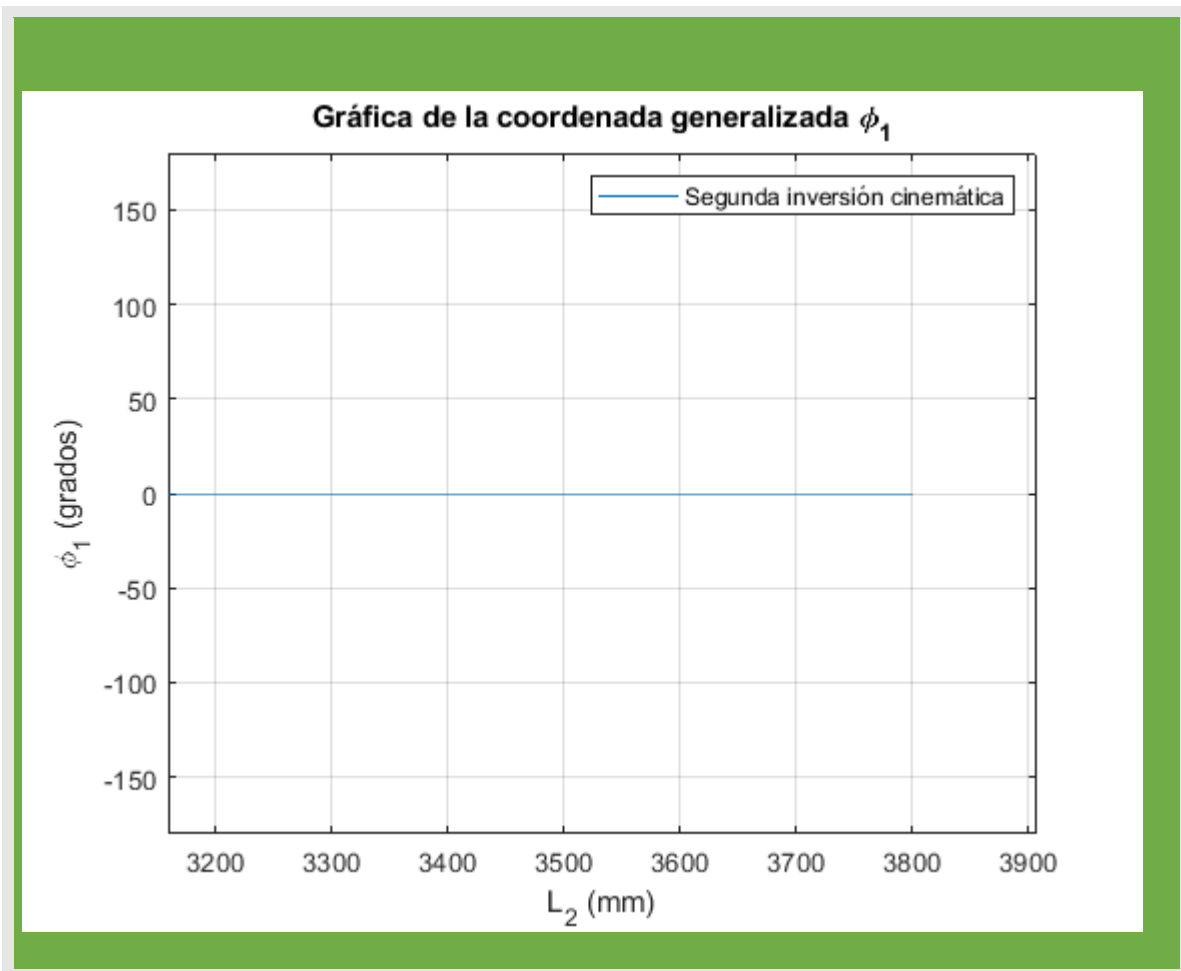
Conocido el valor correcto de φ_1 a través de (167), se puede obtener φ_9 , despejándola de (153.1). Esto da como resultado la ecuación (168).

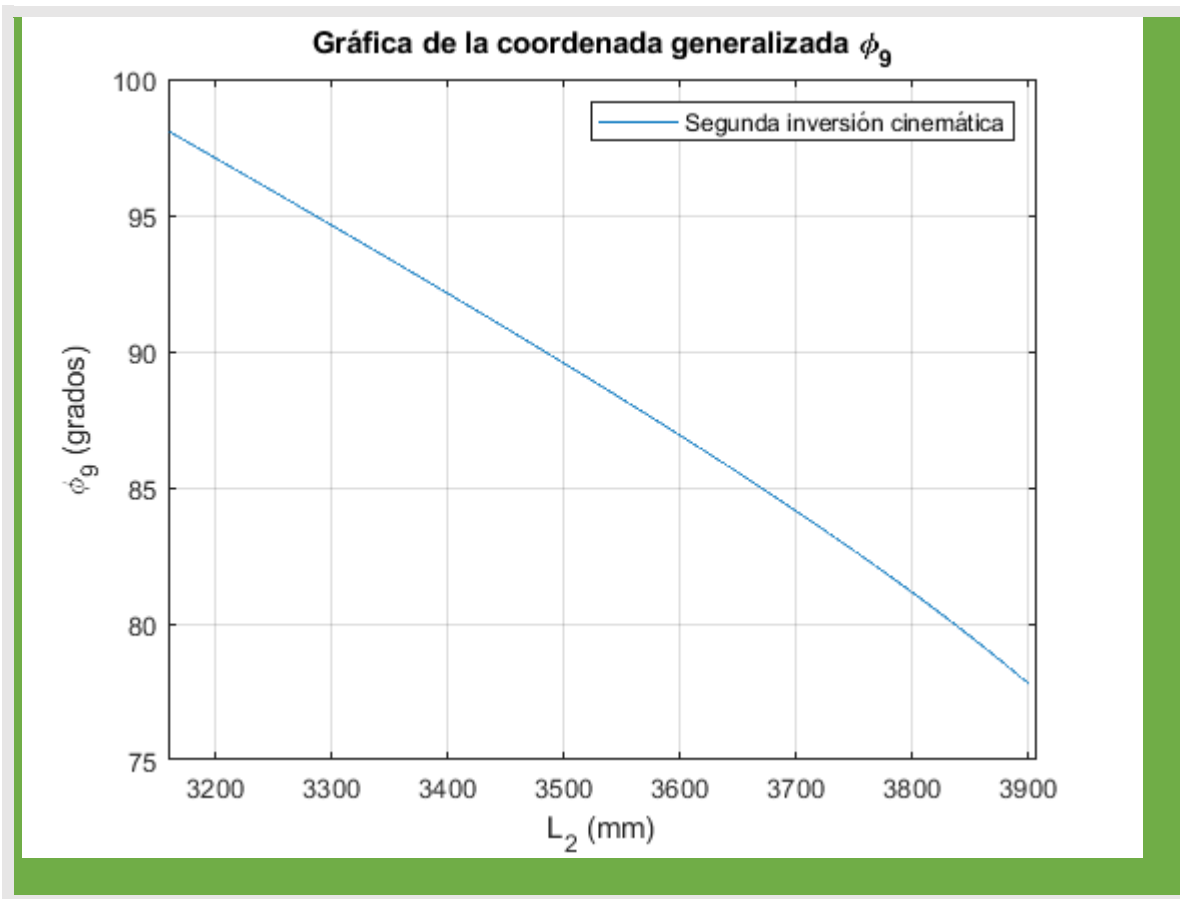
$$\varphi_{9,1,2} = \arccos \left(\frac{l_{61} \cos \varphi_{61} - l_{64} \cos \varphi_{64} + l_8 \cos \varphi_8 - l_1 \cos \varphi_1}{l_9} \right) \quad (168)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_9 y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre. La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (169).

$$\varphi_{9_2} = 2\pi - \varphi_{9_1} \quad (169)$$

Las Figuras 32 y 33 muestran los ángulos de salida φ_1 y φ_9 como una función de la altura variable l_2 para una excentricidad “e” máxima.





Resultado 9. Figuras 32 y 33. Gráficas de φ_1 y φ_9 en función de la coordenada generalizada de entrada l_2 y la excentricidad “e”. (Ciclo IX, segunda inversión cinemática)

16.6. Ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento de los eslabones del Ciclo X durante la segunda inversión cinemática (tenaza exterior detenida y tenaza interior en movimiento).

Hasta ahora se han encontrado las ecuaciones que definen el modo en que las variables φ_4 , φ_{61} , φ_{72} , φ_{10} , φ_{52} , φ_8 , φ_1 y φ_9 dependen de la coordenada generalizada de entrada l_2 y de los respectivos parámetros geométricos. En este ciclo X, se determinará la forma en que cambia el único ángulo que falta por definir, que es φ_3 .

Atendiendo a la Figura 63, se partirá de la articulación G, y se volverá a llegar a ella mediante el lazo vectorial cerrado indicado en la ecuación (170).



Figura 63. Ciclo X en la segunda inversión cinemática.

Figura 63. Vectores de los caminos 1 y 2, para llegar a U, partiendo de S.

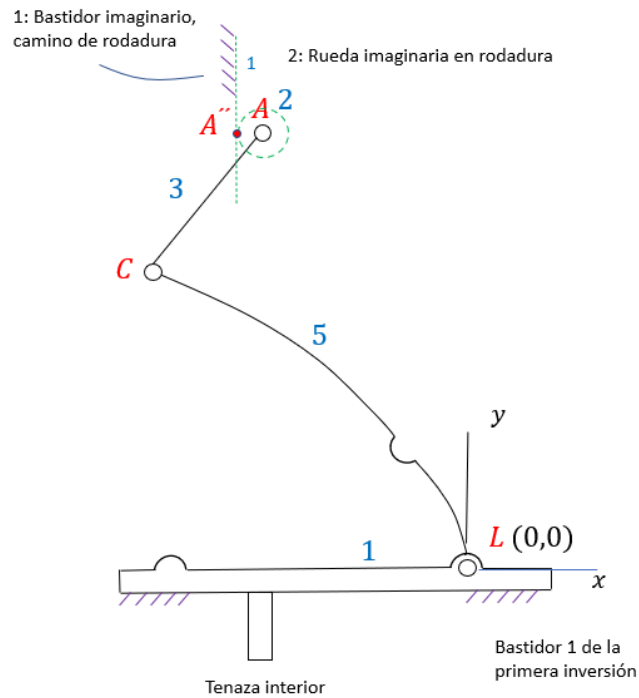


Figura 64. Geometría y eslabones presentes en el último ciclo de la segunda inversión cinemática

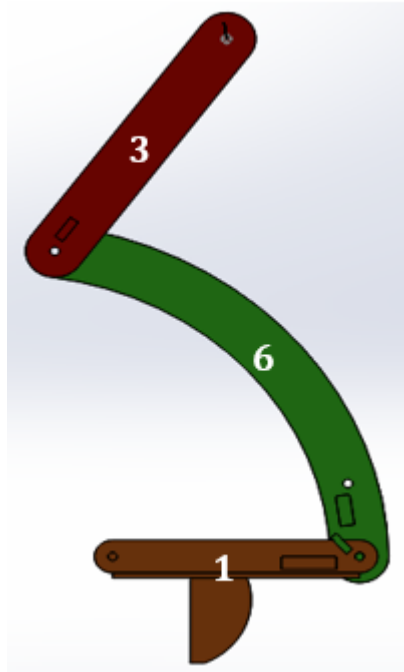


Figura 65. Decimo subciclo cinemático de la segunda inversión, designado como ciclo X. Simulado en SolidWorks

Nota:

$$\beta_{61} \neq \beta_{63}$$

$$\beta_{62} \neq \beta_{64}$$

$$\vec{l}_{62} + \vec{l}_{63} + \vec{l}_4 - \vec{l}_3 - \vec{l}_{53} - \vec{l}_{71} = \vec{0} \quad (170)$$

Al proyectar cada vector de (170) en sus componentes verticales y horizontales se obtiene (171):

$$l_{62} \cos \varphi_{62} \vec{i} + l_{62} \sin \varphi_{62} \vec{j} + l_{63} \cos \varphi_{63} \vec{i} + l_{63} \sin \varphi_{63} \vec{j} + l_4 \cos \varphi_4 \vec{i} + l_4 \sin \varphi_4 \vec{j} - l_3 \cos \varphi_3 \vec{i} - l_3 \sin \varphi_3 \vec{j} - l_{53} \cos \varphi_{53} \vec{i} - l_{53} \sin \varphi_{53} \vec{j} - l_{71} \cos \varphi_{71} \vec{i} - l_{71} \sin \varphi_{71} \vec{j} = \vec{0} \quad (171)$$

Esta ecuación vectorial (171) conduce a las dos ecuaciones escalares dadas en (172) y (173).

$$l_{62} \cos \varphi_{62} + l_{63} \cos \varphi_{63} + l_4 \cos \varphi_4 - l_3 \cos \varphi_3 - l_{53} \cos \varphi_{53} - l_{71} \cos \varphi_{71} = 0 \quad (172)$$

$$l_{62} \sin \varphi_{62} + l_{63} \sin \varphi_{63} + l_4 \sin \varphi_4 - l_3 \sin \varphi_3 - l_{53} \sin \varphi_{53} - l_{71} \sin \varphi_{71} = 0 \quad (173)$$

16.6.1. Soluciones para φ_3 en el ciclo X

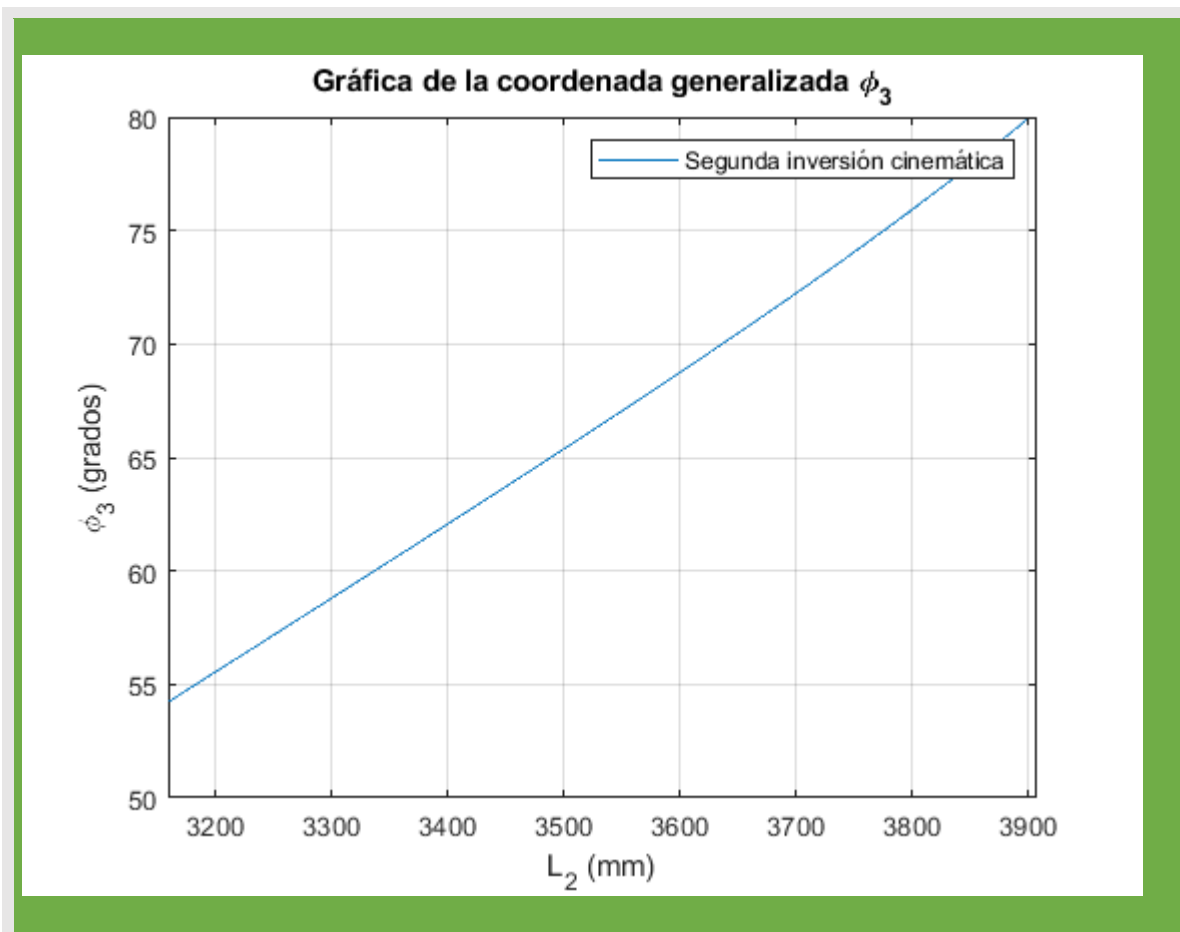
De (172) se puede despejar directamente el ángulo φ_3 , obteniéndose la ecuación (174).

$$\varphi_{3_{1,2}} = \arccos\left(\frac{l_{62}\cos\varphi_{62} + l_{63}\cos\varphi_{63} + l_4\cos\varphi_4 - l_{53}\cos\varphi_{53} - l_{71}\cos\varphi_{71}}{l_3}\right) \quad (174)$$

Nuevamente, hay dos valores posibles para φ_3 y hay que comprobar, en el mecanismo real, cuál de los dos es el que ocurre. La relación entre ambos ángulos posibles se escribe en (175).

$$\varphi_{3_2} = 2\pi - \varphi_{3_1} \quad (175)$$

La Figura 35 muestra el ángulo de salida φ_3 como una función de la altura variable l_2 para una excentricidad “e” máxima.



Resultado 10. Figura 35. Gráfica de φ_3 en función de la coordenada generalizada de entrada l_2 y la excentricidad “e”. (Ciclo X, segunda inversión cinemática)

En la figura 66 y 67 podemos ver el resultado final de la simulación en SolidWorks para la segunda inversión cinemática, pudiendo observar el desplazamiento de la pinza interior logrando sujetar la bobina por completo para así poderla transportar. Seguidamente en el video 3 tenemos acceso a un video de la simulación de esta segunda inversión, donde podemos observar su recorrido y funcionamiento.

NOTA: Como pudimos observar en el análisis, en esta segunda inversión cinemática inicia la pinza interior desde su posición más abierta hasta que esta toque el diámetro interior de la masa. En este análisis obtenemos una distancia entre pinzas de 3159.16 ± 0.50 , con ello podemos deducir el rango de diámetros con el que podrá trabajar dándole una aplicación real.

La trayectoria marcada en color negro representa la variación de distancia a3, la cual se comprueba que es variable y solo a2 es constante.

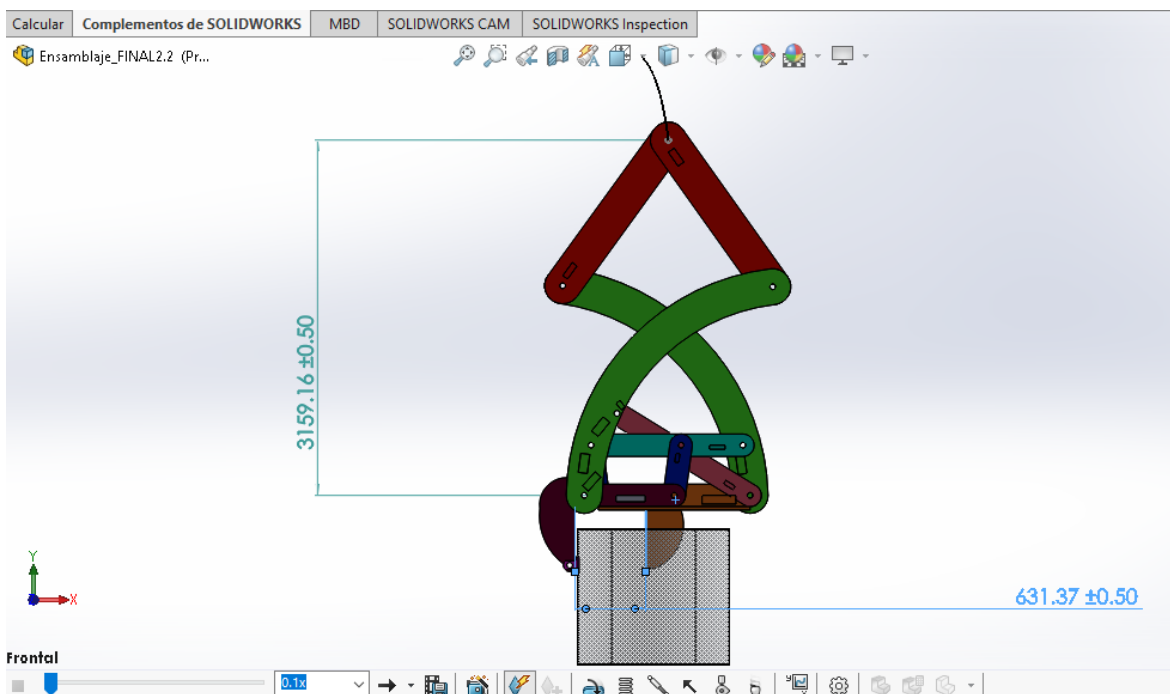


Figura 66. Segunda inversión cinemática en su posición inicial

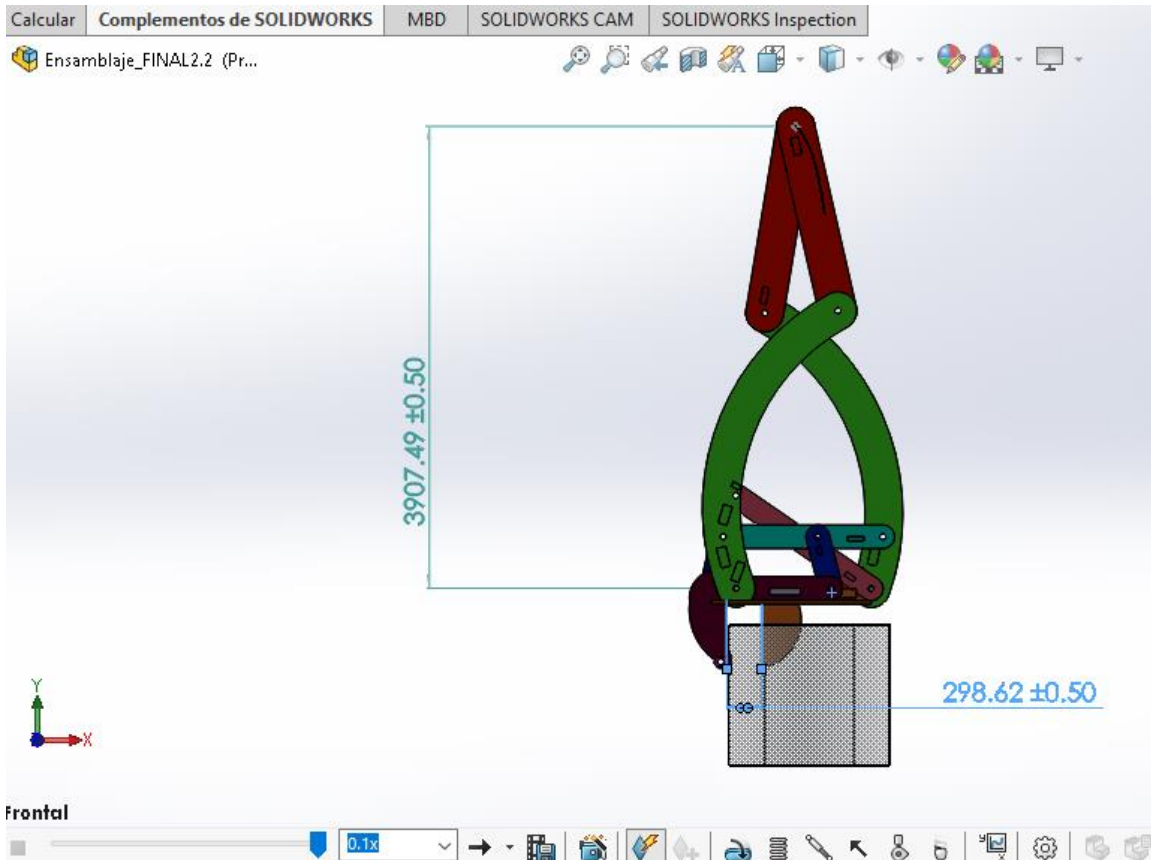


Figura 67. Segunda inversión cinemática en su posición final



Simulacion_segunda_inversion.mp4

Video 3. Video que simula la segunda inversión cinemática

Link del video de la segunda inversión cinemática: <https://n9.cl/hodr1>

Como bien ya sabemos la pinza variara su altura desde 3150 hasta 3900 mm, dando una medición en grados que es la que nos interesa conocer. Presentaremos como ejemplo algunas imágenes con valores al azar, solo para demostrar el correcto funcionamiento de la pinza cargabobinas. Por si se desea ver la tabla completa, adjuntaremos el link por si la desean visualizar.

En la tabla 4 podemos apreciar la variación de la distancia lineal entre mordazas con respecto a la coordenada de entrada l2, que es la altura de la pinza.

Coordenada de entrada (l2)	Distancia entre mordazas
3150	632
3175	626
3200	618
3225	607
3250	600
3275	590
3300	582
3325	572
3350	565
3375	555
3400	545
3425	537
3450	526
3475	516
3500	506
3525	496
3550	487
3575	476
3600	463
3625	453
3650	440
3675	430
3700	417
3725	405
3750	392
3775	379
3800	366
3825	351
3850	336
3875	319
3900	301

Tabla 4. Distancia de la apertura de la mordaza exterior, respecto a la coordenada de entrada (l2, a1)

En la tabla 5 podemos apreciar la variación de la distancia lineal a3 con respecto a la coordenada de entrada l2, que es la altura de la pinza.

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a3
3159.16	747.604534
3166.856	746.575134
3174.552	745.543053
3182.248	744.506695
3189.944	743.464782
3197.64	742.432172
3205.336	741.390293
3213.032	740.345153
3220.728	739.2975
3228.424	738.249815
3236.12	737.200395
3243.138	736.141248
3250.156	735.082671
3257.174	734.007467
3264.192	732.949369
3271.21	731.89441
3278.228	730.841466
3285.246	729.783541
3292.264	728.737176
3299.282	727.680096
3306.3	726.621922
3312.55	725.560851
3318.8	724.502806
3325.05	723.456893
3331.3	722.401388
3337.55	721.352699
3343.8	720.309904
3350.05	719.257988
3356.3	718.209102
3362.55	717.161108
3368.8	716.125914
3374.249	715.089606
3379.698	714.054233
3385.147	713.019374
3390.596	711.974642
3396.045	710.948651
3401.494	709.944684
3406.943	708.954076

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a3
3412.392	707.958384
3417.841	706.96307
3423.29	705.976634
3427.856	704.99382
3432.422	704.030265
3436.988	703.071765
3441.554	702.112403
3446.12	701.175305
3450.686	700.234794
3455.252	699.308064
3459.818	698.404378
3464.384	697.501382
3468.95	696.618674
3472.578	695.754461
3476.206	694.88818
3479.834	694.036876
3483.462	693.199501
3487.09	692.38863
3490.718	691.582856
3494.346	690.79504
3497.974	690.025577
3501.602	689.27177
3505.23	688.537976
3508.116	687.840113
3511.002	687.142518
3513.888	686.468332
3516.774	685.796378
3519.66	685.11927
3522.546	684.436145
3525.432	683.746898
3528.318	683.051422
3531.204	682.349606
3534.09	681.641339
3537.015	680.926502
3539.94	680.204976
3542.865	679.476638
3545.79	678.741363
3548.715	677.999018
3551.64	677.249471
3554.565	676.492584
3557.49	675.728214
3560.415	674.956215

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a3
3563.34	674.176436
3566.357	673.388722
3569.374	672.592912
3572.391	671.788842
3575.408	670.976339
3578.425	670.155229
3581.442	669.325329
3584.459	668.486452
3587.476	667.638402
3590.493	666.780979
3593.51	665.913976
3596.635	665.037177
3599.76	664.15036
3602.885	663.253294
3606.01	662.34574
3609.135	661.427451
3612.26	660.498169
3615.385	659.557628
3618.51	658.605552
3621.635	657.641652
3624.76	656.66563
3628.017	655.677175
3631.274	654.675963
3634.531	653.661657
3637.788	652.633907
3641.045	651.592346
3644.302	650.536593
3647.559	649.46625
3650.816	648.3809
3654.073	647.280107
3657.33	646.163417
3660.754	645.030354
3664.178	643.880416
3667.602	642.713081
3671.026	641.527799
3674.45	640.323993
3677.874	639.101054
3681.298	637.858345
3684.722	636.59519
3688.146	635.310881
3691.57	634.004668
3695.217	632.675758

Coordenada de entrada (l2)	Distancia a3
3698.864	631.323312
3702.511	629.946443
3706.158	628.544207
3709.805	627.115605
3713.452	625.659571
3717.099	624.174971
3720.746	622.660596
3724.393	621.115154
3728.04	619.53726
3732.002	617.925431
3735.964	616.278075
3739.926	614.593477
3743.888	612.869787
3747.85	611.105008
3751.812	609.296974
3755.774	607.443334
3759.736	605.54153
3763.698	603.588766
3767.66	601.581983
3772.13	599.517819
3776.6	597.39257
3781.07	595.202136
3785.54	592.941967
3790.01	590.606985
3794.48	588.191502
3798.95	585.689112
3803.42	583.092562
3807.89	580.393587
3812.36	577.582711
3817.896	574.648986
3823.432	571.57966
3828.968	568.359739
3834.504	564.971415
3840.04	561.393278
3845.576	557.599235
3851.112	553.556979
3856.648	549.225749
3862.184	544.552956
3867.72	539.46887
3875.674	533.877827
3883.628	527.642735
3891.582	520.555323

Coordenada de entrada (I2)	Distancia a3
3899.536	512.272138
3907.49	502.151176

Tabla 5. Distancia a3 respecto a la coordenada de entrada (I2, a3)

NOTA: Después de analizar los resultados de la segunda inversión, la conclusión es que h de la misma manera que en la primera inversión cinemática es igual a cero. También podemos comprobarlo, viendo a que distancia vertical se encuentran los puntos S y R, de los puntos U y L cuando comienza la segunda inversión cinemática.

17. Resultados

Como pudimos observar en todo el documento la pinza cargabobinas se rige por 10 ángulos básicos (fi3, fi4, fi8, fi9, fi10, fi51, fi52, fi61, fi62 y fi63), posteriormente de ahí parten todos los demás ángulos, pero ya siendo derivados de estos. Si comparamos los cálculos con los resultados obtenidos en la simulación; estos deberían de ser lo más parecidos posibles, por no decir iguales, con un margen de error insignificante. A continuación, veremos si esta condición se cumple. Veremos qué resultados nos arroja SolidWorks.

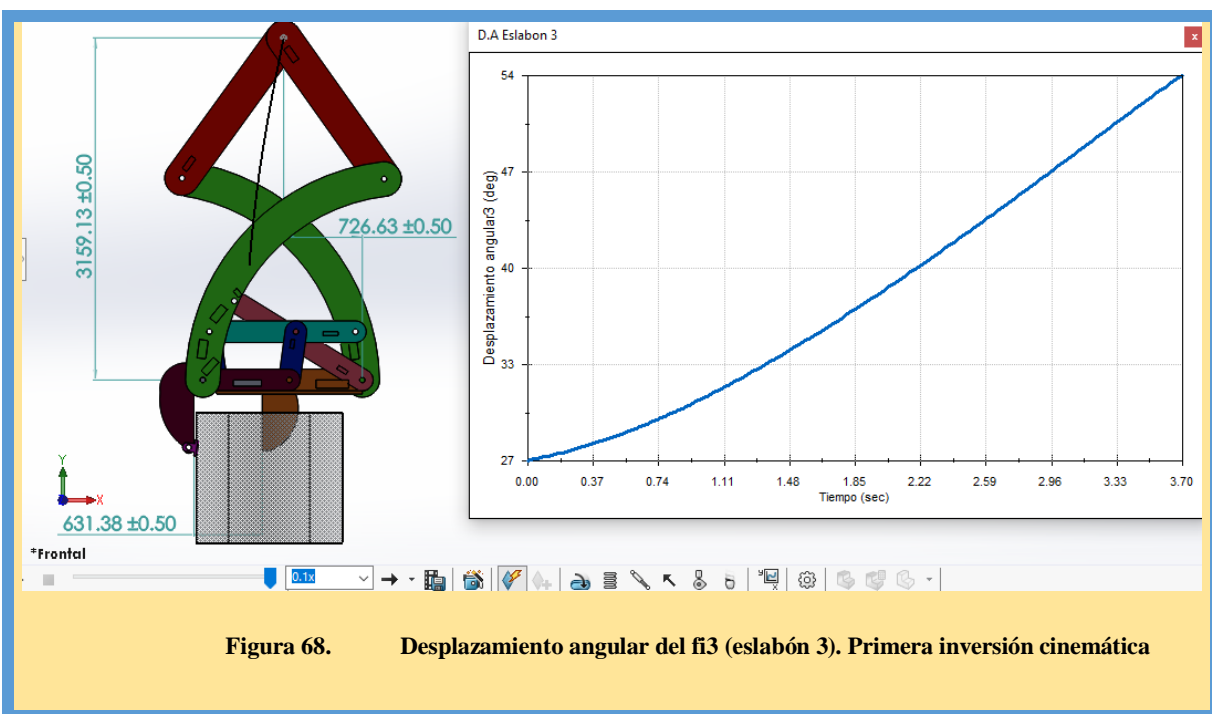
Para el caso de las siguientes imágenes debemos mencionar que las gráficas obtenidas por SolidWorks, son las del rango de movimiento completo de la pinza, considerando la primera y segunda inversión cinemática.

17.1. Resultados de la primera inversión cinemática

Todas las imágenes presentes en la sección 17. que va de la figura 68 a la 77, representan los resultados obtenidos por la simulación en SolidWorks del desplazamiento angular para los ángulos de la primera inversión cinemática que involucra a los circuitos del I al V. Cabe mencionar que SolidWorks no grafica respecto a la coordenada de entrada que es la altura l_2 , sino que lo hace respecto al tiempo.

NOTA: Para todos los casos SolidWorks muestra el ángulo complementario, lo cual no es malo, simplemente a nosotros no nos interesa, queremos ver el ángulo el ángulo suplementario. Para lo cual restaríamos 180° a los resultantes de las gráficas del desplazamiento angular en SolidWorks, lo cual nos arrojará los ángulos correspondientes a los cálculos.

Excepto para el caso de fi61 lo haremos restándole 90°



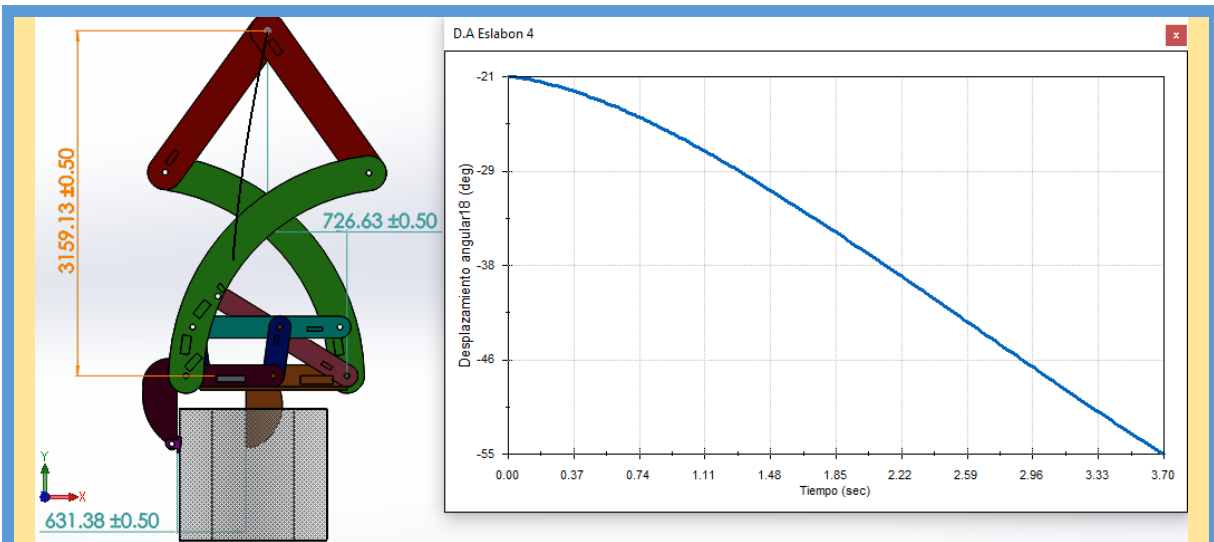


Figura 69. Desplazamiento angular del fi4 (eslabón 4). Primera inversión cinemática

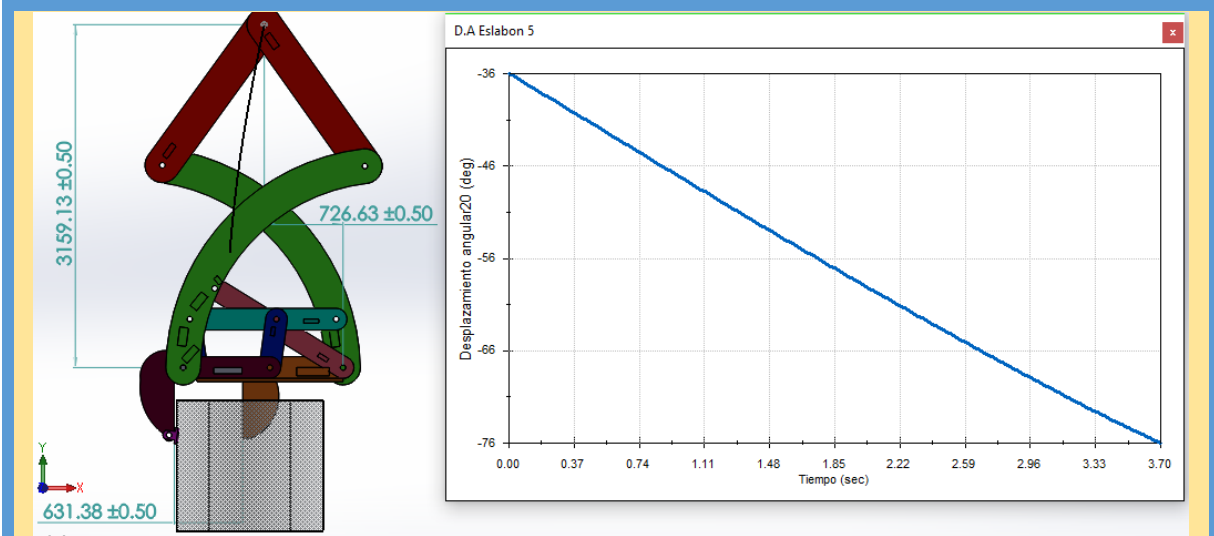


Figura 70. Desplazamiento angular del fi51 (eslabón 5). Primera inversión cinemática

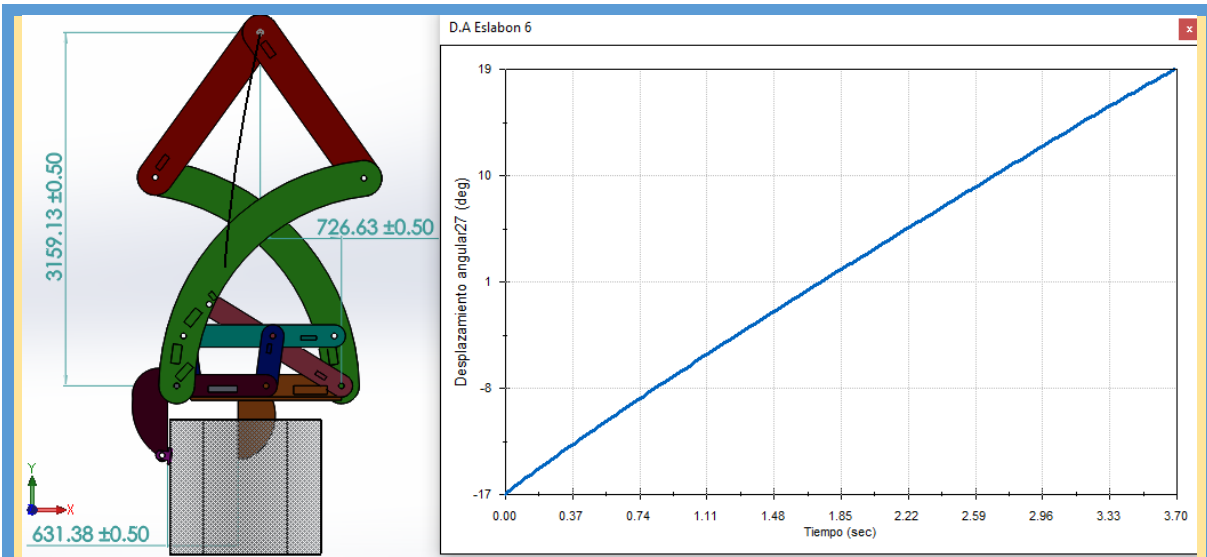


Figura 71. Desplazamiento angular del fi65 (eslabón 6). Primera inversión cinemática

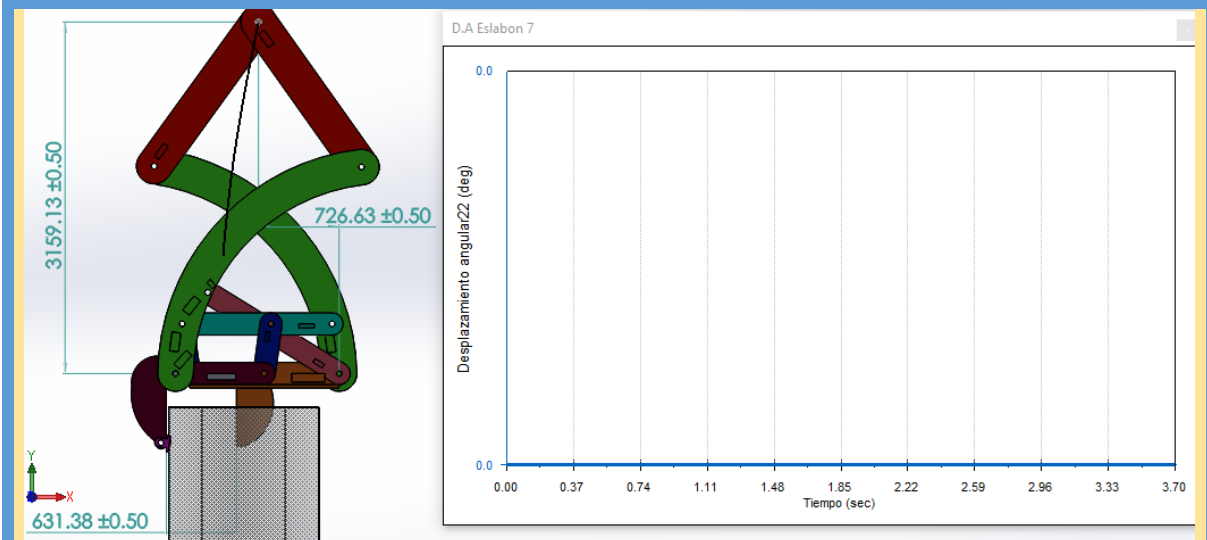


Figura 72. Desplazamiento angular del fi7 (eslabón 7). Primera inversión cinemática

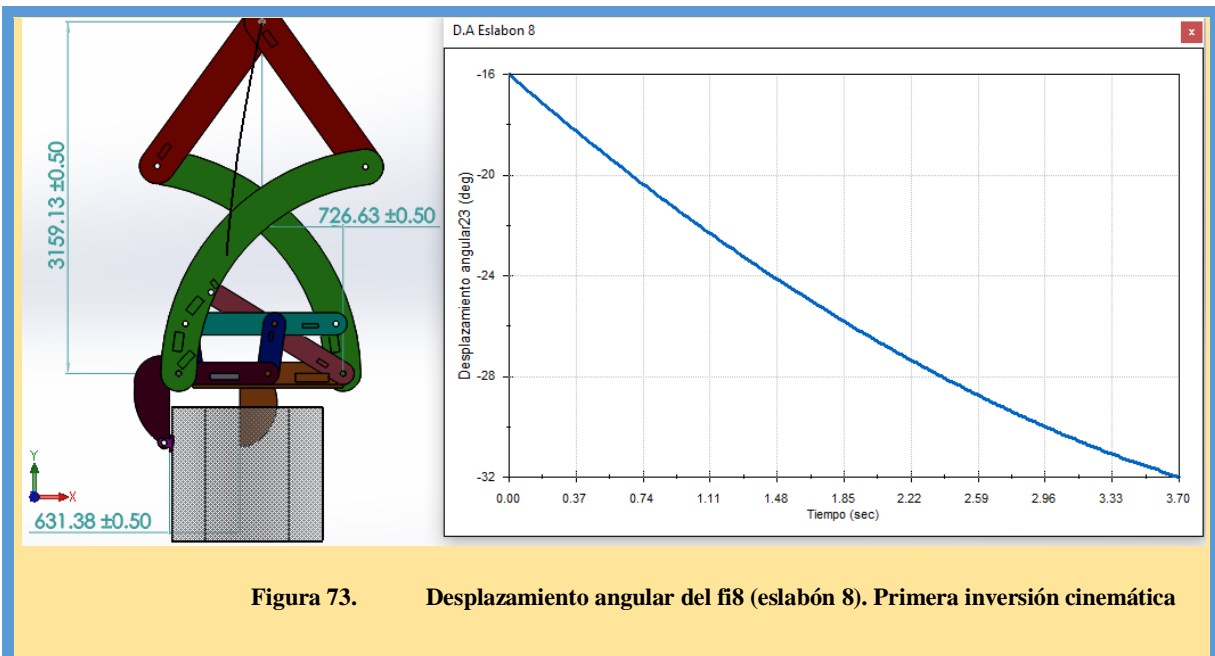


Figura 73. Desplazamiento angular del fi8 (eslabón 8). Primera inversión cinemática

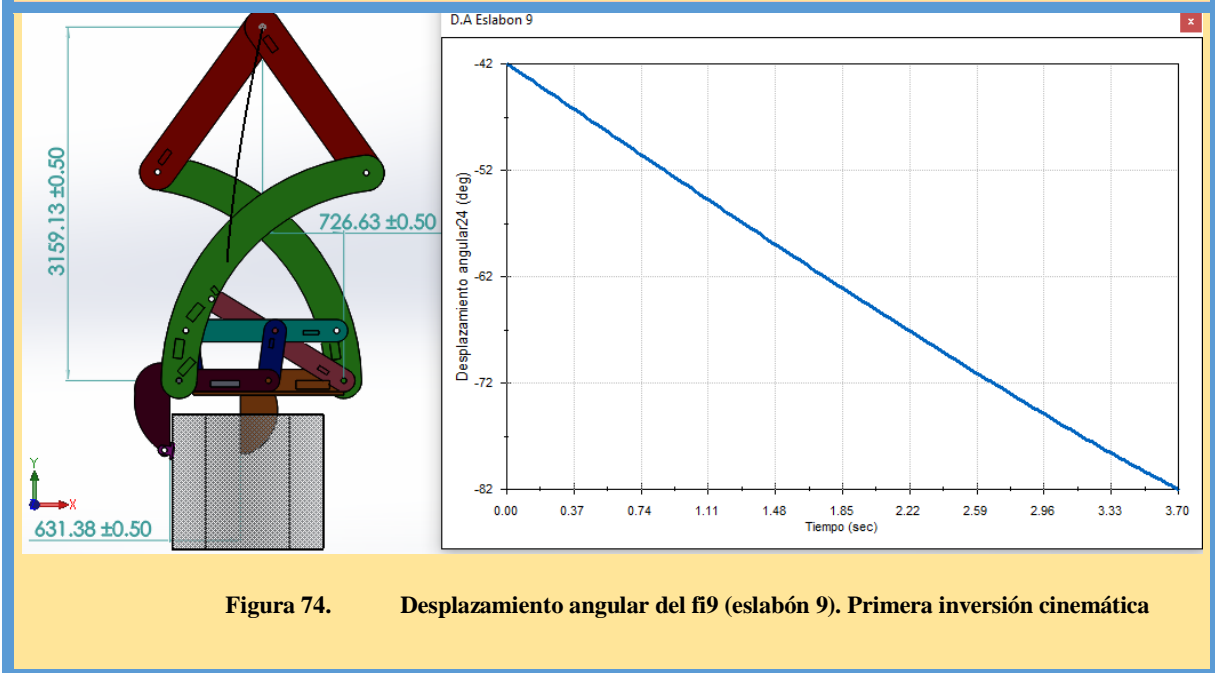


Figura 74. Desplazamiento angular del fi9 (eslabón 9). Primera inversión cinemática

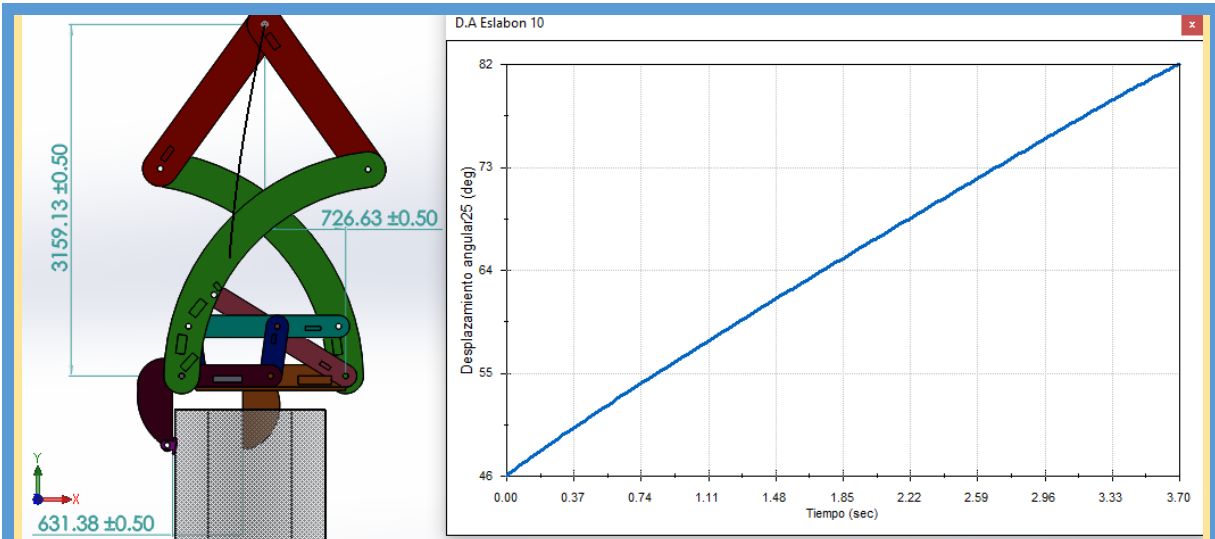


Figura 75. Desplazamiento angular del fi10 (eslabón 10). Primera inversión cinemática

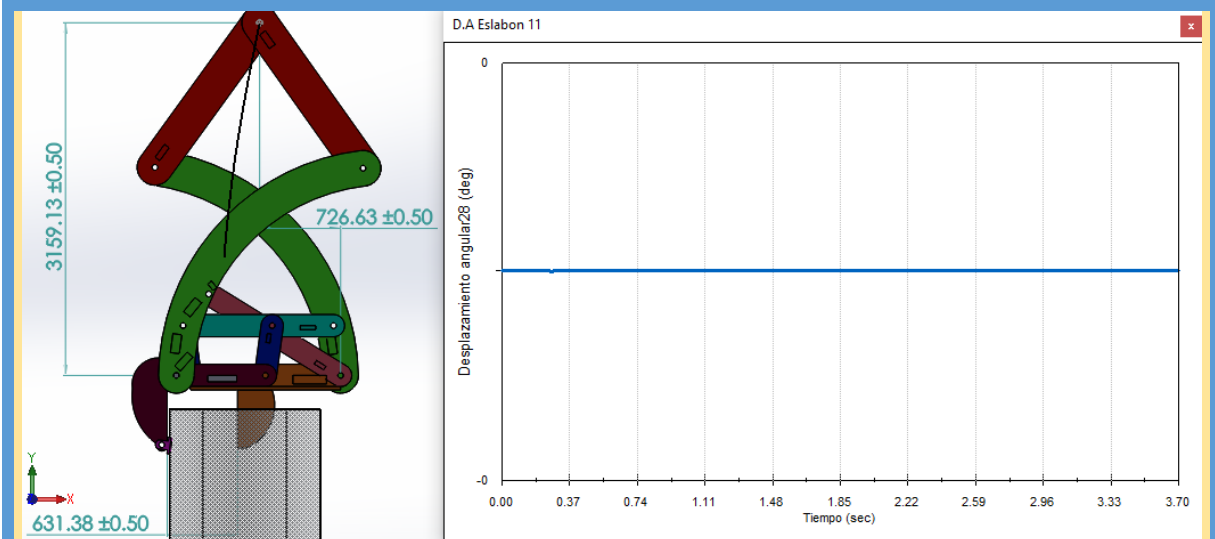


Figura 76. Desplazamiento angular del fi11 (eslabón 11). Primera inversión cinemática

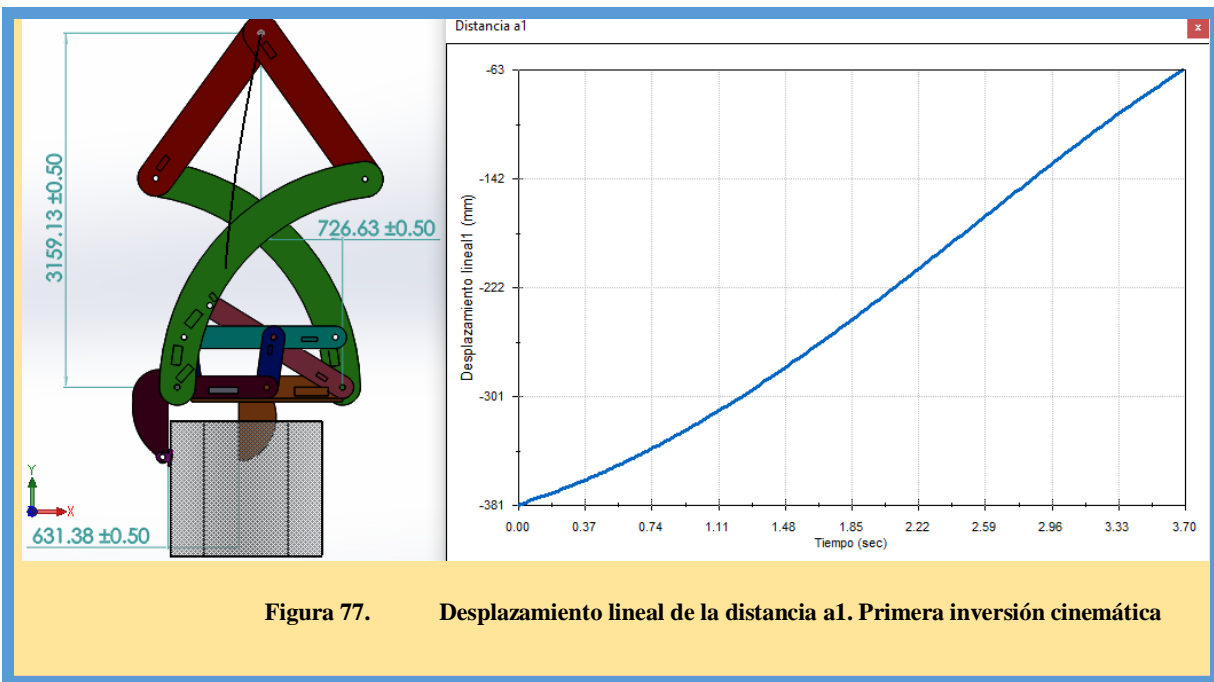


Figura 77. Desplazamiento lineal de la distancia a1. Primera inversión cinemática

17.2. Resultados de la segunda inversión cinemática

Todas las imágenes presentes en la sección 17.2 que va de la figura 78 a la 87, representan los resultados obtenidos por la simulación en SolidWorks del desplazamiento angular para los ángulos de la segunda inversión cinemática que involucra a los circuitos del VI al X. Cabe mencionar que SolidWorks no grafica respecto a la coordenada de entrada que es la altura l_2 , sino que lo hace respecto al tiempo.

NOTA: Para todos los casos SolidWorks muestra el ángulo complementario, lo cual no es malo, simplemente a nosotros no nos interesa, queremos ver el ángulo el ángulo suplementario. Para lo cual restaríamos 180° a los resultantes de las gráficas del

desplazamiento angular en SolidWorks, lo cual nos arrojará los ángulos correspondientes a los cálculos.

Excepto para el caso de fi61 lo haremos restándole 90°

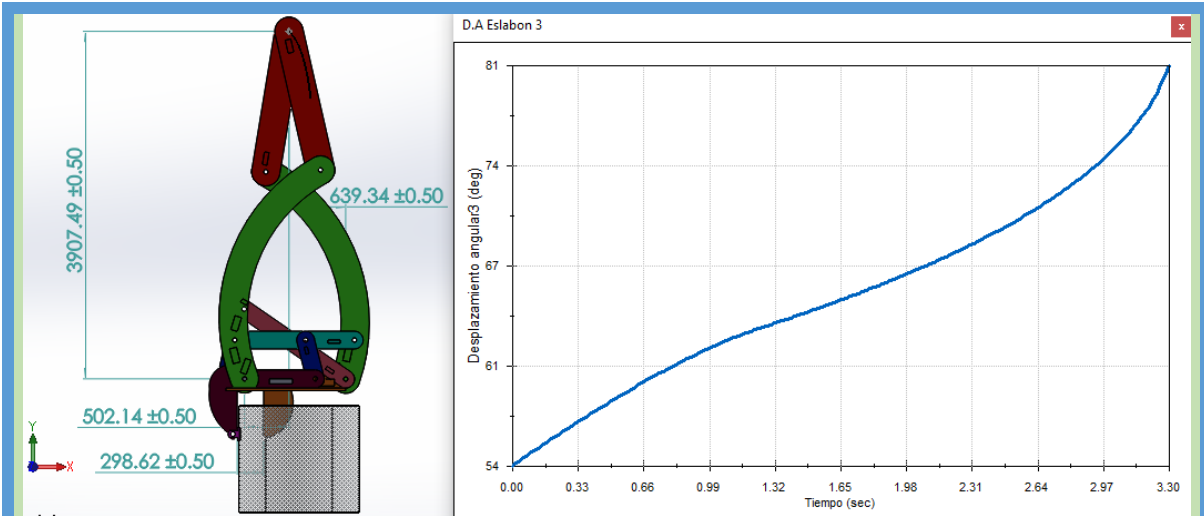


Figura 78. Desplazamiento angular del fi3 (eslabón 3). Segunda inversión cinemática

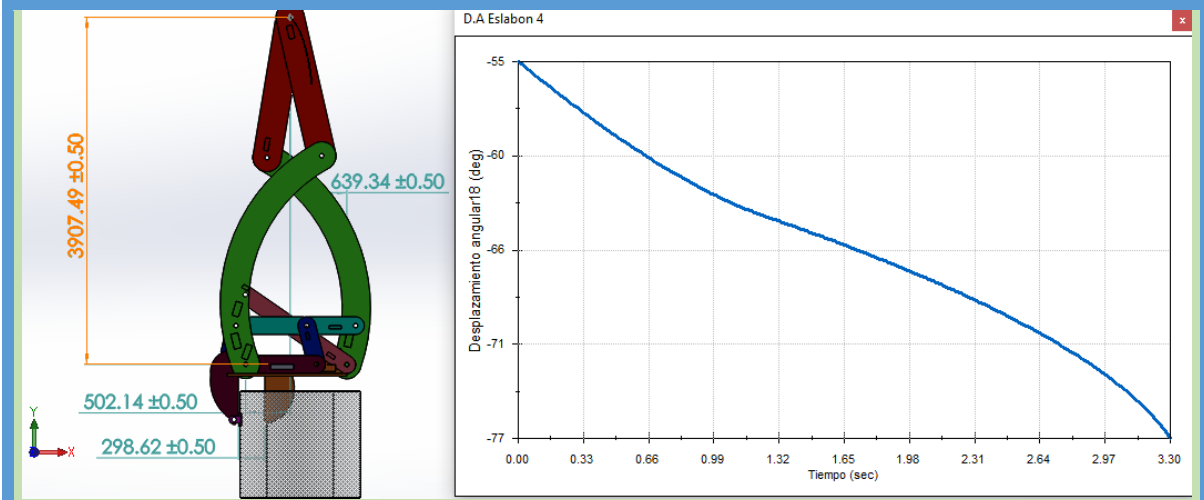


Figura 79. Desplazamiento angular del fi4 (eslabón 4). Segunda inversión cinemática

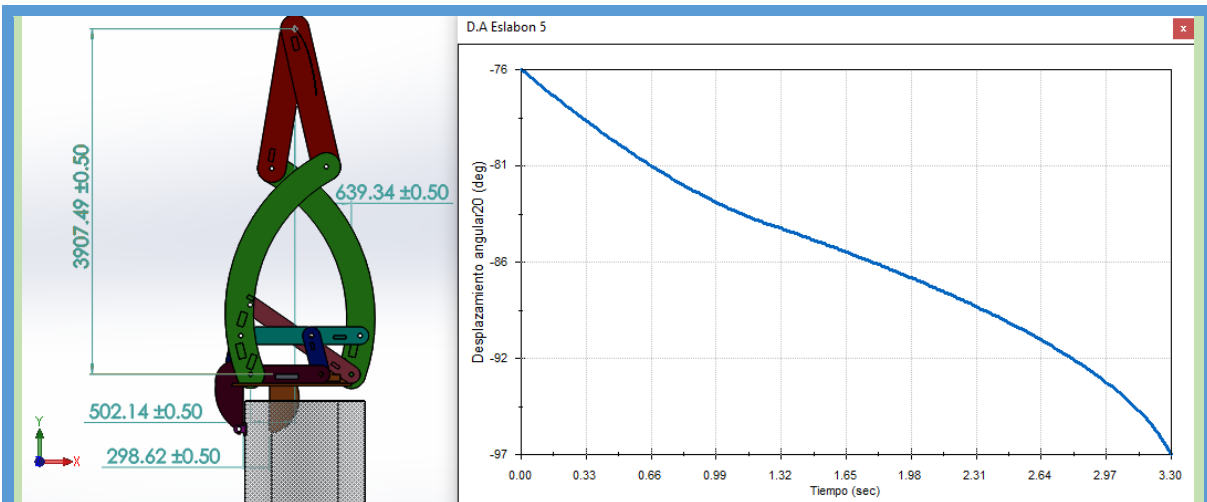


Figura 80. Desplazamiento angular del fi51 (eslabón 5). Segunda inversión cinemática

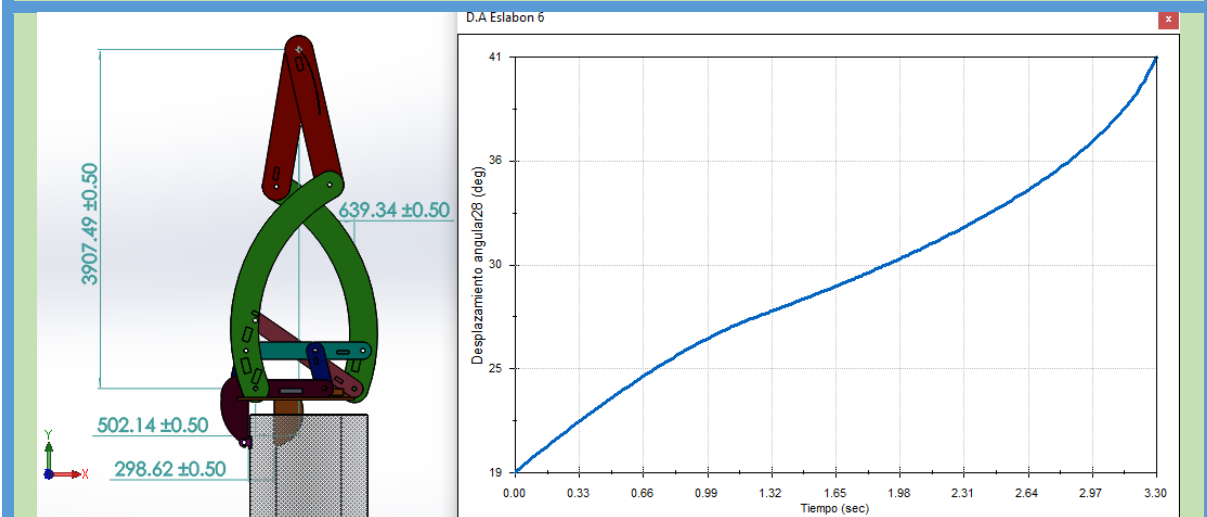


Figura 81. Desplazamiento angular del fi65 (eslabón 6). Segunda inversión cinemática

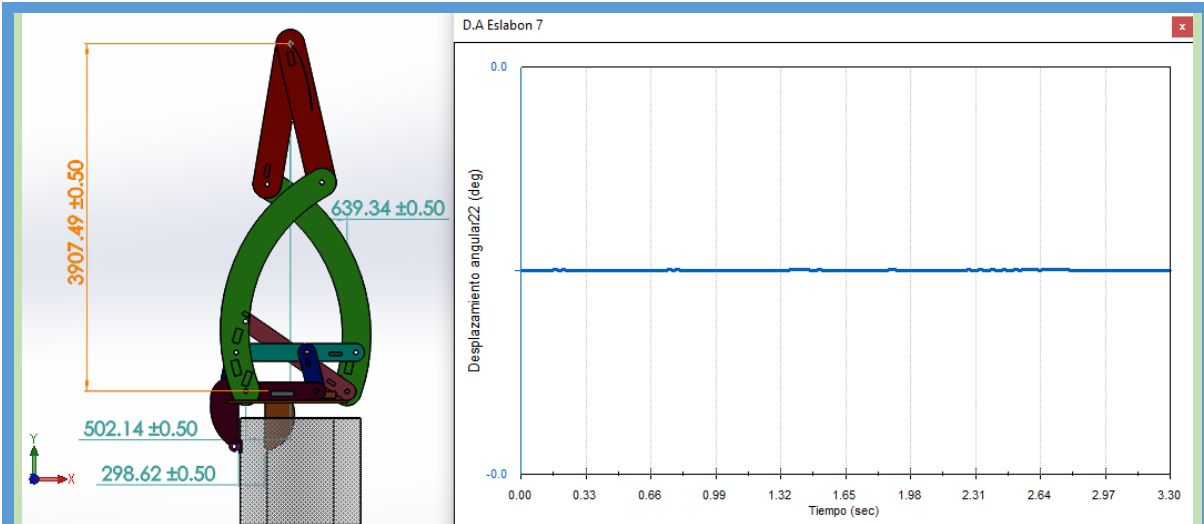


Figura 82. Desplazamiento angular del fi7 (eslabón 7). Segunda inversión cinemática

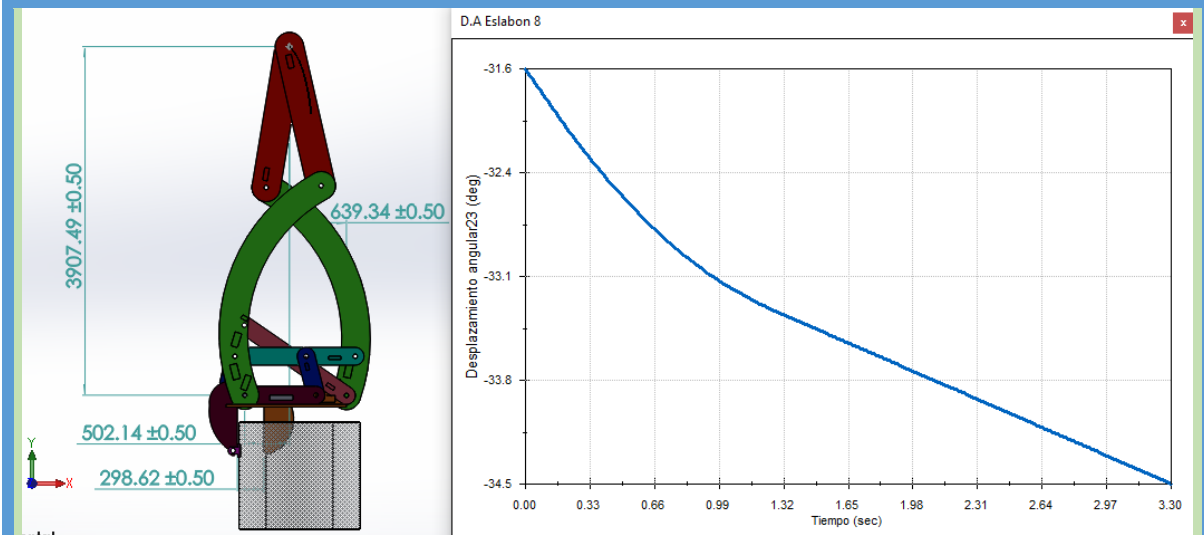


Figura 83. Desplazamiento angular del fi8 (eslabón 8). Segunda inversión cinemática

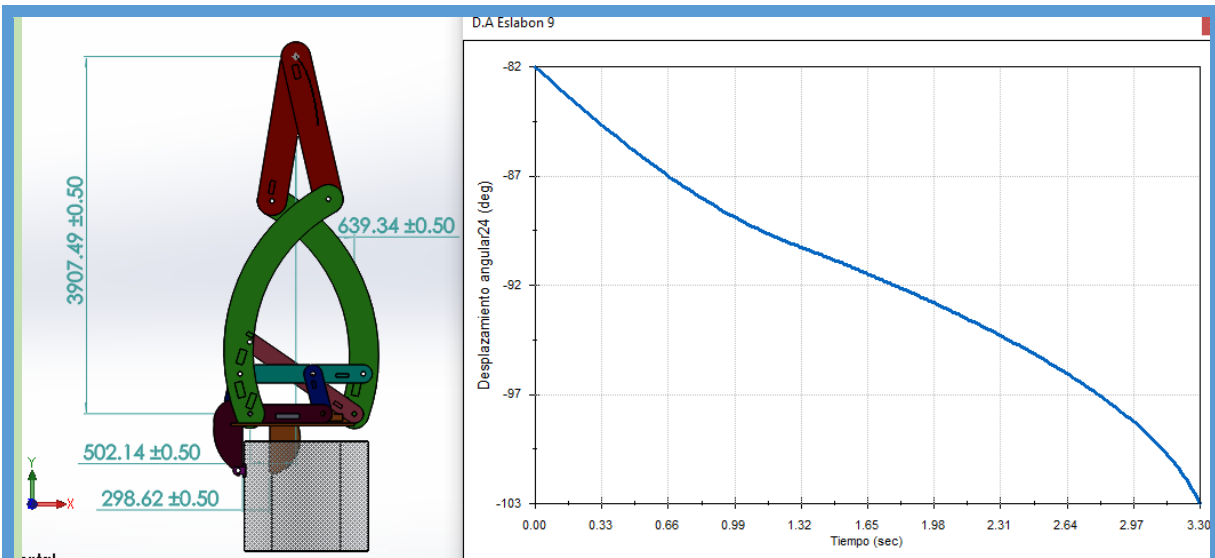


Figura 84. Desplazamiento angular del fi9 (eslabón 9). Segunda inversión cinemática

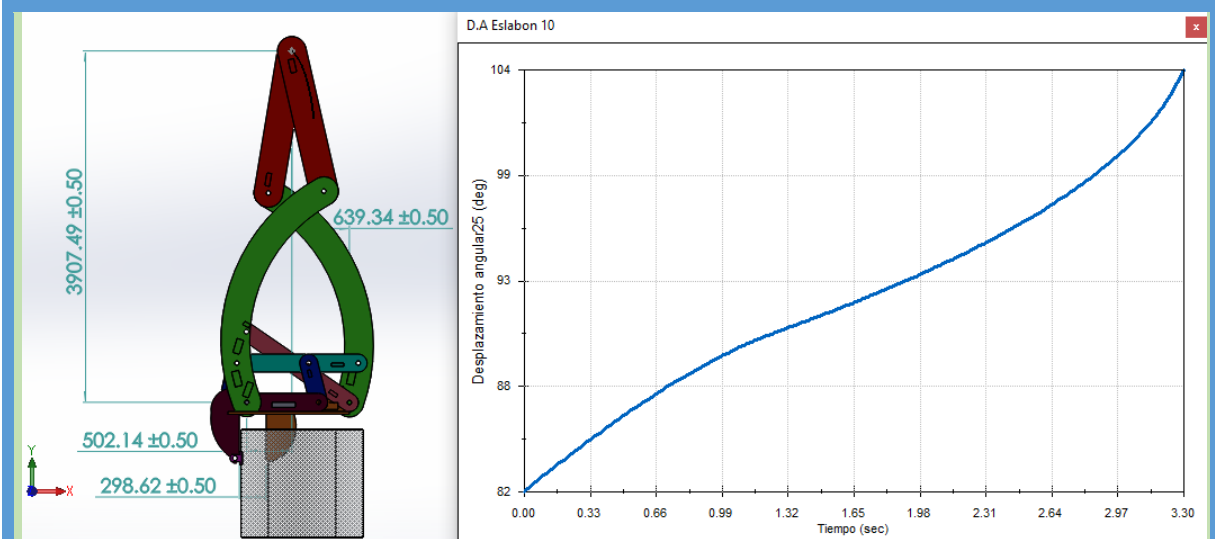


Figura 85. Desplazamiento angular del fi10 (eslabón 10). Segunda inversión cinemática

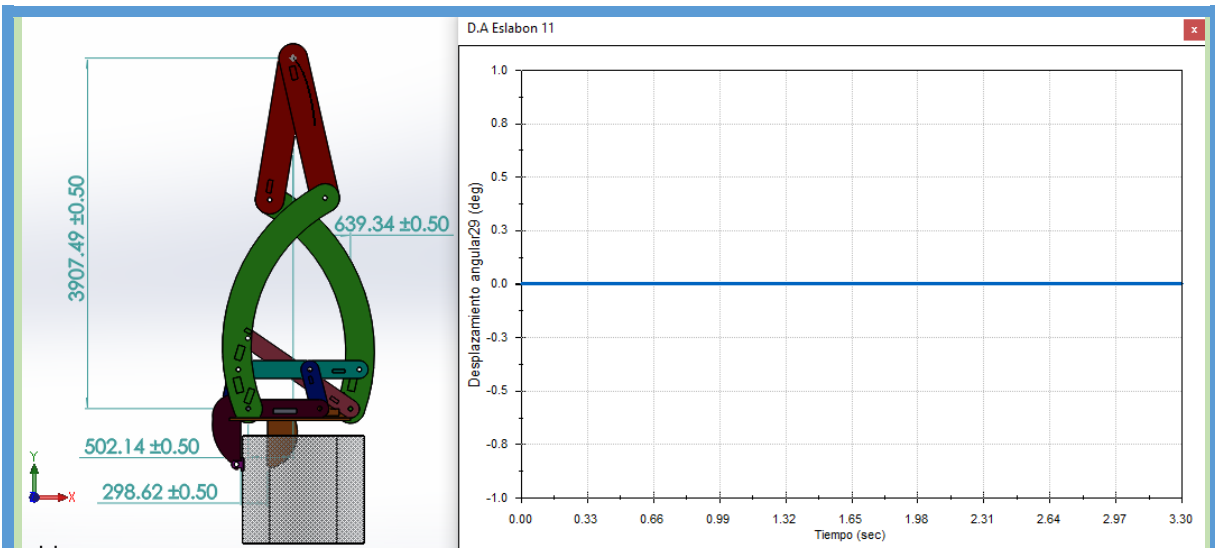


Figura 86. Desplazamiento angular del fi11 (eslabón 11). Segunda inversión cinemática

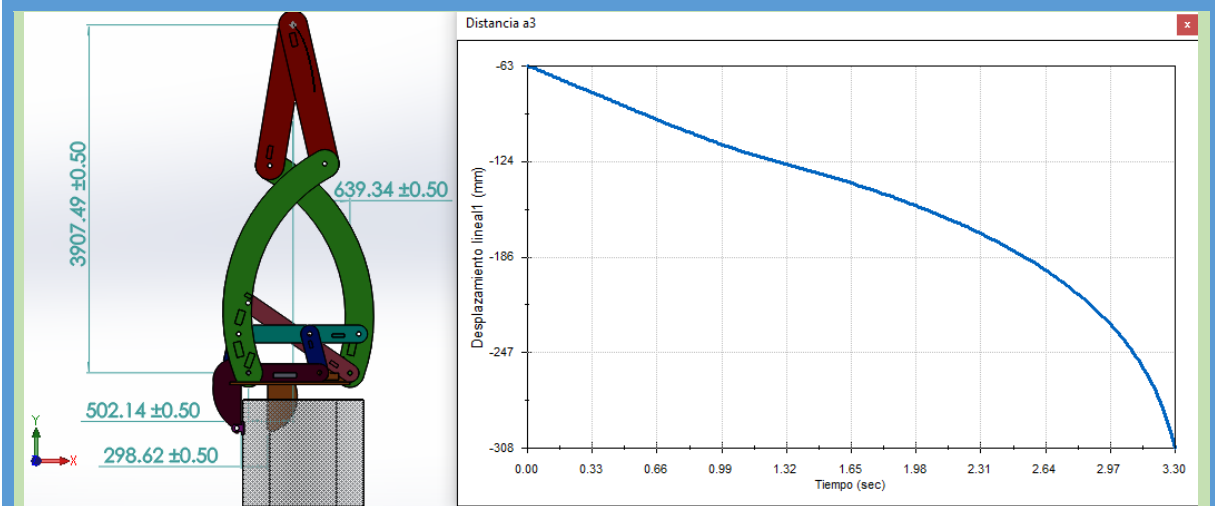
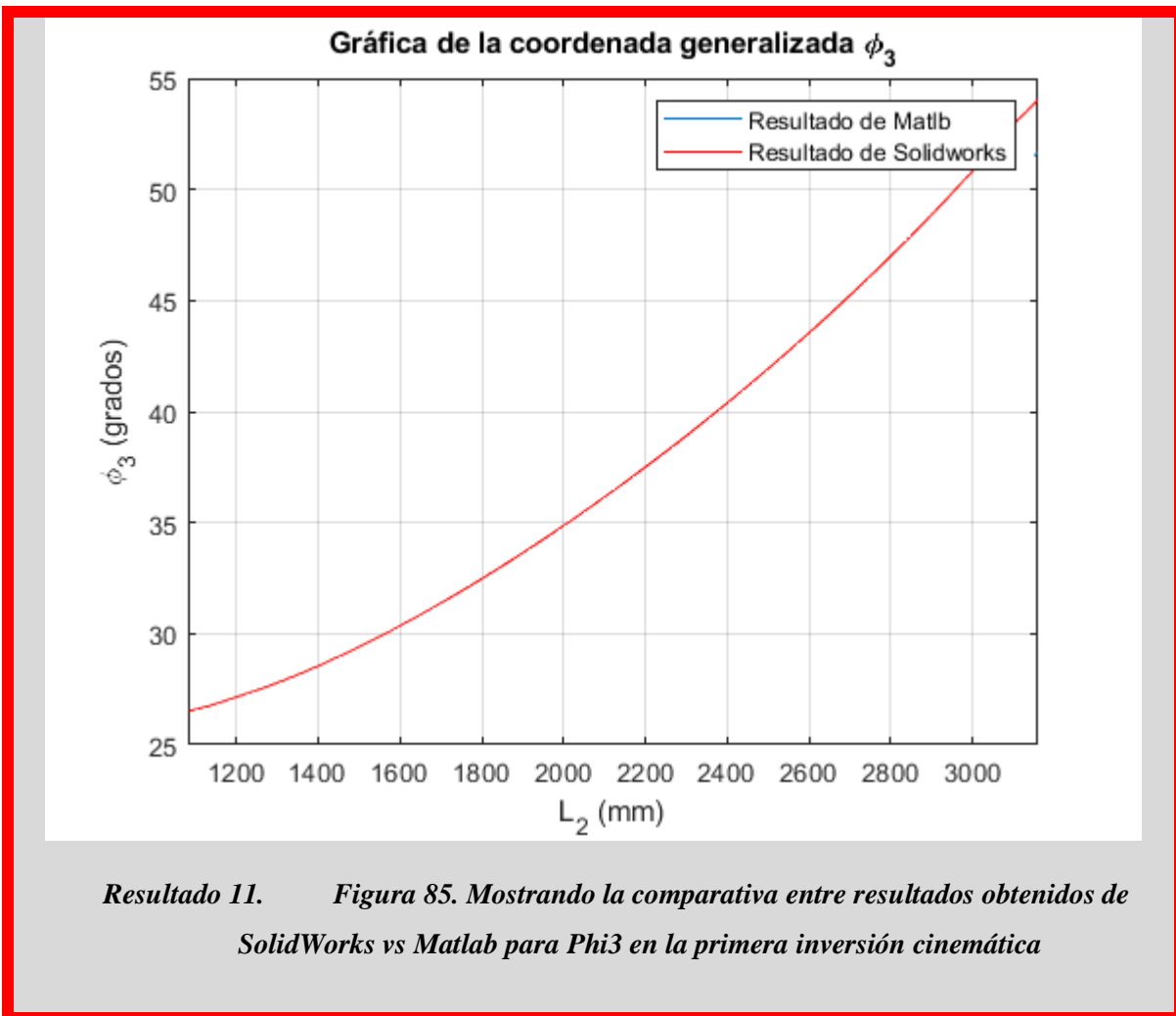
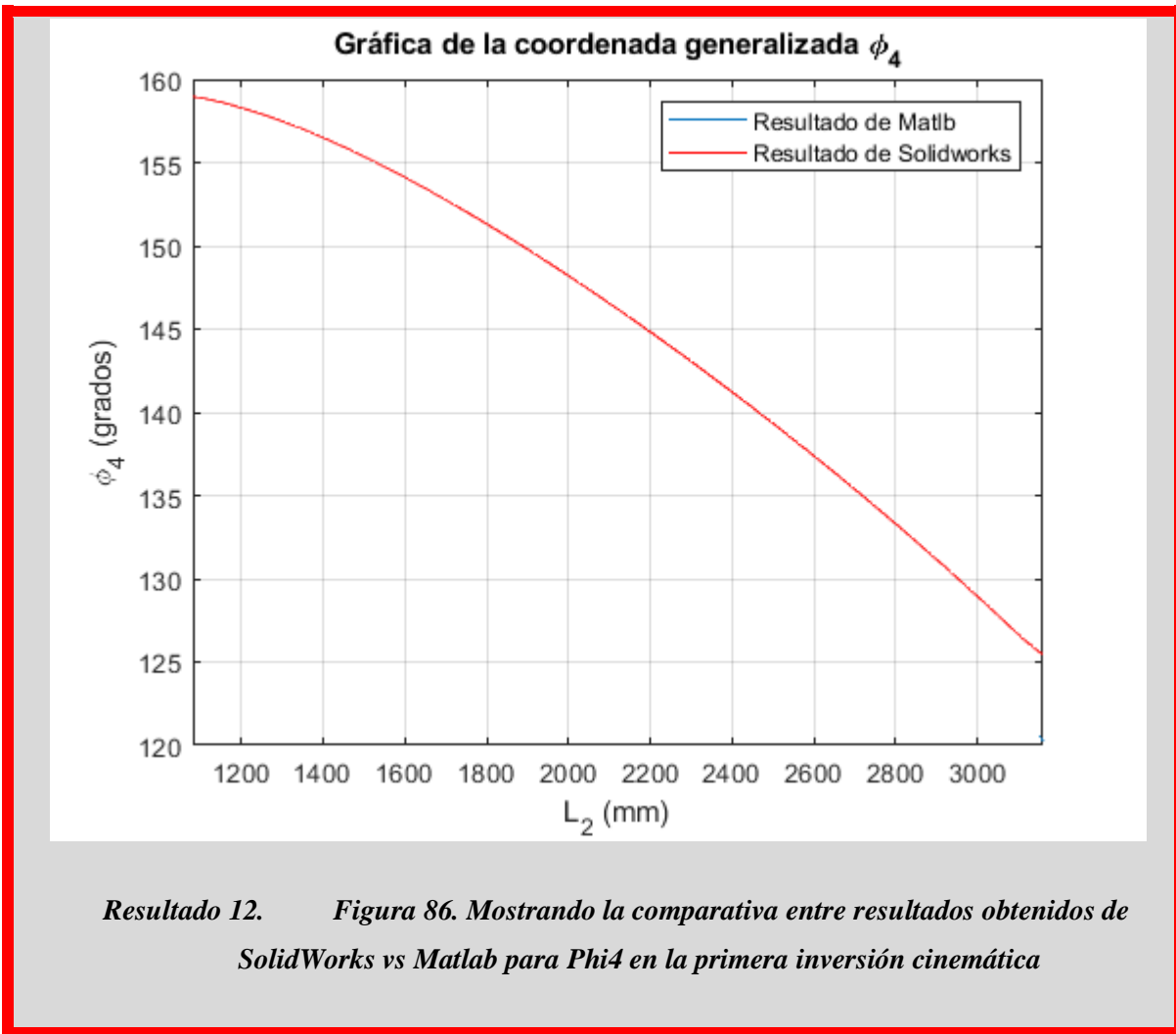


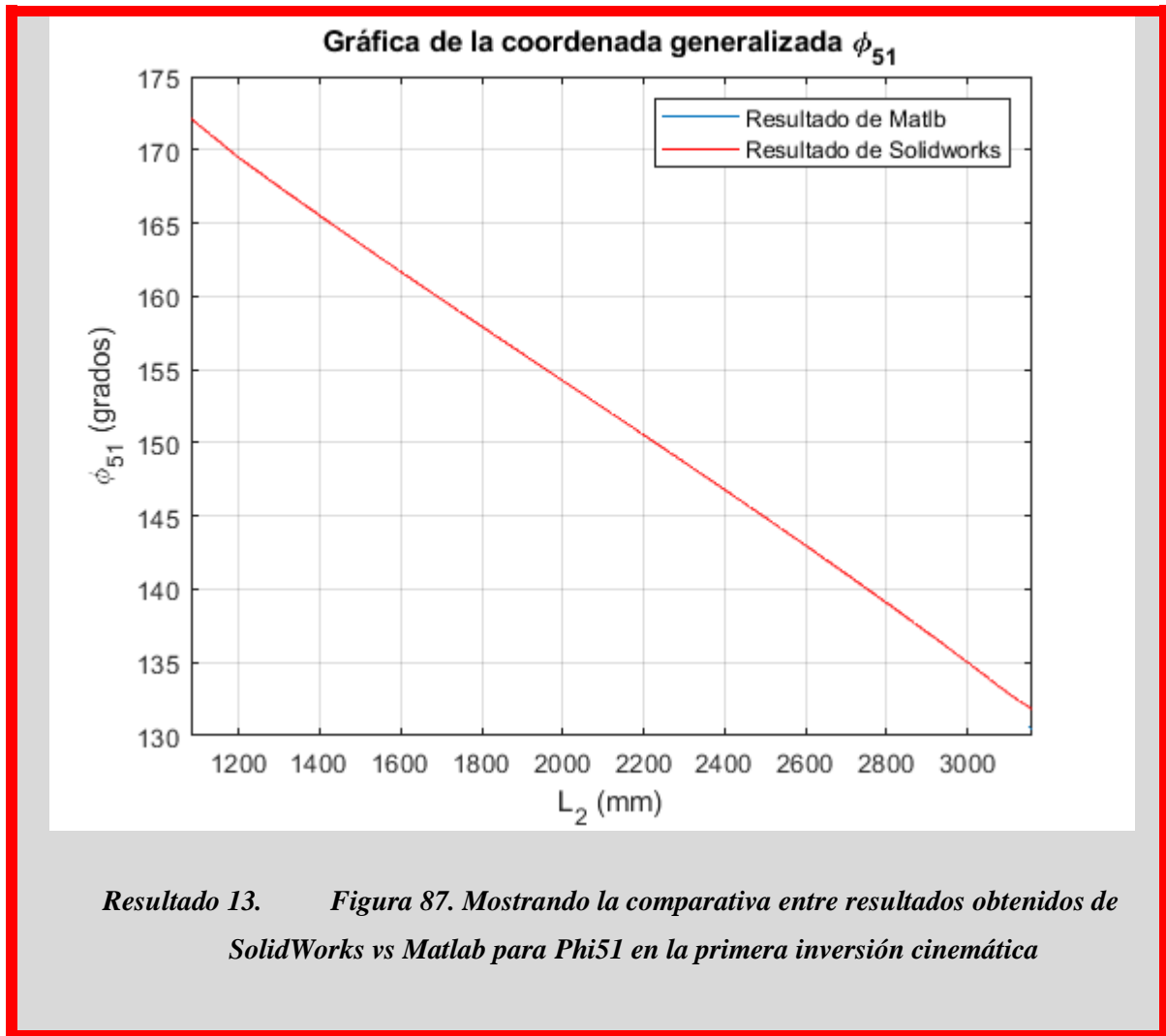
Figura 87. Desplazamiento lineal de la distancia a3.. Segunda inversión cinemática

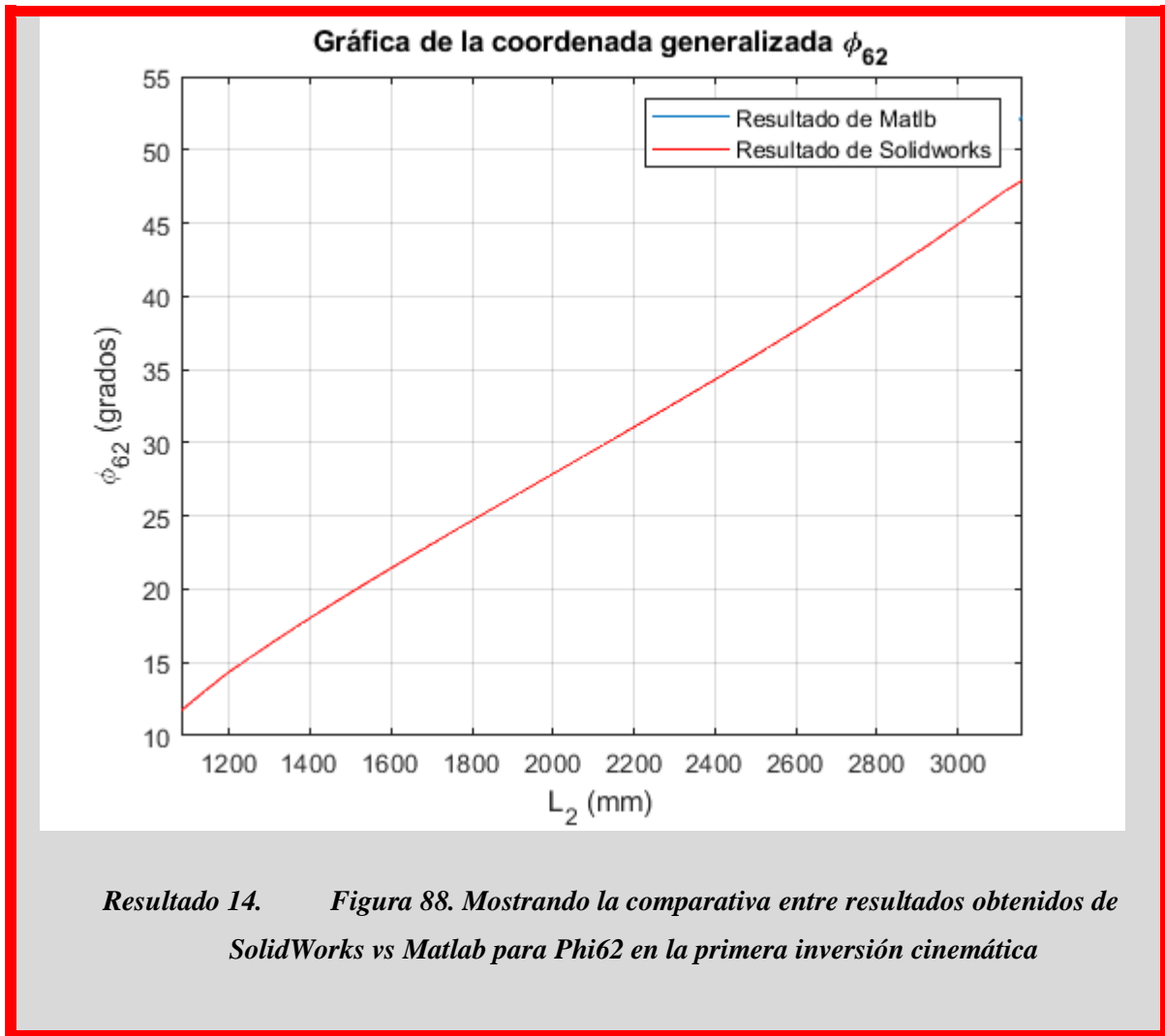
17.3. Comparativa de resultados obtenidos en la primera inversión cinemática entre la simulación del software matemático y el software de CAD

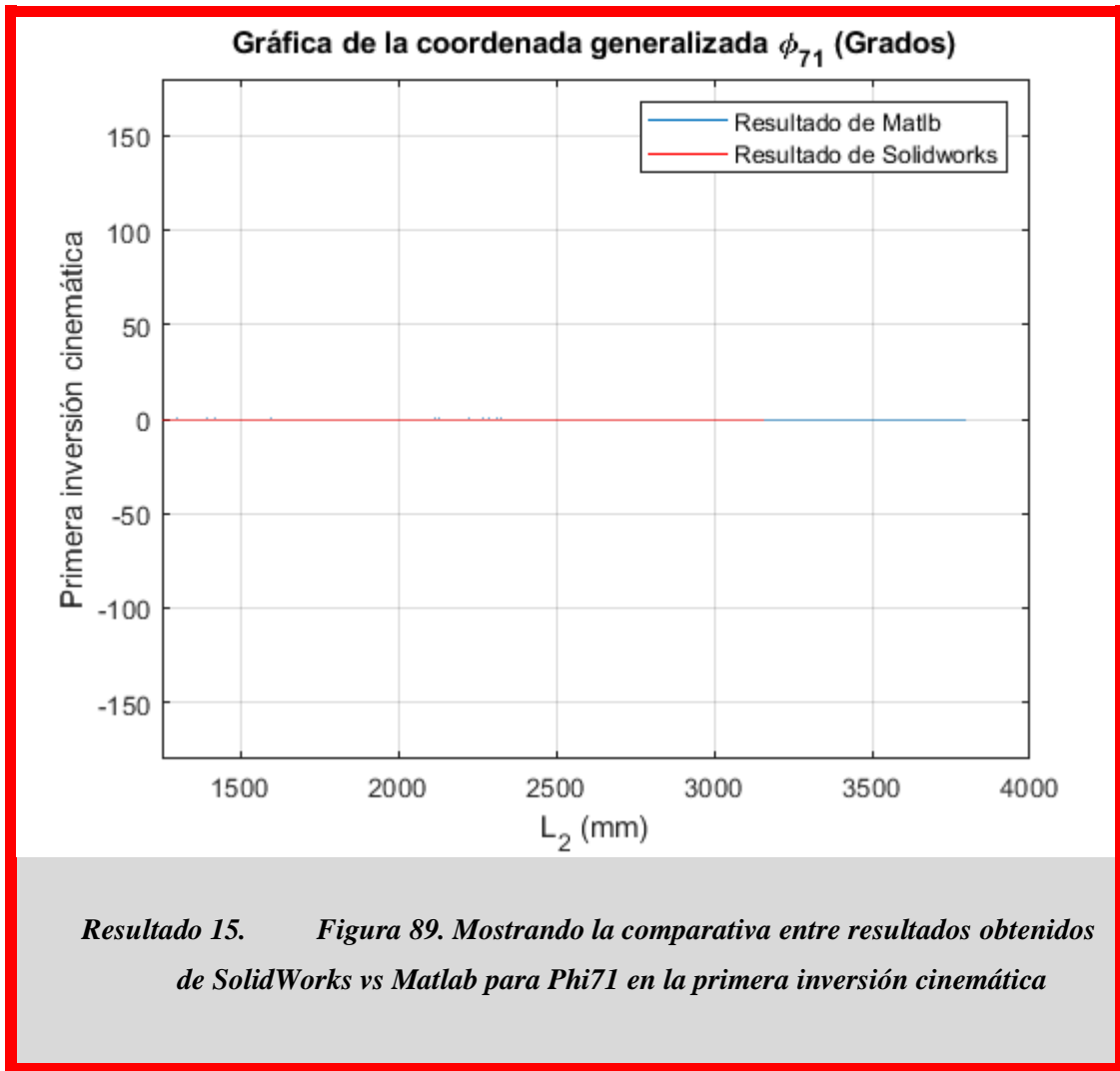
A continuación en los resultados del 11 al 26 podemos observar la comparativa de resultados entre los softwares ya mencionados. Como describen las imágenes, la línea azul es el resultado obtenido por Matlab y la roja es el de solidworks. Están contemplados todos los ángulos, como lo son: φ_3 , φ_4 , φ_{51} , φ_{62} , φ_{71} , φ_8 , φ_9 , φ_{10} .



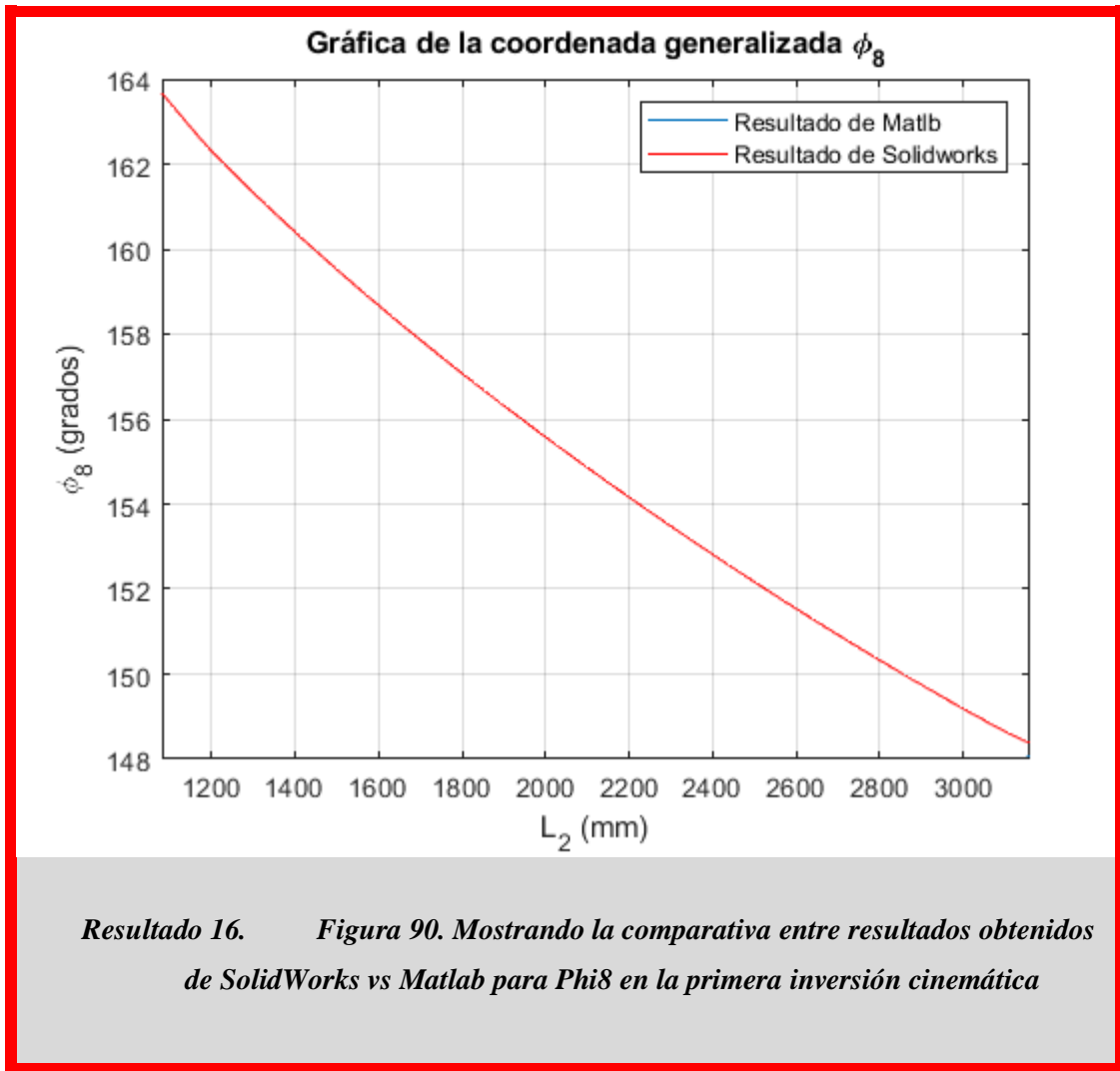


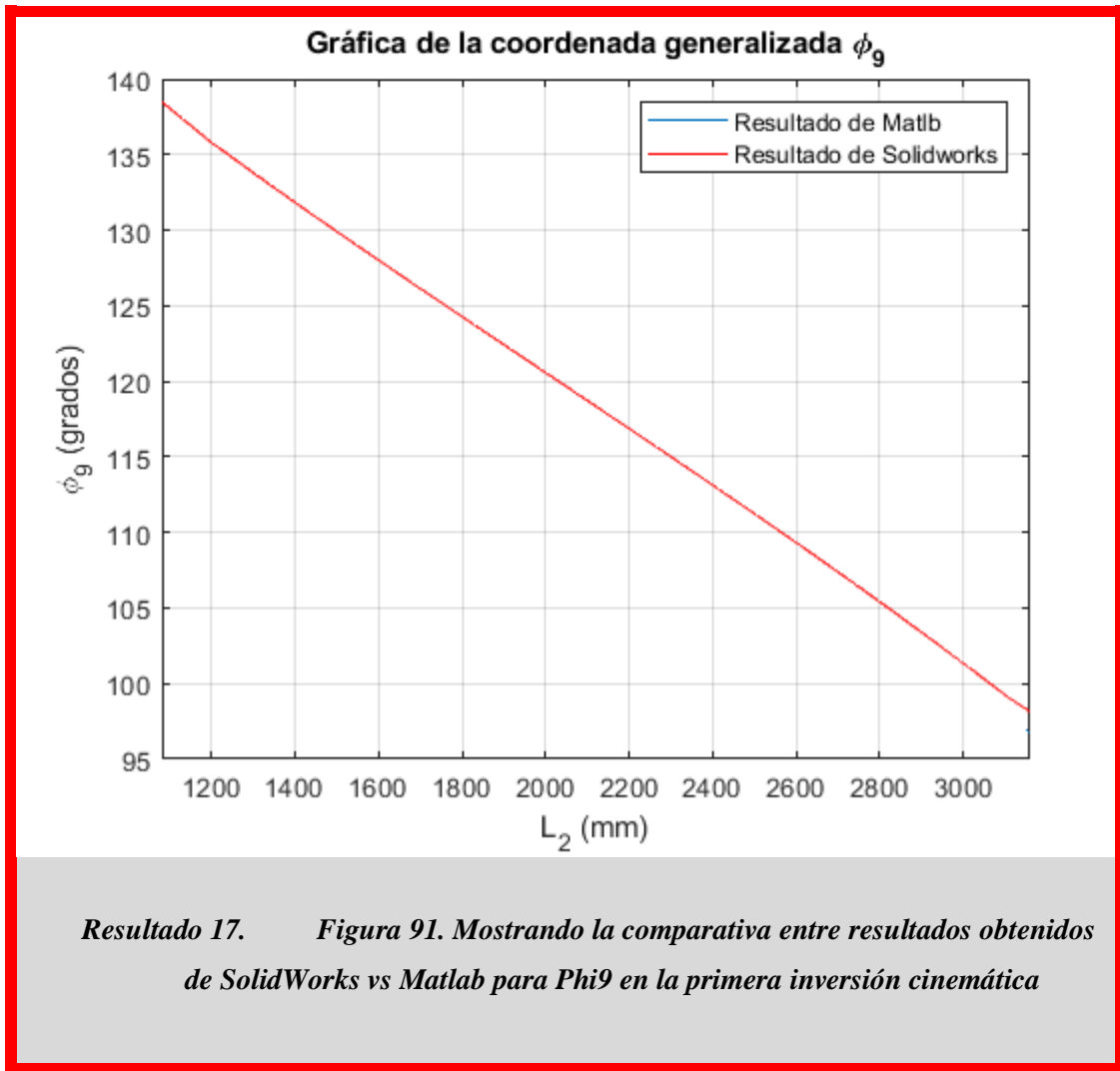


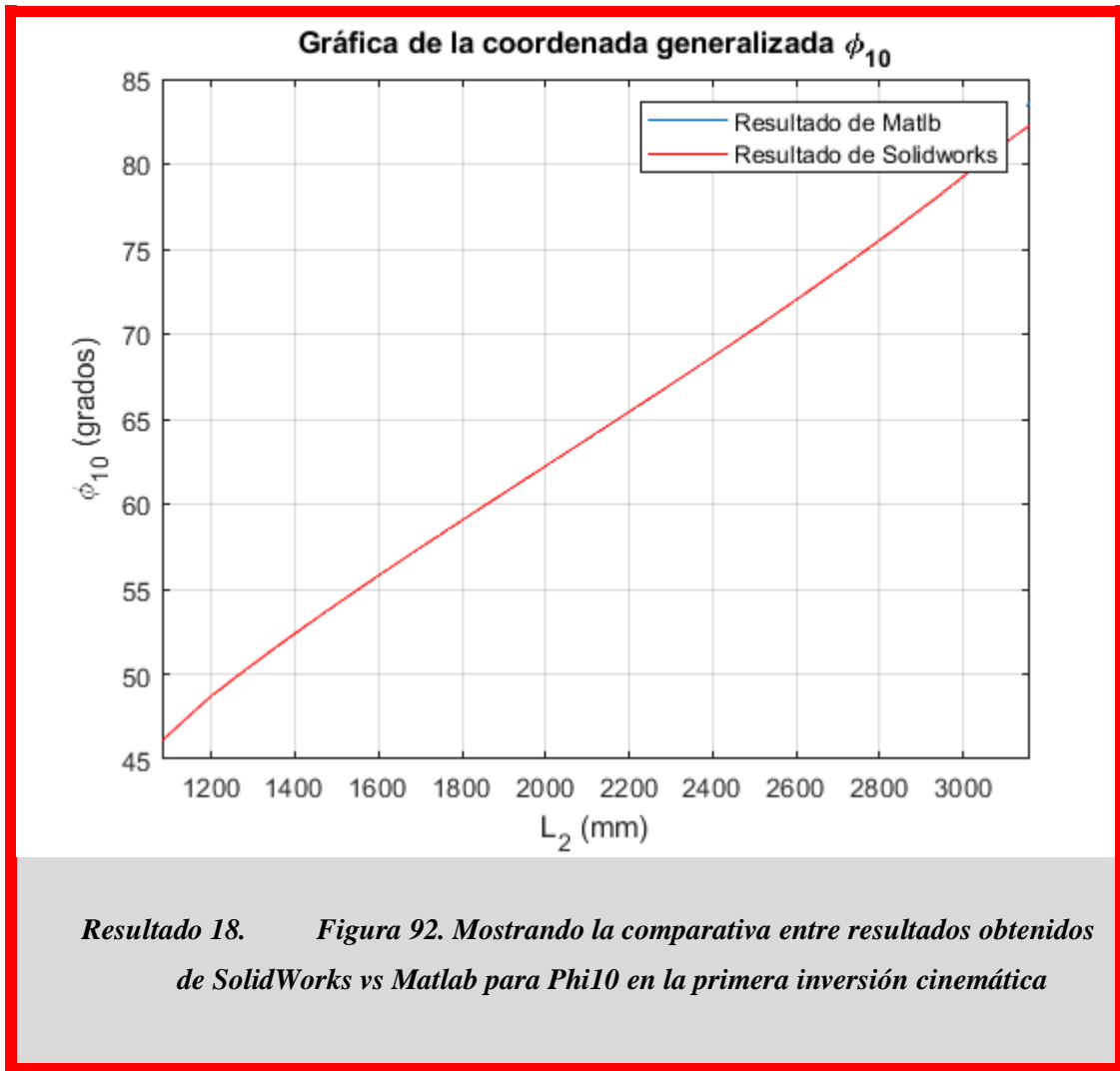




Resultado 15. Figura 89. Mostrando la comparativa entre resultados obtenidos de SolidWorks vs Matlab para Phi71 en la primera inversión cinemática

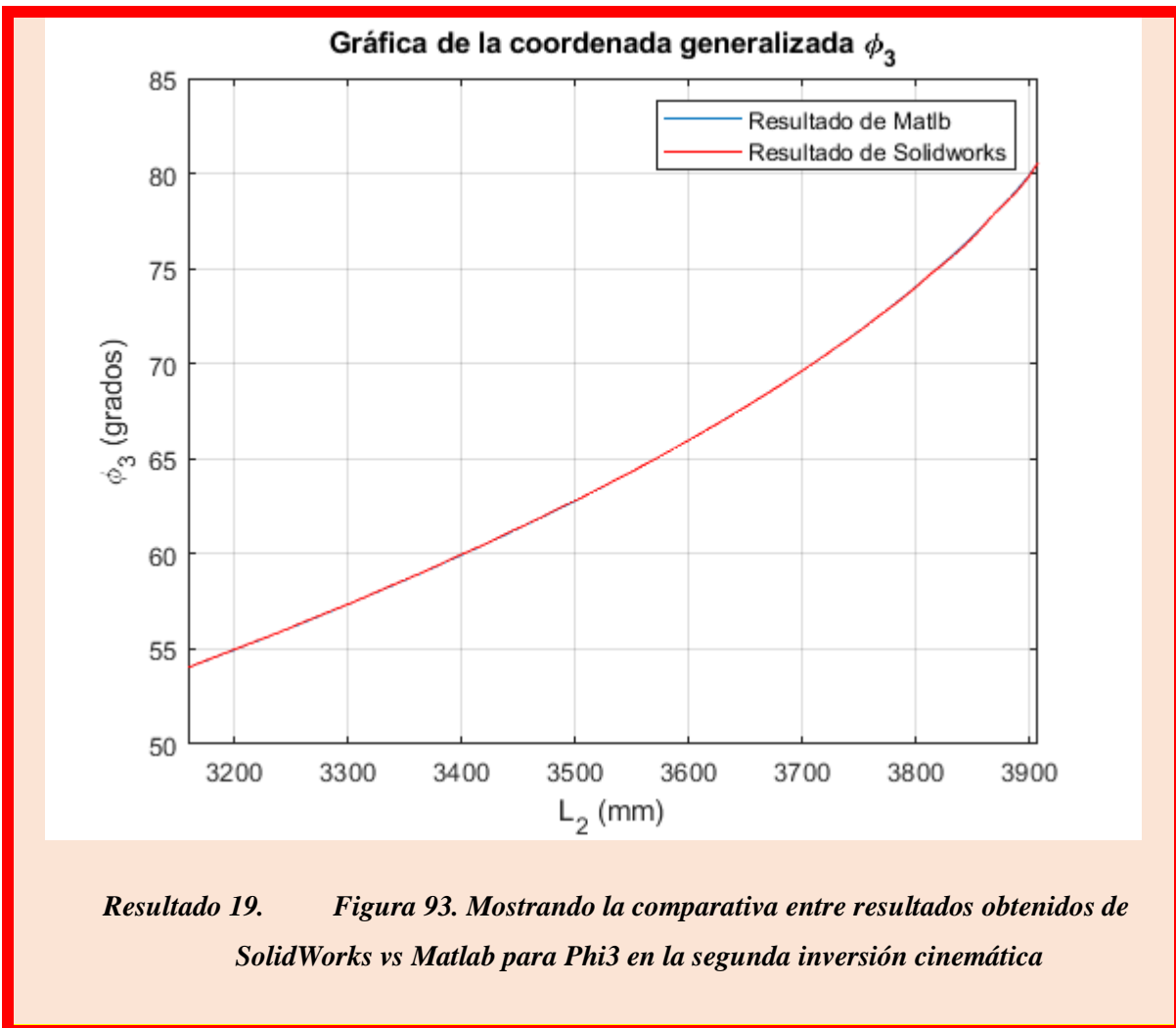


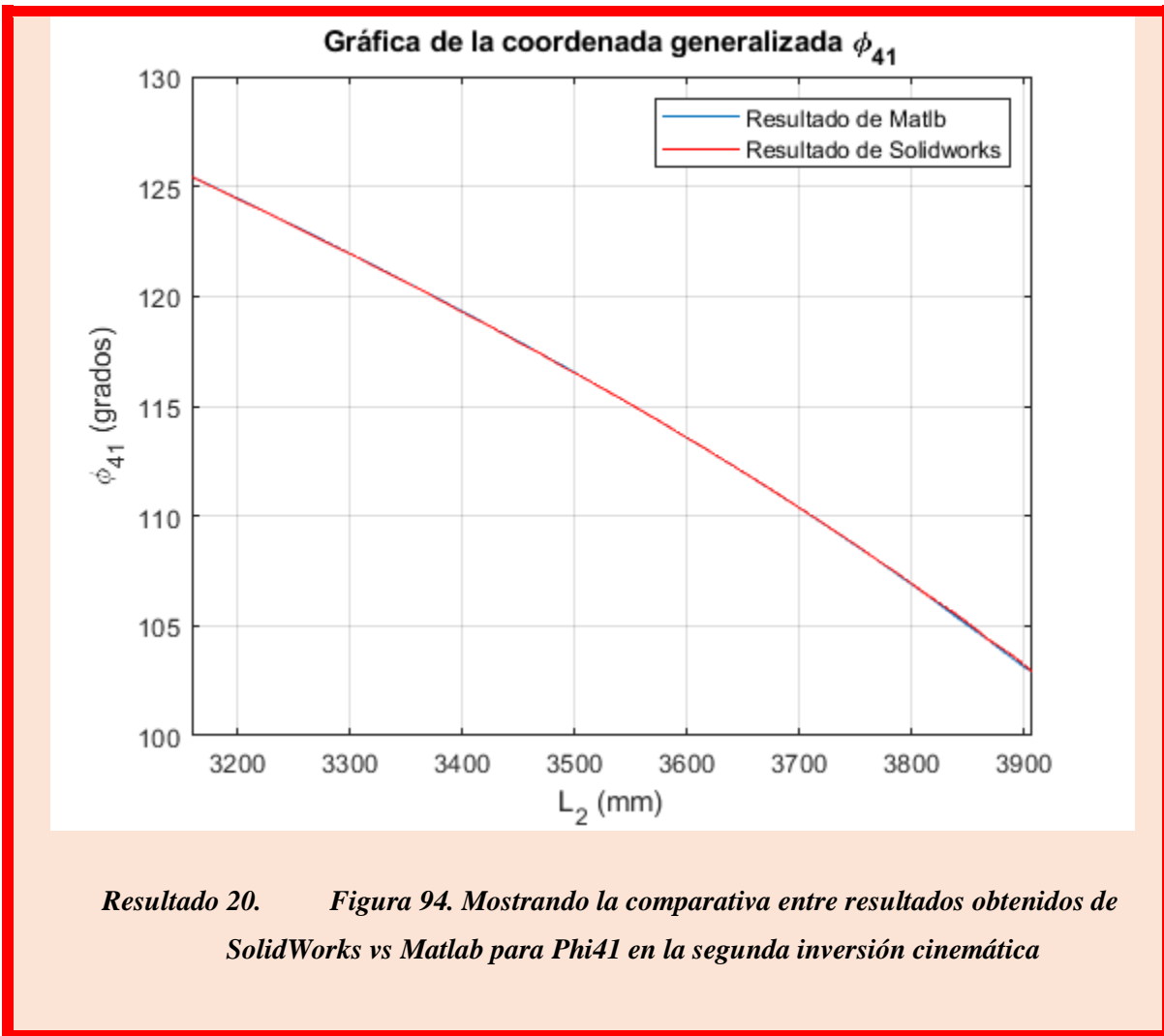


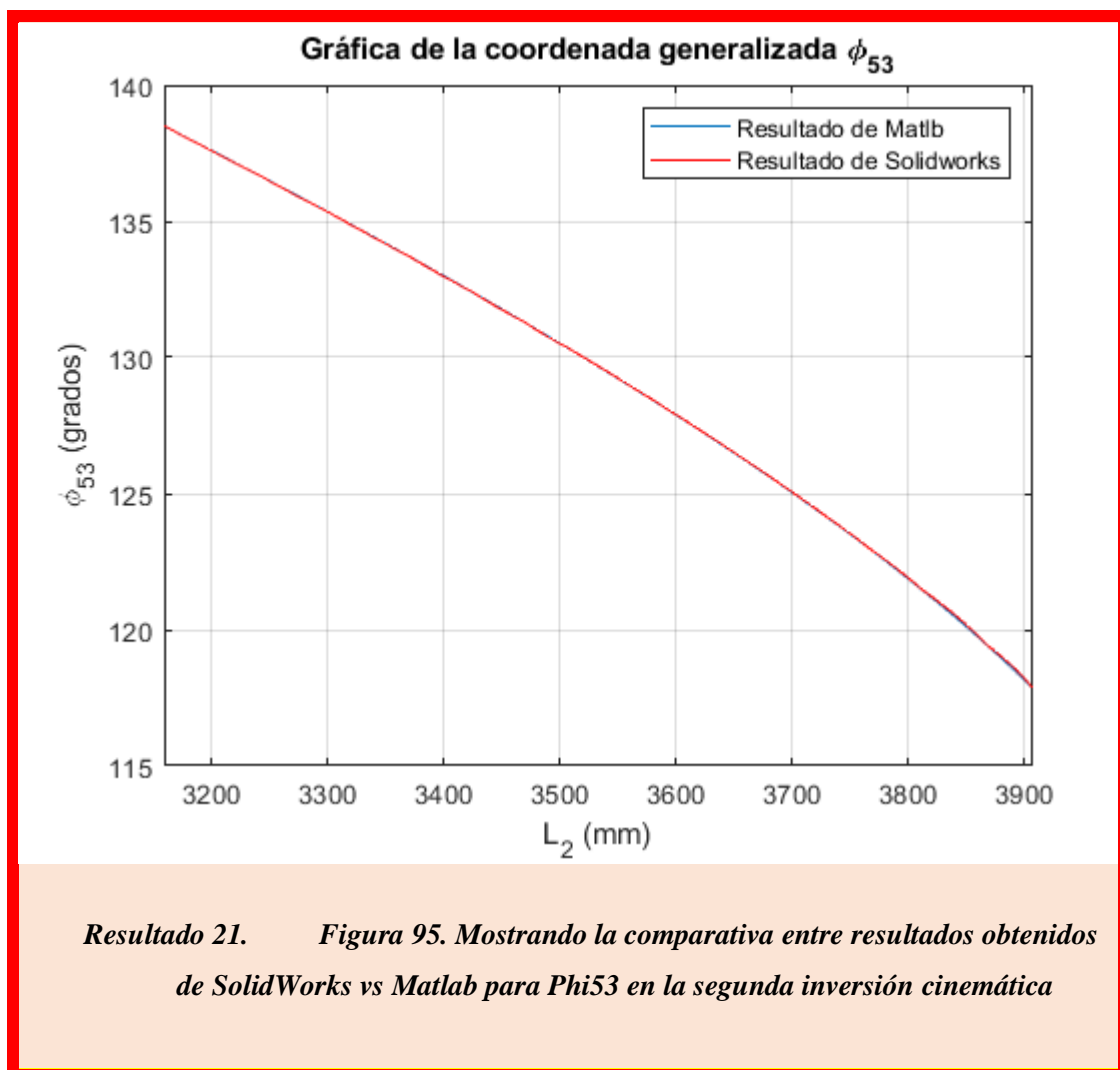


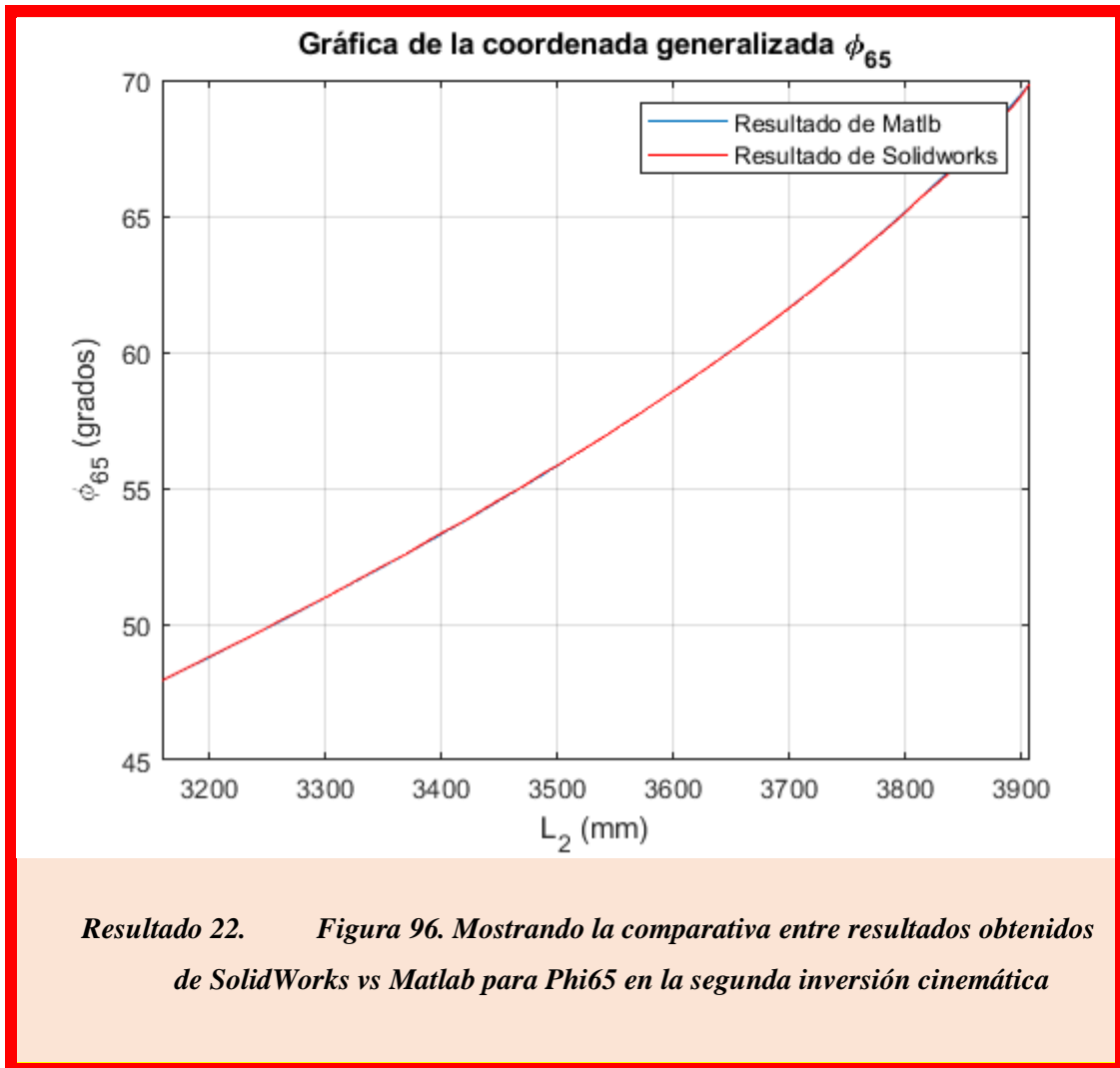
17.4. Comparativa de resultados obtenidos en la segunda inversión cinemática entre la simulación del software matemático y el software de CAD

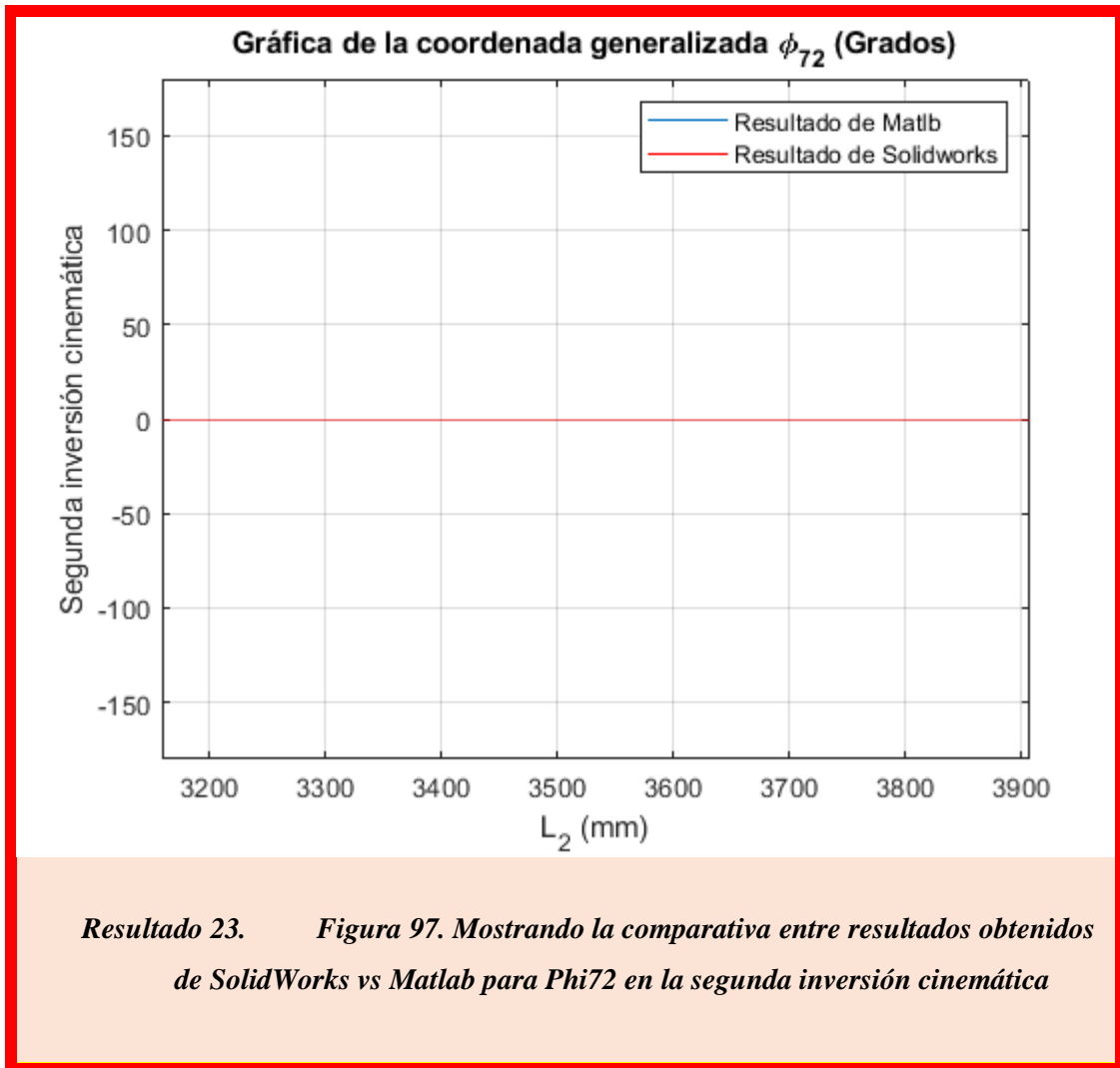
A continuación en los resultados del 11 al 26 podemos observar la comparativa de resultados entre los softwares ya mencionados. Como describen las imágenes, la línea azul es el resultado obtenido por Matlab y la roja es el de Solidworks. Están contemplados todos los ángulos, como lo son: φ_3 , φ_{41} , φ_{53} , φ_{65} , φ_{72} , φ_8 , φ_9 , φ_{10} .

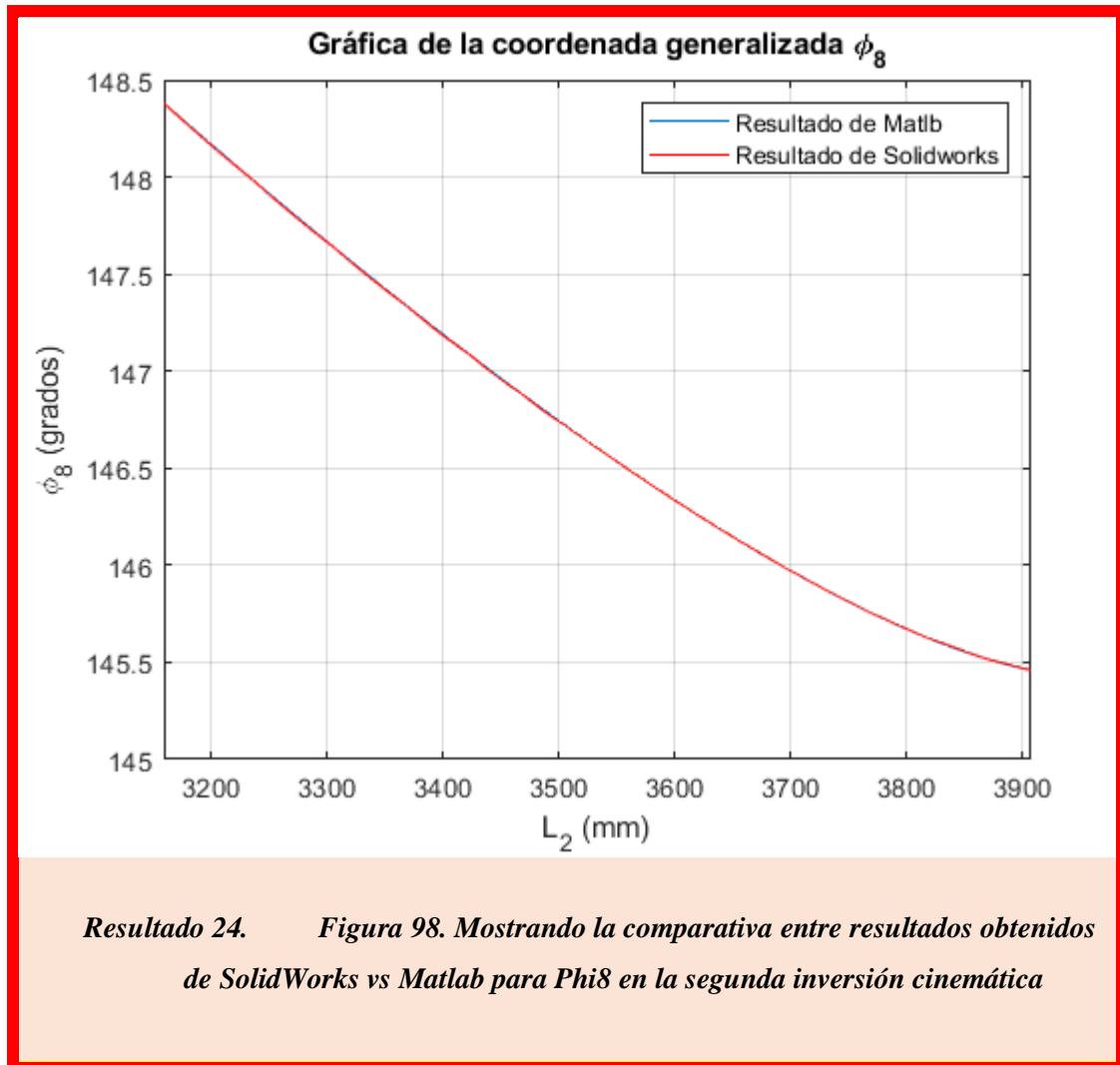


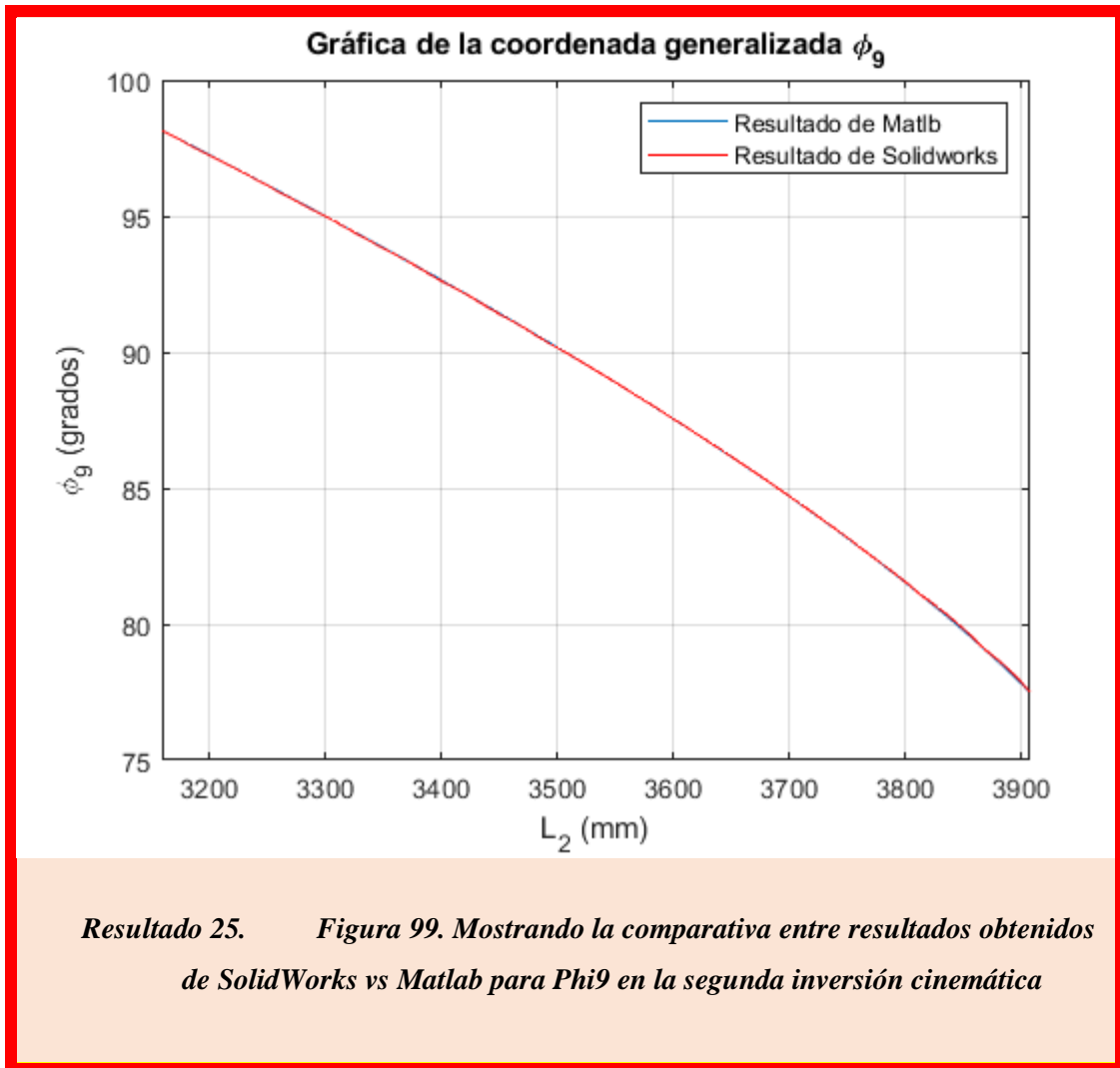


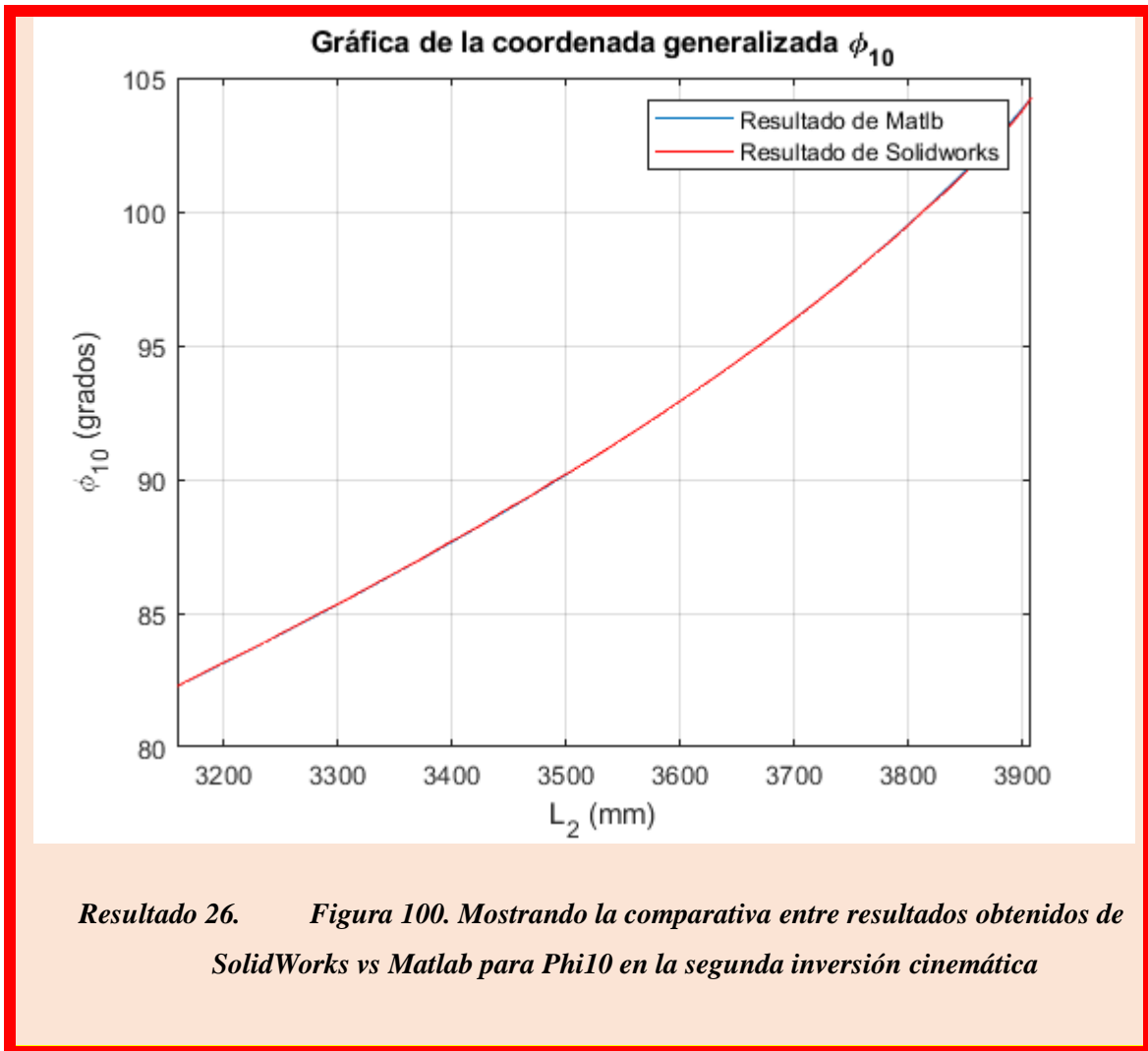












17.5. Resultados obtenidos por archivos externos

En las figuras 88 y 89 anexamos los archivos externos que ocupamos para calcular los ángulos y distancia que no conocíamos. Ambos están hechos en Excel.

En la figura 88 calculamos todos los ángulos de los eslabones 5 y 6; en la figura 89 obtenemos distancias de los triángulos formados entre los eslabones mediante el teorema de Pitágoras y ley de senos y cosenos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Ángulos del eslabón 6 (Triángulo SGP)											
2			I61	I62	I64		I61	I62	I64		I63	I65
3			450	365	785		450	365	785		1785	2500
4												
5	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	coseno del ángulo en S	0.97027601									
6		Ángulo en S en radianes	0.24442759									
7	Beta 63	S en grados (Beta 63)	14.0046694									
8												
9	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Coseno del ángulo en G	-0.85388128									
10		G en radianes	2.59419391									
11		Ángulo G en grados	148.636365									
12												
13	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Coseno del ángulo en P	0.95445424									
14		P en radianes	0.30297116									
15		P en grados	17.358969									
16												
17		Suma de los tres ángulos	180.000003									
18												
19	Eslabón 6 (Triángulo SGP)	Beta 61	31.3636353									
20	Los puntos G, P y B de 6 NO están sobre la misma recta											
21		Beta 63=Ángulo en S	14.0046694									
22												
23	Eslabón 6 (Triángulo SPB)	coseno del ángulo PSB	0.93757962									
24		Ángulo PSB en radianes	0.35519233									
25	Beta 64	Ángulo PSB en grados (beta 64)	20.351022									

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
25	Beta 64	Ángulo PSB en grados (beta 64)	20.351022									
26	Beta 65	Beta 65	34.3556914									
27												
28												
29			153	151	152							
30			2140	2500	450							
31												
32		Coseno de Beta 5	0.8324									
33		Ángulo en radianes Beta 5	0.58737186									
34		Ángulo en grados Beta 5	33.6539294									
35												
36												
37		Coseno de Beta 51 prima	-0.76214953									
38		Ángulo en radianes	2.43742323									
39		Ángulo Beta 51 prima en grados	139.654067									
40		Beta 51 en grados	40.3459335									
41												
42												
43				IGB	IGP	IPB						
44			2143.6	365	1785							
45												
46		Coseno del ángulo en GPB	-0.97891175									
47		GPB en radianes	2.9586086									
48		GPB en grados	168.212439									
49		Beta 62	11.7875606									

Figura 88. Hoja de cálculo desarrollada en Excel para calcular las betas de los eslabones 5 y 6

Ley de senos y Cosenos

Ejemplo.

$a \cdot \text{Sen } B = b \cdot \text{Sen } A$
 $b \cdot \text{Sen } C = c \cdot \text{Sen } B$
 $c \cdot \text{Sen } A = a \cdot \text{Sen } C$

$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \text{Cos } A$
 $b^2 = a^2 + c^2 - 2 \cdot a \cdot c \cdot \text{Cos } B$
 $c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \text{Cos } C$

$\frac{a}{\text{sen } \alpha} = \frac{b}{\text{sen } \beta} = \frac{c}{\text{sen } \gamma}$

$h^2 = a^2 + b^2$

$\text{Cos } A = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$
 $\text{Cos } B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$
 $\text{Cos } C = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$

Sumas de Angulos 151

Lados	Angulos	Grados	Radianes
Lado a 1200	Angulo A	0	0.000
Lado b 500	Angulo B	108	1.885
Lado c 700	Angulo C	0	0.000

Sen A	Radianes	Grados
Angulo A	0.0000	0.00
Sen B	Radianes	Grados
Angulo B	0.6793	0.747
Sen C	Radianes	Grados
Angulo C	0.0000	0.00

Teorema de Pitágoras

Hipotenusa	Cateto 1	Cateto 2
x	0	0
0	x	0
0	0	x
Valor x	0	0

$Hipotenusa = \text{raiz}((\text{cateto1}^2 + \text{cateto2}^2)) = (\text{cateto2}^2 + \text{cateto1}^2)$
 $\text{Cateto1} = \text{raiz}((\text{Hipotenusa}^2 - \text{Hipotenusa}^2) - (\text{Cateto2}^2 - \text{Cateto2}^2))$
 $\text{Cateto2} = \text{raiz}((\text{Hipotenusa}^2 - \text{Hipotenusa}^2) - (\text{Cateto1}^2 - \text{Cateto1}^2))$

Despejando,
 $h = \sqrt{a^2 + b^2}$
 $a = \sqrt{h^2 - b^2}$
 $b = \sqrt{h^2 - a^2}$

Figura 89. Programa que se desarrolló para obtener los lados de los eslabones que no se conocían mediante la formación de triángulos

17.6. *Discusión de los resultados*

Al ser la movilidad del mecanismo igual a la unidad, se hace necesario conocer solo una coordenada generalizada para resolver, no solo a cinemática de posiciones, sino la cinemática completamente (posiciones, velocidades y aceleraciones).

Analizando las ecuaciones anteriores, que rigen la distancia existente entre las tenazas en todo momento durante la primera y segunda etapa respectivamente, deducimos que la tenaza externa, al tener un desplazamiento horizontal mayor que la tenaza interna por cada grado que aumenta el valor de sus coordenadas generalizadas de entrada, ϕ_4 y ϕ_3 respectivamente, posee una velocidad lineal mayor que su homóloga, hecho este que se hace ideal para garantizar el correcto apriete que ha de hacer la tenaza macho contra la superficie interna de la bobina, y por tanto se deduce que la tenaza externa durante la primera etapa de trabajo, y como se evidencia físicamente, ha de tener mayor recorrido que la tenaza macho de apriete interior durante la segunda etapa de trabajo.

Fue positivo el modelo de la tenaza realizado por el autor ya que las ecuaciones escritas en el trabajo, que rigen el funcionamiento de la tenaza original, describen a la perfección el movimiento que esta realiza.

La tabla 7 presentada a continuación abarca todos los ángulos obtenidos en la primera inversión, todos respecto a la coordenada de entrada I_2 . Se observa que a medida que la entrada cambia lo hacen los ángulos o coordenadas de salida, nótese que su desplazamiento angular no es lineal.

Coordenada de entrada (I_2)	Coordenadas de salida			
	Ángulo Φ_3	Ángulo Φ_4	Ángulo Φ_{51}	Ángulo Φ_{65}
1082.28	26.50246162	158.9651214	172.1319704	11.7247675
1092.414546	26.54753248	158.9258671	171.9030548	11.95689301
1102.549091	26.59456777	158.8826796	171.6738443	12.18793776
1112.683637	26.64359737	158.835597	171.4442281	12.41805923
1122.818182	26.69459936	158.7847039	171.2143352	12.64717217
1132.952728	26.7475747	158.7300616	170.9841731	12.87531217
1143.087273	26.80249142	158.6717642	170.7538791	13.1023855
1153.221819	26.85941929	158.6097949	170.5231626	13.32871826
1163.356364	26.91839289	158.5441666	170.2919018	13.55446488
1173.49091	26.97902245	158.4753733	170.0615733	13.77822688
1183.625455	27.04174304	158.4029769	169.8304809	14.00169178
1193.76	27.10661107	158.3269511	169.5984561	14.2250485
1205.32	27.17308617	158.2479786	169.3673912	14.4465111
1216.88	27.24156688	158.1656361	169.1358404	14.66750267
1228.44	27.31196044	158.0800755	168.9041031	14.88776626
1240	27.38429374	157.9913039	168.6720673	15.10743733

1251.56	27.45844249	157.8995133	168.4400972	15.32620032
1263.12	27.53452833	157.8045903	168.2077788	15.54447365
1274.68	27.61231181	157.7068704	167.9757993	15.76164003
1286.24	27.69171426	157.606491	167.7443197	15.97758004
1297.8	27.77302406	157.5031212	167.5124514	16.19314965
1309.36	27.85629532	157.3967206	167.2800264	16.40852582
1321.245	27.94129066	157.2876212	167.0476781	16.62314407
1333.13	28.02814694	157.1756757	166.814996	16.8374063
1345.015	28.11658345	157.0612737	166.5826867	17.05068481
1356.9	28.20661933	156.9444184	166.3506382	17.2631074
1368.785	28.29818738	156.8252239	166.1189625	17.47459507
1380.67	28.3916653	156.7032217	165.8866685	17.68607258
1392.555	28.48687705	156.5786632	165.6541731	17.89717724
1404.44	28.58370165	156.4517284	165.4217339	18.10769418
1416.325	28.68210155	156.3224878	165.1893959	18.317602
Coordenada de entrada (l2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
1428.21	28.78222581	156.1907658	164.9567712	18.52726887
1440.324	28.88340833	156.057459	164.7253458	18.73537592
1452.438	28.98650111	155.921464	164.4931226	18.94373734
1464.552	29.09112851	155.7832933	164.260927	19.15162707
1476.666	29.19726003	155.6430042	164.028787	19.35903628
1488.78	29.30484843	155.5006758	163.7967651	19.56592529
1500.894	29.41393385	155.3562708	163.5647363	19.77242124
1513.008	29.52443955	155.209906	163.3328258	19.97842762
1525.122	29.63610899	155.061936	163.1015228	20.18352599
1537.236	29.7494439	154.91171	162.8697515	20.3886847
1549.35	29.86408482	154.759718	162.6382181	20.59329162
1561.595	29.98016628	154.6057946	162.4066152	20.797632
1573.84	30.09745706	154.450259	162.1753672	21.00134483
1586.085	30.216208	154.2927907	161.9439453	21.20490886
1598.33	30.33616111	154.1337436	161.7128198	21.40792278
1610.575	30.45748326	153.9729075	161.4816357	21.61071082
1622.82	30.58008338	153.8104144	161.2505372	21.81315814
1635.065	30.70360482	153.6467471	161.0201555	22.01472434
1647.31	30.82810493	153.4818397	160.7903363	22.21555743
1659.555	30.95367767	153.315577	160.5608658	22.41585633
1671.8	31.08051254	153.1477177	160.3313672	22.61596071
1684.094	31.20895428	152.9778152	160.1012018	22.81643663
1696.388	31.33851252	152.8065275	159.8712306	23.01654341
1708.682	31.46919964	152.6338469	159.641403	23.21633533
1720.976	31.60102032	152.4597757	159.4116839	23.41585258
1733.27	31.733844	152.2844944	159.1822726	23.6149319
1745.564	31.8679226	152.1076787	158.9527099	23.813981

1757.858	32.00234078	151.9305428	158.7245257	24.01168334
1770.152	32.13826196	151.7515605	158.4957149	24.2097857
1782.446	32.27532992	151.5712092	158.2668652	24.40778689
1794.74	32.41330511	151.3898113	158.0383534	24.60536954
1807.01	32.55238586	151.2071131	157.8098281	24.80284583
1819.28	32.69226948	151.0235188	157.581763	24.99981474
1831.55	32.83330601	150.8385758	157.3535656	25.19679591
1843.82	32.97515315	150.6527395	157.1257693	25.39333667
1856.09	33.11805134	150.4657012	156.8979669	25.58979621
1868.36	33.26189323	150.2776078	156.6703114	25.78604978
1880.63	33.40625396	150.0890205	156.4434494	25.98154767
1892.9	33.55118507	149.8998764	156.2172691	26.1763939
1905.17	33.69713314	149.7095982	155.9910522	26.37121438
1917.44	33.84454196	149.5176144	155.7641041	26.56661356
1929.622	33.99268039	149.3248839	155.5375403	26.7616378
Coordenada de entrada (l2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
1941.804	34.14096836	149.1321651	155.3122182	26.9555557
1953.986	34.29047044	148.9380794	155.0864992	27.14978422
1966.168	34.44095552	148.7429331	154.860724	27.34403637
1978.35	34.59226133	148.5469423	154.6351225	27.5381203
1990.532	34.74435317	148.3501572	154.4097313	27.73201079
2002.714	34.89665574	148.1533258	154.1853801	27.92500004
2014.896	35.05019368	147.9551287	153.9605436	28.11840599
2027.078	35.20445385	147.7562341	153.7359645	28.31159536
2039.26	35.35945909	147.5566174	153.5115954	28.50461474
2051.3	35.51511388	147.356406	153.2875598	28.69736323
2063.34	35.67154962	147.1554355	153.0636551	28.89002056
2075.38	35.82878406	146.9536881	152.8398447	29.08262351
2087.42	35.98602683	146.752181	152.6172343	29.27422573
2099.46	36.14451676	146.5493307	152.3940561	29.46635357
2111.5	36.30351837	146.3460839	152.1713386	29.65812695
2123.54	36.46347146	146.1418831	151.9484553	29.85009018
2135.58	36.6238701	145.9373784	151.7261007	30.04164994
2147.62	36.78500214	145.732207	151.5038634	30.23316535
2159.66	36.94673724	145.5265389	151.2819129	30.42449493
2171.512	37.10909801	145.3203494	151.0602074	30.61567929
2183.364	37.27198172	145.1137728	150.8388759	30.80661151
2195.216	37.43552788	144.9066361	150.6177187	30.99746835
2207.068	37.59965893	144.6990415	150.3968311	31.18817166
2218.92	37.76442367	144.4909312	150.1761386	31.37879025
2230.772	37.92979513	144.2823434	149.9556685	31.56930449
2242.624	38.09568013	144.0733992	149.7355359	31.7596191
2254.476	38.26206529	143.8641191	149.5157486	31.9497311

2266.328	38.42906824	143.6543586	149.2961428	32.13978615
2278.18	38.59662945	143.4441964	149.0767891	32.32972704
2289.791	38.76475824	143.2336247	148.8576676	32.51957481
2301.402	38.93347818	143.0226176	148.6387404	32.70936602
2313.013	39.10296919	142.8109546	148.4197689	32.89931141
2324.624	39.27194028	142.6002491	148.2024071	33.08797914
2336.235	39.44198045	142.388522	147.9845996	33.27715607
2347.846	39.61276868	142.1761785	147.7667573	33.46648979
2359.457	39.78385931	141.9637763	147.549442	33.65549525
2371.068	39.95523651	141.7513374	147.3326641	33.84416635
2382.679	40.12683069	141.53895	147.1165015	34.03243798
2394.29	40.29963424	141.3253904	146.8997013	34.22140507
2405.645	40.47282538	141.1116793	146.6832934	34.41017392
2417	40.64639008	140.8978368	146.467288	34.59873849
2428.355	40.8205082	140.6836446	146.2514553	34.78730231
Coordenada de entrada (l2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
2439.71	40.99545692	140.4687662	146.0354496	34.97617106
2451.065	41.16967543	140.2551196	145.8211867	35.16367152
2462.42	41.34516637	140.040251	145.6061957	35.35196828
2473.775	41.52103887	139.8252566	145.3915684	35.54010905
2485.13	41.69749724	139.60989	145.1770509	35.72831914
2496.485	41.87442691	139.3942947	144.962779	35.91648251
2507.84	42.05174967	139.1785691	144.7488428	36.10452278
2518.893	42.2287785	138.96355	144.5360613	36.2917215
2529.946	42.4069242	138.7475266	144.3227342	36.4795771
2540.999	42.58525432	138.5316342	144.1099771	36.66711057
2552.052	42.76433415	138.3151919	143.8971119	36.85492212
2563.105	42.94362627	138.0988524	143.6847744	37.0424536
2574.158	43.12352072	137.8821484	143.4724986	37.23011884
2585.211	43.3036146	137.665568	143.2607562	37.41750334
2596.264	43.48345603	137.4496551	143.0500693	37.60414594
2607.317	43.66438343	137.2328059	142.8388667	37.79144098
2618.37	43.84581557	137.0157225	142.6278285	37.97878891
2629.113	44.02759706	136.798594	142.4171325	38.16603423
2639.856	44.20978516	136.581355	142.206709	38.35324107
2650.599	44.39223686	136.3641785	141.9967194	38.54026779
2661.342	44.57556493	136.1463392	141.7864577	38.72774599
2672.085	44.75878276	135.9290126	141.5770525	38.91467141
2682.828	44.94200803	135.7120592	141.3683615	39.10117174
2693.571	45.1260919	135.4944746	141.1594132	39.2881174
2704.314	45.31035017	135.2770712	140.9509833	39.47481687
2715.057	45.49523934	135.0593136	140.7425532	39.66173673
2725.8	45.6811162	134.8407873	140.5337234	39.84923882

2736.201	45.86698932	134.6226616	140.3256068	40.03632627
2746.602	46.05296695	134.4048105	140.1180763	40.22311405
2757.003	46.23819099	134.1882375	139.9120796	40.40874853
2767.404	46.42465129	133.9706184	139.7054003	40.59522841
2777.805	46.61160363	133.7528277	139.498867	40.78180976
2788.206	46.79892027	133.5350178	139.2926197	40.96836817
2798.607	46.98632081	133.3175167	139.0869638	41.15462857
2809.008	47.17437278	133.0996689	138.8812749	41.34115825
2819.409	47.36238635	132.8822761	138.6763054	41.52727643
2829.81	47.55122945	132.6643381	138.471108	41.71384516
2839.755	47.73968169	132.4472652	138.2670059	41.89966251
2849.7	47.92723637	132.2316378	138.0645358	42.08423747
2859.645	48.11495072	132.0162384	137.8625478	42.26861731
2869.59	48.30410029	131.7996094	137.6596727	42.45405504
2879.535	48.49145237	131.5854527	137.4593712	42.63738688
Coordenada de entrada (l2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
2889.48	48.67962267	131.3707757	137.2588372	42.82117942
2899.425	48.86806354	131.1562076	137.0586555	43.00489905
2909.37	49.05609683	130.9425208	136.8595413	43.18788906
2919.315	49.24453247	130.7287955	136.6606328	43.37094167
2929.26	49.43401784	130.5143031	136.4612497	43.55468588
2938.63	49.62514616	130.298382	136.2607771	43.73969379
2948	49.81173979	130.0880022	136.0656763	43.91999666
2957.37	49.99781972	129.8786139	135.8717145	44.09949612
2966.74	50.18541501	129.6679379	135.6767777	44.28015038
2976.11	50.37068688	129.4602836	135.4848476	44.45826787
2985.48	50.55724573	129.2516016	135.2921756	44.63732525
2994.85	50.74379589	129.0433462	135.1001025	44.81607892
3004.22	50.93011584	128.8357649	134.9088519	44.99432017
3013.59	51.11611059	128.6289623	134.7185155	45.1719623
3022.96	51.30160296	128.4231335	134.5292676	45.34884076
3031.675	51.48728643	128.2175087	134.3403962	45.52562021
3040.39	51.67193005	128.0134492	134.1531465	45.70113323
3049.105	51.85555159	127.8109292	133.9674882	45.8754038
3057.82	52.03817998	127.6099108	133.7833804	46.04846613
3066.535	52.22208261	127.4079003	133.5985357	46.22247053
3075.25	52.40603872	127.2062438	133.4141845	46.39626131
3083.965	52.58987824	127.0051285	133.2304945	46.56968007
3092.68	52.77144421	126.8069069	133.0496077	46.74069924
3101.395	52.95370666	126.6083322	132.868556	46.91212164
3110.11	53.13550702	126.4106682	132.688489	47.08285899
3119.914	53.31666746	126.2141056	132.5095757	47.25274838
3129.718	53.49802634	126.0177342	132.3309841	47.42257868

3139.522	53.67784139	125.8234369	132.154422	47.59072275
3149.326	53.85642733	125.6308654	131.9795667	47.75748202
3159.13	54.03366282	125.4401428	131.8065242	47.92274976

Coordenada de entrada (I2)	Coordenadas de salida			
	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
1082.28	0	163.6596602	138.4714605	46.07944964
1092.414546	0	163.5405076	138.2425449	46.31157516
1102.549091	0	163.4217657	138.0133344	46.5426199
1112.683637	0	163.3033673	137.7837182	46.77274137
1122.818182	0	163.1853691	137.5538253	47.00185432
1132.952728	0	163.0677659	137.3236632	47.22999431
1143.087273	0	162.9506184	137.0933692	47.45706764
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
1153.221819	0	162.8337703	136.8626527	47.6834004
1163.356364	0	162.7171534	136.6313919	47.90914703
1173.49091	0	162.6015018	136.4010634	48.13290902
1183.625455	0	162.4859542	136.169971	48.35637392
1193.76	0	162.3704234	135.9379462	48.57973064
1205.32	0	162.2558435	135.7068813	48.80119325
1216.88	0	162.1414883	135.4753305	49.02218482
1228.44	0	162.0275004	135.2435932	49.24244841
1240	0	161.9138191	135.0115574	49.46211947
1251.56	0	161.8006169	134.7795873	49.68088246
1263.12	0	161.6876861	134.5472689	49.8991558
1274.68	0	161.5753548	134.3152894	50.11632218
1286.24	0	161.4636928	134.0838099	50.33226218
1297.8	0	161.3522655	133.8519415	50.5478318
1309.36	0	161.2409897	133.6195165	50.76320796
1321.245	0	161.1301646	133.3871682	50.97782621
1333.13	0	161.0195905	133.1544861	51.19208845
1345.015	0	160.9095984	132.9221768	51.40536695
1356.9	0	160.8001291	132.6901283	51.61778954
1368.785	0	160.6912298	132.4584527	51.82927721
1380.67	0	160.5824312	132.2261586	52.04075473
1392.555	0	160.4739269	131.9936632	52.25185938
1404.44	0	160.3658336	131.761224	52.46237633
1416.325	0	160.2581686	131.528886	52.67228414
1428.21	0	160.1507492	131.2962613	52.88195102
1440.324	0	160.0442562	131.0648359	53.09005806
1452.438	0	159.9377666	130.8326128	53.29841949

1464.552	0	159.8316579	130.6004171	53.50630921
1476.666	0	159.72594	130.3682771	53.71371843
1488.78	0	159.6206384	130.1362552	53.92060743
1500.894	0	159.5156933	129.9042264	54.12710338
1513.008	0	159.4111591	129.6723159	54.33310976
1525.122	0	159.3072522	129.4410129	54.53820813
1537.236	0	159.2034869	129.2092416	54.74336684
1549.35	0	159.1001779	128.9777082	54.94797377
1561.595	0	158.9971857	128.7461053	55.15231414
1573.84	0	158.8946965	128.5148573	55.35602698
1586.085	0	158.7924739	128.2834354	55.559591
1598.33	0	158.6907236	128.05231	55.76260492
1610.575	0	158.5892874	127.8211259	55.96539296
1622.82	0	158.4882269	127.5900273	56.16784028
1635.065	0	158.3878151	127.3596456	56.36940648
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
1647.31	0	158.2879806	127.1298264	56.57023958
1659.555	0	158.1886274	126.9003559	56.77053847
1671.8	0	158.0895904	126.6708573	56.97064285
1684.094	0	157.9905945	126.4406919	57.17111877
1696.388	0	157.89201	126.2107207	57.37122556
1708.682	0	157.7938135	125.9808931	57.57101747
1720.976	0	157.6959886	125.751174	57.77053473
1733.27	0	157.5986185	125.5217627	57.96961405
1745.564	0	157.5015072	125.2922	58.16866314
1757.858	0	157.4052986	125.0640158	58.36636549
1770.152	0	157.309145	124.835205	58.56446784
1782.446	0	157.2132943	124.6063553	58.76246903
1794.74	0	157.117903	124.3778435	58.96005168
1807.01	0	157.0228234	124.1493182	59.15752797
1819.28	0	156.928251	123.9212531	59.35449688
1831.55	0	156.8339393	123.6930557	59.55147806
1843.82	0	156.7401076	123.4652595	59.74801881
1856.09	0	156.6465872	123.237457	59.94447835
1868.36	0	156.5534403	123.0098015	60.14073193
1880.63	0	156.4609292	122.7829395	60.33622981
1892.9	0	156.3690053	122.5567592	60.53107604
1905.17	0	156.2773751	122.3305423	60.72589652
1917.44	0	156.1857587	122.1035943	60.9212957
1929.622	0	156.094607	121.8770304	61.11631994
1941.804	0	156.0042618	121.6517084	61.31023784
1953.986	0	155.9140642	121.4259893	61.50446637
1966.168	0	155.8241512	121.2002141	61.69871851

1978.35	0	155.7346145	120.9746126	61.89280244
1990.532	0	155.6454676	120.7492214	62.08669294
2002.714	0	155.5570365	120.5248702	62.27968218
2014.896	0	155.4687188	120.3000337	62.47308813
2027.078	0	155.3808071	120.0754546	62.6662775
2039.26	0	155.293282	119.8510855	62.85929688
2051.3	0	155.2061907	119.6270499	63.05204537
2063.34	0	155.119454	119.4031452	63.24470271
2075.38	0	155.0330575	119.1793348	63.43730565
2087.42	0	154.9474255	118.9567244	63.62890787
2099.46	0	154.8618773	118.7335462	63.82103571
2111.5	0	154.7768075	118.5108287	64.0128091
2123.54	0	154.6919768	118.2879454	64.20477232
2135.58	0	154.6076491	118.0655908	64.39633208
2147.62	0	154.5236675	117.8433535	64.5878475
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
2159.66	0	154.4400957	117.621403	64.77917707
2171.512	0	154.3569173	117.3996975	64.97036143
2183.364	0	154.27418	117.178366	65.16129365
2195.216	0	154.1918085	116.9572088	65.35215049
2207.068	0	154.109838	116.7363213	65.5428538
2218.92	0	154.0282403	116.5156287	65.73347239
2230.772	0	153.9470253	116.2951586	65.92398664
2242.624	0	153.8662349	116.075026	66.11430124
2254.476	0	153.7858711	115.8552387	66.30441325
2266.328	0	153.7058736	115.6356329	66.4944683
2278.18	0	153.6262677	115.4162792	66.68440919
2289.791	0	153.547046	115.1971577	66.87425695
2301.402	0	153.4681946	114.9782305	67.06404817
2313.013	0	153.3896278	114.7592591	67.25399356
2324.624	0	153.3119367	114.5418972	67.44266128
2336.235	0	153.2343848	114.3240898	67.63183822
2347.846	0	153.1571202	114.1062474	67.82117193
2359.457	0	153.0803418	113.8889321	68.01017739
2371.068	0	153.0040519	113.6721542	68.19884849
2382.679	0	152.9282763	113.4559916	68.38712012
2394.29	0	152.8525766	113.2391914	68.57608722
2405.645	0	152.7773136	113.0227835	68.76485606
2417	0	152.7024901	112.8067781	68.95342063
2428.355	0	152.6280261	112.5909454	69.14198445
2439.71	0	152.5538032	112.3749397	69.3308532
2451.065	0	152.4804771	112.1606768	69.51835366
2462.42	0	152.407201	111.9456858	69.70665042

2473.775	0	152.3343486	111.7310585	69.89479119
2485.13	0	152.2618337	111.516541	70.08300128
2496.485	0	152.1897023	111.3022691	70.27116465
2507.84	0	152.1179843	111.0883329	70.45920493
2518.893	0	152.046952	110.8755514	70.64640365
2529.946	0	151.9760375	110.6622243	70.83425924
2540.999	0	151.9056124	110.4494672	71.02179271
2552.052	0	151.8354523	110.236602	71.20960427
2563.105	0	151.7657667	110.0242645	71.39713574
2574.158	0	151.6964024	109.8119887	71.58480098
2585.211	0	151.6275132	109.6002463	71.77218549
2596.264	0	151.5592665	109.3895594	71.95882808
2607.317	0	151.4911532	109.1783569	72.14612312
2618.37	0	151.4233942	108.9673186	72.33347105
2629.113	0	151.3560467	108.7566226	72.52071638
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
2639.856	0	151.2890879	108.5461991	72.70792321
2650.599	0	151.2225687	108.3362095	72.89494993
2661.342	0	151.1562661	108.1259478	73.08242813
2672.085	0	151.0905357	107.9165426	73.26935355
2682.828	0	151.0253305	107.7078516	73.45585388
2693.571	0	150.9603469	107.4989033	73.64279954
2704.314	0	150.8958266	107.2904734	73.82949901
2715.057	0	150.8316091	107.0820433	74.01641887
2725.8	0	150.767573	106.8732135	74.20392097
2736.201	0	150.70406	106.6650969	74.39100841
2746.602	0	150.6410296	106.4575664	74.57779619
2757.003	0	150.578766	106.2515697	74.76343067
2767.404	0	150.5165984	106.0448904	74.94991055
2777.805	0	150.4547782	105.8383571	75.13649191
2788.206	0	150.3933476	105.6321098	75.32305032
2798.607	0	150.3323965	105.4264539	75.50931072
2809.008	0	150.2717398	105.220765	75.69584039
2819.409	0	150.211599	105.0157955	75.88195858
2829.81	0	150.1516959	104.8105981	76.0685273
2839.755	0	150.0924161	104.606496	76.25434465
2849.7	0	150.0339105	104.404026	76.43891961
2859.645	0	149.9758431	104.2020379	76.62329945
2869.59	0	149.9178223	103.9991628	76.80873718
2879.535	0	149.8608352	103.7988613	76.99206902
2889.48	0	149.8040792	103.5983273	77.17586157
2899.425	0	149.7477207	103.3981456	77.35958119
2909.37	0	149.6919589	103.1990314	77.54257121

2919.315	0	149.6365506	103.0001229	77.72562381
2929.26	0	149.5813081	102.8007398	77.90936802
2938.63	0	149.5260656	102.6002672	78.09437593
2948	0	149.472595	102.4051664	78.2746788
2957.37	0	149.4197228	102.2112046	78.45417826
2966.74	0	149.3668734	102.0162678	78.63483252
2976.11	0	149.3151228	101.8243377	78.81295002
2985.48	0	149.2634562	101.6316657	78.99200739
2994.85	0	149.2122346	101.4395926	79.17076107
3004.22	0	149.1615153	101.248342	79.34900232
3013.59	0	149.1113199	101.0580056	79.52664445
3022.96	0	149.0616909	100.8687577	79.7035229
3031.675	0	149.0124393	100.6798863	79.88030236
3040.39	0	148.9638865	100.4926366	80.05581538
3049.105	0	148.9160184	100.3069783	80.23008594
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3057.82	0	148.8688185	100.1228705	80.40314827
3066.535	0	148.8216997	99.93802579	80.57715268
3075.25	0	148.774977	99.75367463	80.75094345
3083.965	0	148.7286914	99.56998458	80.92436221
3092.68	0	148.6833758	99.38909782	81.09538139
3101.395	0	148.638282	99.20804612	81.26680378
3110.11	0	148.5936953	99.02797906	81.43754114
3119.914	0	148.5496539	98.84906576	81.60743053
3129.718	0	148.5059507	98.67047416	81.77726082
3139.522	0	148.4629993	98.49391209	81.9454049
3149.326	0	148.420714	98.31905678	82.11216417
3159.13	0	148.3791138	98.14601431	82.2774319

Tabla 6. Ángulos obtenidos de las coordenadas de salida de la primera inversión cinemática, respecto a la coordenada de entrada a1. Simulado en SolidWorks

La tabla 8 presentada a continuación abarca todos los ángulos obtenidos en la primera inversión, todos respecto a la coordenada de entrada I2. Se observa que a medida que la entrada cambia lo hacen los ángulos o coordenadas de salida, nótese que su desplazamiento angular no es lineal.

Coordenadas de salida				
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65

3159.16	54.03429043	125.4394681	131.8059123	47.92333459
3166.856	54.21376314	125.246739	131.6311834	48.09045513
3174.552	54.39276488	125.0549173	131.4574084	48.25690546
3182.248	54.57156408	124.863714	131.2843221	48.42293785
3189.944	54.75036991	124.6729058	131.1117194	48.58874825
3197.64	54.92663963	124.4851986	130.9420429	48.75198475
3205.336	55.10354646	124.2972081	130.7722285	48.91559071
3213.032	55.28005623	124.110035	130.6032684	49.07861037
3220.728	55.45603793	123.9238163	130.4352828	49.24092555
3228.424	55.63107561	123.7389882	130.2686613	49.40215632
3236.12	55.80545506	123.5552447	130.1031241	49.56256981
3243.138	55.98049349	123.3711989	129.9374193	49.72337864
3250.156	56.15448148	123.1886481	129.7731624	49.88301393
3257.174	56.33022901	123.0046475	129.607702	50.04405343
3264.192	56.50222816	122.8249583	129.4462146	50.20145448
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
3271.21	56.67278246	122.6471575	129.2865162	50.35733497
3278.228	56.84208583	122.4710352	129.128414	50.51187748
3285.246	57.01126513	122.2954158	128.9708493	50.6661136
3292.264	57.17769012	122.1230212	128.8162602	50.81765088
3299.282	57.34491065	121.9501691	128.6613409	50.96972545
3306.3	57.51139592	121.7784431	128.5075089	51.12094552
3312.55	57.67743126	121.6075461	128.3544954	51.2715727
3318.8	57.84209634	121.4384207	128.203141	51.42077549
3325.05	58.00399997	121.2724834	128.0547087	51.56730048
3331.3	58.16651467	121.1062718	127.9060983	51.71420367
3337.55	58.32711768	120.942363	127.7596113	51.85920703
3343.8	58.48597226	120.7805797	127.6150854	52.00246404
3350.05	58.64536891	120.6185866	127.4704317	52.14604246
3356.3	58.80346558	120.4582543	127.3273188	52.28828443
3362.55	58.96059645	120.299238	127.1854357	52.42949433
3368.8	59.11499894	120.1433106	127.046361	52.56809403
3374.249	59.26876879	119.9883463	126.9081951	52.70597003
3379.698	59.42160846	119.8346411	126.7711999	52.842858
3385.147	59.57358843	119.6821197	126.6353056	52.97882384
3390.596	59.72623034	119.5292556	126.4991507	53.11522918
3396.045	59.87537	119.3802112	126.36644	53.24835703
3401.494	60.02058178	119.2353899	126.237528	53.37783837
3406.943	60.16316298	119.0934792	126.1112425	53.50483935
3412.392	60.30578274	118.9518154	125.9852111	53.63174109
3417.841	60.44765962	118.811174	125.8601219	53.75784919
3423.29	60.58759751	118.6727335	125.7370212	53.88210416
3427.856	60.72636043	118.5357298	125.6152272	54.00518863

3432.422	60.86176879	118.4023027	125.4966396	54.12517535
3436.988	60.99584802	118.2704436	125.3794708	54.24386526
3441.554	61.12943506	118.1393252	125.262984	54.36200155
3446.12	61.25933492	118.0120724	125.1499533	54.47676414
3450.686	61.38912934	117.8851666	125.0372515	54.59132216
3455.252	61.51645966	117.7609078	124.9269194	54.703597
3459.818	61.64009082	117.6404849	124.8200106	54.81250726
3464.384	61.76310607	117.5208839	124.7138475	54.92077427
3468.95	61.88285749	117.4046695	124.610705	55.02607214
3472.578	61.99962472	117.2915545	124.5103265	55.1286541
3476.206	62.11620325	117.1788236	124.4103008	55.2309796
3479.834	62.23031299	117.0686752	124.3125779	55.33105026
3483.462	62.34212086	116.9609369	124.2170032	55.42901778
3487.09	62.44998189	116.8571789	124.1249682	55.52344764
3490.718	62.55677001	116.754625	124.0340091	55.61686125
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
3494.346	62.66080031	116.6548845	123.9455525	55.7077887
3497.974	62.76204899	116.5579679	123.8596064	55.79621488
3501.602	62.86089674	116.4634994	123.7758368	55.88247743
3505.23	62.95679821	116.3719887	123.6946946	55.96610568
3508.116	63.04771113	116.2853677	123.617892	56.04532626
3511.002	63.13830566	116.1991758	123.5414732	56.1242136
3513.888	63.22559247	116.1162501	123.4679532	56.20016787
3516.774	63.31233015	116.0339623	123.3950011	56.27559289
3519.66	63.39947196	115.9514082	123.3218151	56.3513176
3522.546	63.48712402	115.8684893	123.2483076	56.42743332
3525.432	63.57529429	115.7852007	123.1744738	56.50394594
3528.318	63.66399093	115.7015371	123.1003088	56.58086146
3531.204	63.75322232	115.6174934	123.0258077	56.65818606
3534.09	63.84299705	115.533064	122.9509652	56.73592608
3537.015	63.93332394	115.4482433	122.875776	56.81408802
3539.94	64.02421205	115.3630258	122.8002348	56.89267853
3542.865	64.11567069	115.2774056	122.724336	56.97170445
3545.79	64.20770943	115.1913766	122.6480738	57.05117282
3548.715	64.3003381	115.1049328	122.5714424	57.13109083
3551.64	64.39356679	115.0180678	122.4944357	57.2114659
3554.565	64.48740592	114.9307752	122.4170476	57.29230564
3557.49	64.58186616	114.8430484	122.3392717	57.37361788
3560.415	64.67695852	114.7548805	122.2611014	57.45541064
3563.34	64.77269434	114.6662646	122.18253	57.53769222
3566.357	64.86908527	114.5771935	122.1035505	57.62047111
3569.374	64.96614334	114.4876598	122.024156	57.70375607
3572.391	65.06388091	114.3976559	121.9443389	57.78755611

3575.408	65.16231076	114.3071741	121.8640918	57.87188053
3578.425	65.26144604	114.2162062	121.7834069	57.95673888
3581.442	65.36130034	114.1247442	121.7022761	58.04214102
3584.459	65.46188766	114.0327793	121.6206913	58.12809711
3587.476	65.56322246	113.9403031	121.5386437	58.21461761
3590.493	65.66531968	113.8473063	121.4561248	58.30171335
3593.51	65.76819475	113.7537798	121.3731253	58.38939548
3596.635	65.87186363	113.659714	121.289636	58.4776755
3599.76	65.97634281	113.5650991	121.2056471	58.56656533
3602.885	66.08164935	113.4699248	121.1211486	58.65607726
3606.01	66.18780092	113.3741806	121.0361302	58.74622398
3609.135	66.29481579	113.2778559	120.9505812	58.83701865
3612.26	66.40271292	113.1809393	120.8644906	58.92847487
3615.385	66.51151194	113.0834193	120.7778468	59.02060671
3618.51	66.6212332	112.985284	120.6906381	59.11342876
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
3621.635	66.73189784	112.8865209	120.6028521	59.20695613
3624.76	66.84352777	112.7871175	120.5144761	59.30120448
3628.017	66.95614579	112.6870603	120.4254968	59.39619008
3631.274	67.06977555	112.5863357	120.3359006	59.49192978
3634.531	67.18444166	112.4849296	120.2456732	59.5884411
3637.788	67.30016974	112.3828271	120.1547998	59.68574224
3641.045	67.41698643	112.2800131	120.063265	59.78385212
3644.302	67.53491952	112.1764717	119.9710528	59.88279044
3647.559	67.65399795	112.0721864	119.8781465	59.98257767
3650.816	67.77425191	111.9671401	119.7845288	60.08323518
3654.073	67.89571294	111.8613151	119.6901815	60.1847852
3657.33	68.01841396	111.7546929	119.5950859	60.28725095
3660.754	68.14238939	111.6472541	119.4992222	60.39065665
3664.178	68.26767526	111.5389789	119.4025698	60.49502762
3667.602	68.39430926	111.4298461	119.3051073	60.6003903
3671.026	68.52233092	111.3198341	119.206812	60.7067724
3674.45	68.65178169	111.20892	119.1076605	60.81420288
3677.874	68.78270507	111.0970801	119.0076281	60.92271214
3681.298	68.91514678	110.9842893	118.9066888	61.03233205
3684.722	69.0491549	110.8705217	118.8048154	61.14309606
3688.146	69.18478006	110.75575	118.7019794	61.25503935
3691.57	69.3220756	110.6399454	118.5981506	61.36819892
3695.217	69.46109781	110.523078	118.4932975	61.48261373
3698.864	69.60190614	110.4051162	118.3873865	61.59832487
3702.511	69.74456347	110.2860267	118.2803825	61.7153757
3706.158	69.88913636	110.1657746	118.1722483	61.83381204
3709.805	70.03569537	110.044323	118.0629444	61.95368239

3713.452	70.18431543	109.921633	117.952429	62.07503812
3717.099	70.33507617	109.7976634	117.840658	62.19793371
3720.746	70.48806238	109.6723707	117.7275841	62.32242709
3724.393	70.64336448	109.5457088	117.6131575	62.44857985
3728.04	70.80107903	109.4176289	117.4973247	62.57645766
3732.002	70.96130933	109.2880788	117.3800288	62.70613061
3735.964	71.12416611	109.1570032	117.2612088	62.83767364
3739.926	71.28976828	109.0243431	117.1407997	62.97116707
3743.888	71.45824376	108.8900354	117.0187312	63.10669706
3747.85	71.62973053	108.7540127	116.8949282	63.24435635
3751.812	71.80437766	108.6162025	116.7693095	63.38424488
3755.774	71.98234668	108.4765271	116.6417872	63.52647063
3759.736	72.163813	108.3349027	116.5122665	63.67115057
3763.698	72.34896766	108.1912388	116.3806441	63.81841175
3767.66	72.53801931	108.0454375	116.2468077	63.96839253
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi3	Ángulo Phi4	Ángulo Phi51	Ángulo Phi65
3772.13	72.73119653	107.8973926	116.1106345	64.12124404
3776.6	72.9287506	107.7469881	115.97199	64.27713193
3781.07	73.13095872	107.5940977	115.8307263	64.43623837
3785.54	73.33812787	107.4385827	115.68668	64.59876445
3790.01	73.55059945	107.2802907	115.5396703	64.76493309
3794.48	73.76875482	107.1190531	115.3894955	64.93499245
3798.95	73.99302217	106.954683	115.2359302	65.10922016
3803.42	74.22388476	106.7869719	115.0787211	65.28792843
3807.89	74.46189138	106.6156859	114.9175813	65.47147047
3812.36	74.70766922	106.4405616	114.7521844	65.66024834
3817.896	74.96194035	106.2612995	114.5821563	65.85472306
3823.432	75.22554284	106.0775573	114.4070644	66.0554274
3828.968	75.49945827	105.8889403	114.2264044	66.26298261
3834.504	75.78484819	105.694989	114.0395825	66.47812043
3840.04	76.08310339	105.4951627	113.845891	66.70171273
3845.576	76.39591171	105.2888171	113.6444755	66.93481223
3851.112	76.72535405	105.0751735	113.4342884	67.17870981
3856.648	77.07404384	104.8532746	113.2140215	67.43501755
3862.184	77.44533701	104.6219185	112.982005	67.7057931
3867.72	77.84366118	104.379558	112.7360501	67.99373394
3875.674	78.27505848	104.1241377	112.4731903	68.30249613
3883.628	78.74813991	103.8528131	112.1892287	68.63725217
3891.582	79.27590933	103.5614259	111.877878	69.00575162
3899.536	79.87967417	103.2434071	111.5289251	69.42058306
3907.49	80.59898497	102.8870623	111.1235953	69.90488942

Coordenada de entrada (I2)	Coordenadas de salida			
	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3159.16	0	148.3789671	98.1454024	82.27801673
3166.856	0	148.3372122	97.9706735	82.44513727
3174.552	0	148.2959352	97.7968985	82.6115876
3182.248	0	148.2550702	97.6238122	82.77762
3189.944	0	148.2145673	97.4512096	82.94343039
3197.64	0	148.1749931	97.281533	83.10666689
3205.336	0	148.1356278	97.1117186	83.27027285
3213.032	0	148.0967008	96.9427585	83.43329252
3220.728	0	148.0582365	96.7747729	83.5956077
3228.424	0	148.0203201	96.6081514	83.75683847
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3236.12	0	147.9828835	96.4426142	83.91725195
3243.138	0	147.9456424	96.2769094	84.07806078
3250.156	0	147.9089578	96.1126525	84.23769608
3257.174	0	147.872238	95.9471921	84.39873557
3264.192	0	147.8366267	95.7857047	84.55613662
3271.21	0	147.8016308	95.6260063	84.71201711
3278.228	0	147.7672019	95.4679041	84.86655962
3285.246	0	147.7331057	95.3103394	85.02079575
3292.264	0	147.6998633	95.1557503	85.17233303
3299.282	0	147.6667591	95.000831	85.32440759
3306.3	0	147.6340951	94.846999	85.47562766
3312.55	0	147.6018111	94.6939855	85.62625484
3318.8	0	147.5700799	94.5426311	85.77545763
3325.05	0	147.539158	94.3941988	85.92198262
3331.3	0	147.5083946	94.2455884	86.06888582
3337.55	0	147.4782629	94.0991014	86.21388917
3343.8	0	147.448722	93.9545755	86.35714619
3350.05	0	147.4193421	93.8099218	86.50072461
3356.3	0	147.3904597	93.6668089	86.64296657
3362.55	0	147.3620074	93.5249258	86.78417647
3368.8	0	147.3342945	93.3858511	86.92277617
3374.249	0	147.306936	93.2476852	87.06065217
3379.698	0	147.2799803	93.11069	87.19754014
3385.147	0	147.2534099	92.9747957	87.33350598
3390.596	0	147.2269575	92.8386408	87.46991132
3396.045	0	147.2013374	92.7059301	87.60303917
3401.494	0	147.1766054	92.5770181	87.73252052

3406.943	0	147.1525256	92.4507326	87.8595215
3412.392	0	147.1286408	92.3247012	87.98642323
3417.841	0	147.1050798	92.199612	88.11253134
3423.29	0	147.0820349	92.0765113	88.23678631
3427.856	0	147.0593733	91.9547173	88.35987078
3432.422	0	147.0374411	91.8361297	88.47985749
3436.988	0	147.0159003	91.7189609	88.5985474
3441.554	0	146.9946123	91.6024741	88.71668369
3446.12	0	146.9740777	91.4894434	88.83144628
3450.686	0	146.9537225	91.3767416	88.9460043
3455.252	0	146.9339113	91.2664095	89.05827914
3459.818	0	146.9148246	91.1595007	89.1671894
3464.384	0	146.8959782	91.0533376	89.27545641
3468.95	0	146.8777704	90.9501951	89.38075429
3472.578	0	146.8601478	90.8498166	89.48333624
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3476.206	0	146.8426827	90.7497909	89.58566175
3479.834	0	146.825712	90.652068	89.6857324
3483.462	0	146.8092028	90.5564933	89.78369992
3487.09	0	146.7933879	90.4644583	89.87812978
3490.718	0	146.7778378	90.3734992	89.9715434
3494.346	0	146.762792	90.2850426	90.06247085
3497.974	0	146.7482455	90.1990965	90.15089702
3501.602	0	146.7341361	90.1153269	90.23715957
3505.23	0	146.720534	90.0341847	90.32078782
3508.116	0	146.7077182	89.9573821	90.4000084
3511.002	0	146.6950234	89.8809633	90.47889575
3513.888	0	146.6828637	89.8074433	90.55485001
3516.774	0	146.67085	89.7344912	90.63027503
3519.66	0	146.65885	89.6613052	90.70599974
3522.546	0	146.64685	89.5877977	90.78211547
3525.432	0	146.63485	89.5139639	90.85862808
3528.318	0	146.62285	89.4397989	90.9355436
3531.204	0	146.61085	89.3652978	91.01286821
3534.09	0	146.59885	89.2904553	91.09060823
3537.015	0	146.58685	89.2152661	91.16877016
3539.94	0	146.57485	89.1397249	91.24736067
3542.865	0	146.56285	89.0638261	91.32638659
3545.79	0	146.55085	88.9875639	91.40585496
3548.715	0	146.53885	88.9109325	91.48577297
3551.64	0	146.52685	88.8339258	91.56614805
3554.565	0	146.51485	88.7565377	91.64698779
3557.49	0	146.50285	88.6787618	91.72830002

3560.415	0	146.49085	88.6005915	91.81009279
3563.34	0	146.47885	88.5220201	91.89237436
3566.357	0	146.46685	88.4430407	91.97515325
3569.374	0	146.45485	88.3636461	92.05843821
3572.391	0	146.44285	88.283829	92.14223826
3575.408	0	146.43085	88.2035819	92.22656268
3578.425	0	146.41885	88.122897	92.31142103
3581.442	0	146.40685	88.0417662	92.39682316
3584.459	0	146.39485	87.9601814	92.48277925
3587.476	0	146.38285	87.8781338	92.56929976
3590.493	0	146.37085	87.7956149	92.65639549
3593.51	0	146.35885	87.7126154	92.74407762
3596.635	0	146.34685	87.6291261	92.83235765
3599.76	0	146.33485	87.5451372	92.92124748
3602.885	0	146.32285	87.4606387	93.0107594
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3606.01	0	146.31085	87.3756203	93.10090612
3609.135	0	146.29885	87.2900713	93.19170079
3612.26	0	146.28685	87.2039807	93.28315701
3615.385	0	146.27485	87.117337	93.37528885
3618.51	0	146.26285	87.0301282	93.4681109
3621.635	0	146.25085	86.9423422	93.56163827
3624.76	0	146.23885	86.8539662	93.65588663
3628.017	0	146.22685	86.7649869	93.75087222
3631.274	0	146.21485	86.6753907	93.84661192
3634.531	0	146.20285	86.5851633	93.94312324
3637.788	0	146.19085	86.4942899	94.04042438
3641.045	0	146.17885	86.4027551	94.13853427
3644.302	0	146.16685	86.3105429	94.23747258
3647.559	0	146.15485	86.2176366	94.33725982
3650.816	0	146.14285	86.1240189	94.43791732
3654.073	0	146.13085	86.0296717	94.53946734
3657.33	0	146.11885	85.934576	94.64193309
3660.754	0	146.10685	85.8387123	94.74533879
3664.178	0	146.09485	85.74206	94.84970976
3667.602	0	146.08285	85.6445974	94.95507245
3671.026	0	146.07085	85.5463022	95.06145454
3674.45	0	146.05885	85.4471506	95.16888503
3677.874	0	146.04685	85.3471182	95.27739429
3681.298	0	146.03485	85.2461789	95.38701419
3684.722	0	146.02285	85.1443055	95.49777821
3688.146	0	146.01085	85.0414695	95.6097215
3691.57	0	145.99885	84.9376407	95.72288106

3695.217	0	145.98685	84.8327876	95.83729588
3698.864	0	145.97485	84.7268766	95.95300701
3702.511	0	145.96285	84.6198726	96.07005784
3706.158	0	145.95085	84.5117384	96.18849419
3709.805	0	145.93885	84.4024345	96.30836454
3713.452	0	145.92685	84.2919191	96.42972026
3717.099	0	145.91485	84.1801481	96.55261586
3720.746	0	145.90285	84.0670742	96.67710923
3724.393	0	145.89085	83.9526476	96.80326199
3728.04	0	145.87885	83.8368148	96.9311398
3732.002	0	145.86685	83.7195189	97.06081275
3735.964	0	145.85485	83.6006989	97.19235579
3739.926	0	145.84285	83.4802898	97.32584921
3743.888	0	145.83085	83.3582213	97.46137921
3747.85	0	145.81885	83.2344183	97.5990385
Coordenada de entrada (I2)	Ángulo Phi7	Ángulo Phi8	Ángulo Phi9	Ángulo Phi10
3751.812	0	145.80685	83.1087996	97.73892702
3755.774	0	145.79485	82.9812773	97.88115277
3759.736	0	145.78285	82.8517566	98.02583272
3763.698	0	145.77085	82.7201342	98.1730939
3767.66	0	145.75885	82.5862978	98.32307467
3772.13	0	145.74685	82.4501246	98.47592618
3776.6	0	145.73485	82.3114801	98.63181407
3781.07	0	145.72285	82.1702164	98.79092051
3785.54	0	145.71085	82.0261701	98.9534466
3790.01	0	145.69885	81.8791604	99.11961524
3794.48	0	145.68685	81.7289856	99.2896746
3798.95	0	145.67485	81.5754203	99.4639023
3803.42	0	145.66285	81.4182112	99.64261058
3807.89	0	145.65085	81.2570714	99.82615261
3812.36	0	145.63885	81.0916746	100.0149305
3817.896	0	145.62685	80.9216464	100.2094052
3823.432	0	145.61485	80.7465545	100.4101095
3828.968	0	145.60285	80.5658945	100.6176648
3834.504	0	145.59085	80.3790726	100.8328026
3840.04	0	145.57885	80.1853811	101.0563949
3845.576	0	145.56685	79.9839656	101.2894944
3851.112	0	145.55485	79.7737785	101.533392
3856.648	0	145.54285	79.5535116	101.7896997
3862.184	0	145.53085	79.3214951	102.0604752
3867.72	0	145.51885	79.0755403	102.3484161
3875.674	0	145.50685	78.8126804	102.6571783
3883.628	0	145.49485	78.5287189	102.9919343

3891.582	0	145.48285	78.2173681	103.3604338
3899.536	0	145.47085	77.8684152	103.7752652
3907.49	0	145.45885	77.4630854	104.2595716

Tabla 7. Ángulos obtenidos de las coordenadas de salida de la segunda inversión cinemática, respecto a la coordenada de entrada a3. Simulado en SolidWorks

Links a los archivos completos de todos los ángulos y posiciones:

Primera Inversión Cinemática: <https://n9.cl/f5lrr>

Segunda Inversión Cinemática: <https://n9.cl/0ury9>

18. Conclusiones

1. Al ser la movilidad igual a 1, se deduce que la tenaza requiere un solo motor para realizar su trabajo.
2. El mecanismo tiene una inversión cinemática que ocurre cuando la tenaza externa entra en contacto con la superficie plana superior de la bobina.
3. La inversión cinemática produce un movimiento distinto de los elementos en cada etapa de trabajo, así en la primera etapa se mueve la tenaza externa y la interna está detenida.
4. En la segunda etapa de trabajo se detiene la tenaza externa, y la interna que antes estaba detenida, comienza a moverse hasta detenerse también cuando termina de aprisionar la bobina por su cilindro hueco interior.
5. La forma lineal que presentan las gráficas de posición de las tenazas versus posición angular de entrada, al ser prácticamente líneas rectas e inclinadas, predicen que el movimiento de salida en ambas etapas de movimiento del mecanismo se produce a velocidad casi constante, aunque diferente en cada etapa. La pendiente (m) en la primera etapa es $m_1=0.06^\circ/mm$ mientras que en la segunda $m_2=-0.12^\circ/m$.

Podemos deducir que la pinza cargabobinas tiene una amplia oportunidad en industrias que se dediquen a trabajar con bobinas, mazas o similares. Se demostró y comprobó que su diseño es apto para desarrollarse e implementarse.

Los resultados prácticos de este proyecto están fundamentados y basados en los circuitos cinemáticos presentes. Se busca tener el mínimo error posible entre los cálculos y las simulaciones en los softwares. Hay dos razones por las que solo son coincidentes en el 99%, el error de mediciones de la pinza y que el análisis está calculado pensando que la pinza se moverá en un eje vertical totalmente, cosa que se demostrará que no es así, porque la distancia al será diferente de cero. Las mediciones fueron tomadas de una pinza ya existente, existe un error porque no fueron tomadas con herramientas ni instrumentos de

medición, es difícil centrar la medición en el centro de los barrenos donde se encuentran los pernos.

19. Anexos

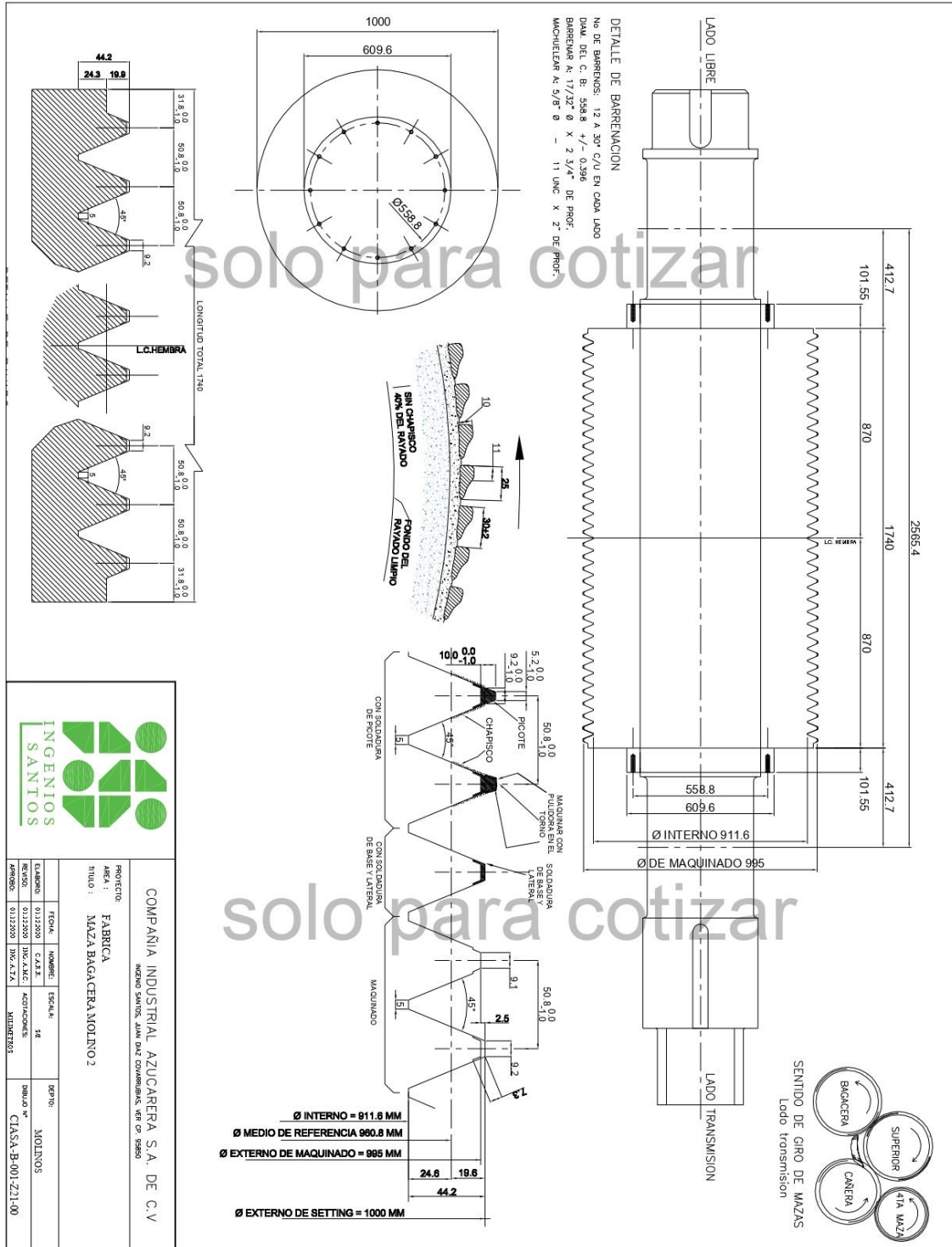


Ilustración 35. Medidas de masa bagacera de ingenio azucarero

Anexo A. Medidas fundamentales del mecanismo

Anexo B. Datos de la placa:

Modelo: HHH Type Z1-404594

Fabricado en Zug/Switzerland

Fabricante: Heppenstall-Europe

Capacidad: 21t

Serie: 2494

Año de fabricación: 2006

Mínima apertura: 180mm

Máxima apertura: 760mm

Peso: 4700Kg

20. Bibliografía

Fogarasy, AA and Smith, & MR . (1995). The case for a general method of kinematic analysis of plane mechanisms based on equations of constraint. *J. Uicker et al. Theory of machines and mechanisms.*, 3, 7.

[1] R. Norton, “Diseño de Maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos”, cuarta edición, Mcgraw Hill 2009.

(Norton, 2009)

[2] D. Myszka, “Maquinas y Mecanismos”, cuarta edición, Pearson 2012.

(Mysxka, 2012)

[3] J. Mendoza, S. Caraballo “Grafos de vinculaciones en el análisis cinemático de un mecanismo de ventana batiente” Puerto Ordaz, Venezuela. XII Jornadas de Investigación UNEXPO 2014

[4] H. Dresig, F. Holzweilig “Dynamics of Machinery, Theory and Applications”, ninth edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

Fogarasy, AA and Smith, & MR . (1995). The case for a general method of kinematic analysis of plane mechanisms based on equations of constraint. J. Uicker et al. Theory of machines and mechanisms., 3, 7.

Mendez, J., Mendoza Jesús, & Caraballo, S. (2018). ANÁLISIS DE POSICIONES DE LA TENAZA CARGA BOBINAS HEPENSTALL-EUROPE DE 21T DE SIDOR. 10.

Mysxka, D. H. (2012). *Maquinas y mecanismos*. Monterrey: Pearson Educación de México, S.A. de C.V. .

Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México, DF: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, SA DE CV.

<https://mx.ternium.com/es/nuestra-empresa>

Hacemos el acero de México. (s/f). Ternium.com. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de <https://mx.ternium.com/es/nuestra-empresa>

https://maquinariachicago.com/detalle_maquinaria.php?ID=9053

Maquinaria Chicago. (s/f). Maquinariachicago.com. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de https://maquinariachicago.com/detalle_maquinaria.php?ID=9053

<http://www.frymsa.mx/>

Gabriela, & Saul. (s/f). *Frymsa S.A de C.V.* Frymsa.mx. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de <http://www.frymsa.mx/>

<https://www.dedini.com.br/>

(S/f). Com.br. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de <https://www.dedini.com.br/>

<https://www.directindustry.es/prod/heppenstall-technology/product-86593-805327.html>

(S/f-c). Directindustry.es. Recuperado el 6 de noviembre de 2021, de <https://www.directindustry.es/prod/heppenstall-technology/product-86593-805327.html>

<https://mrdanielgutierrez.files.wordpress.com/2010/09/geometria-plana-y-de-espacio-y-trigonometria-baldor1.pdf>

(S/f). Wordpress.com. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de

<https://mrdanielgutierrez.files.wordpress.com/2010/09/geometria-plana-y-de-espacio-y-trigonometria-baldor1.pdf>

<https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/pinza-elevacion-bobinas-114458.html>

Pinza de elevación de bobinas - Todos los fabricantes industriales - Vídeos. (s/f).

Directindustry.es. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de

<https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/pinza-elevacion-bobinas-114458.html>

<https://www.dynalserg.com/mesas-elevadoras/segun-aplicacion/manipulacion-de-bobinas>

Manipulación de bobinas – Coils. (s/f). Dynalserg.com. Recuperado el 5 de noviembre de

2021, de <https://www.dynalserg.com/mesas-elevadoras/segun-aplicacion/manipulacion-de-bobinas>

<https://www.demagcranes.com/es/company/case-studies/manipulacion-de-acero>

Manipulación *de acero*. (s/f). Demagcranes.com. Recuperado el 5 de noviembre de 2021,
de <https://www.demagcranes.com/es/company/case-studies/manipulacion-de-acero>

<https://lsbunefm.files.wordpress.com/2018/10/disec3blo-de-maquinaria-robert-l-norton-4.pdf>

(S/f-b). Wordpress.com. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de

<https://lsbunefm.files.wordpress.com/2018/10/disec3blo-de-maquinaria-robert-l-norton-4.pdf>

file:///C:/Users/carlo/Downloads/TESIS/Teoria%20de%20maquinas%20y%20mecanismos_Joseph%20Edard%20Shigley.pdf

<file:///C:/Users/carlo/Downloads/TESIS/Dise%C3%B1o%20de%20mecanismos,%20an%C3%A1lisis%20y%20sintesis%20Arthur%20G%20Erdman%20George%20N%20Sandor.pdf>

<http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Cinem%C3%A1tica%20de%20las%20M%C3%A1quinas.pdf>

Eléctrica, Á. M. Y. (s/f). *CINEMÁTICA DE LAS MÁQUINAS*. Uaslp.mx. Recuperado el 5
de noviembre de 2021, de

<http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Cinem%C3%A1tica%20de%20las%20M%C3%A1quinas.pdf>

<https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11670/1/978-84-09-25222-0.pdf>

(S/f). Unex.es. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de

<https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11670/1/978-84-09-25222-0.pdf>

https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_1_introduccion_a_los_mecanismos_y_a_la_cinematica.pdf

(S/f-b). Utp.ac.pa. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de

https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_1_introduccion_a_los_mecanismos_y_a_la_cinematica.pdf

(N.d.). Utp.Ac.Pa. Retrieved November 4, 2021, from https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_1_introduccion_a_los_mecanismos_y_a_la_cinematica.pdf

Gabriela, S., 2021. *Frymsa SA de CV*. [en línea] Frymsa.mx. Disponible en: <<http://www.frymsa.mx/>> [Consultado el 4 de noviembre de 2021].

(N.d.). Utp.Ac.Pa. Retrieved November 4, 2021, from https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/72/clase_1_introduccion_a_los_mecanismos_y_a_la_cinematica.pdf

(S/f-b). Wordpress.com. Recuperado el 4 de noviembre de 2021, de <https://mrdanielgutierrez.files.wordpress.com/2010/09/geometria-plana-y-de-espacio-y-trigonometria-baldor1.pdf>

Cardona, S. y Clos, D.(2000). “Teoria de Màquines”.(Segunda Edición en Catalán). Ediciones UPC. Barcelona. pág 248.

Angeles, J. et all (1994). “The Design of Cam Mechanisms whit Translating Flat-Faced Follower Under Curvature Constraints”. *Journal of Mechanical Design*. Vol 116. pág 306-310.

Calero Pérez, R. y Carta González, J. A.(1999). “Mecanismos de Levas” en Calero Pérez, R. y Carta González, J. A “*Fundamentos de Mecanismos y Máquinas para Ingenieros*”. Mc Graw-Hill. Madrid. pág. 215-246.

Chunhong, L., Ming .C. y Yujun, L.(1996). “The Design of a New Outside Conjugate Cams for Shedding Mechanism”. *Journal of China Textile University*. Vol 13. No 1. pág. 38-44.

Erdman, A. G. y Sandor, G. N.(1984) “Cam Design”en Erdman, A. G. y Sandor, G. N. “*Mechanism Design: Analysis and Synthesis*”. Prentice-Hall. New Jersey. pág. 271-339.

Goodman, A. y Hirsch, L (1996). “Algebra y Trigonometría Analítica”.Prentice Hall. México. pág 533.

Huang, G.(1993). “Investigation of Conjugate-cam Desing for the Beat-up Mechanism” *Journal of Textile Institute* (Tianjin Institute of Textile Science and Technology). Vol 84. No. 3. pág.387-393.

Norton, R. (1995). “Diseño de Levas” en Norton, R. “*Diseño de Maquinaria*”. Mc Graw-Hill. México. pág 327-436.

Shigley, J. E. y Uicker Jr., J. J. (1988). “Diseño de levas” en Shigley, J. E. y Uicker Jr., J. J. “*Teoría de Mecanismos y Máquinas*”. Mc Graw-Hill. México. pág.204-257.

Reyes Pozo, G. (2000). “Técnicas de Diseño Geométrico Asistido por Ordenador para Mecanismos Leva-palpador”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. pág. 136.