

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Estudio de la Redundancia Cinemática de un Robot Industrial de 6 GDL en Tareas de Soldadura de Arco”

POR

Ing. Jonathan René Blásquez Livas

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Alfonso Pámanes García

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (18)-TMCIE-2017

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2017



Torreón, Coah., **6/Diciembre/2017**
Dependencia: DEP/CPCIE
Oficio: DEPI/CPCIE/155/2017
Asunto: Autorización de impresión
de tesis.

C. Jonathan René Blásquez Livas
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA,
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

"Estudio de la Redundancia Cinemática de un Robot Industrial de 6 GDL en Tareas de Soldadura de Arco"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (18)-TMCIE-2017**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación

DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna

ALT/JHS



Torreón, Coah., 6/Diciembre/2017

DR. ARMANDO LONGORIA DE LA TORRE
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"Estudio de la Redundancia Cinemática de un Robot Industrial de 6 GDL en
Tareas de Soldadura de Arco"**

Desarrollado por el **C. Jonathan René Blásquez Livas**, con número de control **M1513051** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN

Dr. J. Alfonso Pámanes García
Asesor/Director de Tesis

Dr. Miguel A. Llana Leal
Comité Tutorial

Dr. Enrique Cuan Durón
Comité Tutorial

Dr. Ricardo E. Campa Cocom
Comité Tutorial



Estudio de la Redundancia Cinemática de un Robot Industrial de 6 grados de libertad en Tareas de Soldadura de Arco

Résumé

En esta tesis se analiza el problema de la redundancia cinemática de un robot industrial de soldadura de 6 grados de libertad, se desarrollan métodos computacionales formales para su resolución fuera de línea, y se valora la importancia de su aplicación. El software correspondiente se desarrolló en Matlab® con el fin de facilitar los cálculos y la visualización de los movimientos del manipulador por medio de simulaciones. En los estudios desarrollados se utiliza el robot de soldadura Fanuc, modelo ARC Mate® 100iC instalado en el Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la Laguna.

Study of the Kinematic Redundancy of a 6 DOF Industrial Robot for Arc Welding Tasks

Abstract

In this thesis, the problem of the kinematic redundancy of a 6 degree-of-freedom (DOF) welding robot is analyzed in order to develop some formal off-line methods and evaluate the relevance of its application. The software methods were developed using the Matlab® platform to simplify the computation and visualization of the manipulator's motions by graphic simulation. For the studies completed here we employed a Fanuc welding robot, model ARC Mate® 100iC, which is installed at the Mechatronics and Control laboratory of the Instituto Tecnológico de la Laguna.

Agradecimientos

Primero me gustaría expresar el agradecimiento a mi familia por darme todo su apoyo durante el tiempo que estuve realizando este proyecto.

En segundo al Dr. José Alfonso Pámanes por su continuo apoyo e impulsos que me dio durante la elaboración de este trabajo.

También me gustaría agradecer al personal del Instituto Tecnológico de la Laguna en especial a la MC. Itzelle Johanna Oronoz Ponce y al MC. Arturo Urquizo Valdés que gracias a su apoyo he llegado hasta donde me encuentro en este momento.

Expreso mi reconocimiento al CONACyT por su apoyo económico para el desarrollo de la presente investigación durante los estudios de maestría, así como la Dirección General de Educación Superior Tecnológica de la S.E.P.

Índice de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Conceptos Generales	1
1.2 Redundancia cinemática.....	2
1.3 Trabajo previo sobre redundancia cinemática y tareas de soldadura	3
1.4 Objetivo de la tesis	6
1.5 Organización de la tesis.....	6
2. Fundamentos de redundancia cinemática y desempeño cinemático en robots manipuladores	7
2.1 Espacio nulo.	7
2.2 Proyección al espacio nulo de J.....	8
2.3 Modelo inverso de velocidad (MIV)	9
2.4 Índice de manipulabilidad	11
3. Modelado del robot y análisis preliminar del desempeño cinemático.....	14
3.1 Modelado cinemático de posición.....	14
3.1.1 Descripción cinemática del robot Fanuc Arc Mate 100iC	14
3.1.2 Matrices elementales del manipulador	16
3.1.3 Modelado cinemático directo de posición.....	17
3.1.4 Modelo cinemático inverso de posición.....	18
3.2 Especificación de la matriz 6_hT	20
3.3 Especificación de la matriz snap de la antorcha.....	21
3.4 Modelado cinemático de velocidad	22
3.5 Análisis preliminar del desempeño cinemático del robot.....	24
4. Casos de Estudio.....	29
4.1 Caso 1. Antorcha I, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	29
4.2 Caso 2. Antorcha I, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	31
4.3 Caso 3. Antorcha I, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	33
4.4 Caso 4. Antorcha II, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	36
4.5 Caso 5. Antorcha II, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	38
4.6 Caso 6. Antorcha II, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	39
4.7 Caso 7. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	42
4.8 Caso 8. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	44
4.9 Caso 9. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	45
4.10 Caso 10. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	48
4.11 Caso 11. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	49
4.12 Caso 12. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	51
4.13 Caso 13. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	54
4.14 Caso 14. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = -120^\circ$..	55

4.15 Caso 15. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	57
4.16 Caso 16. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	59
4.17 Caso 17. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = -120^\circ$...	61
4.18 Caso 18. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	63
4.19 Caso 19. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	65
4.20 Caso 20. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	67
4.21 Caso 21. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	69
4.22 Caso 22. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$	71
4.23 Caso 23. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$	73
4.24 Caso 24. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta.....	75
5. Conclusiones.....	78
Referencias bibliográficas.....	81

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Ejemplos de robots industriales	2
Figura 1.2 Robot Manipulador Fanuc Arc Mate 100iC® del ITLag.....	4

Capítulo 2

Figura 2.1 Representación del mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales	7
Figura 2.2 Mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales. Se representan el espacio nulo y su complemento ortogonal.....	8
Figura 2.3 Proyección de vectores del espacio de velocidades articulares al espacio nulo de J , y mapeo de los vectores de este espacio al vector nulo de velocidad operacional.....	9
Figura 2.4 Mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales de un manipulador 2R.	11

Capítulo 3

Figura 3.1 Esquema cinemático del robot Fanuc ARC Mate 100iC.....	14
Figura 3.2 Esquema del robot en su estación de trabajo. Se aprecian los marcos Σ_e de la estación de trabajo, Σ_0 de la base del robot, Σ_t de la mesa de trabajo y Σ_h de la herramienta (antorcha) del robot.	15
Figura 3.3 Geometría de la antorcha I. Ángulo de boquilla de 22.5° (Acot. en mm.).	16
Figura 3.4 Geometría de la antorcha II. Ángulo de boquilla de 45° (Acot. en mm.).	16
Figura 3.5 Marcos Σ_6 y Σ_h asociados a la antorcha, e interpretación del ángulo ψ en la definición de la orientación de la antorcha.....	20
Figura 3.6 Secuencia de posturas en diagrama de alambre del manipulador durante una reconfiguración interna con la antorcha I.....	26
Figura 3.7 Evolución de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional durante la reconfiguración con la antorcha I.....	27
Figura 3.8 Secuencia de posturas en diagrama de alambre del manipulador durante una reconfiguración interna con la antorcha II.	27
Figura 3.9 Evolución de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional durante la reconfiguración con la antorcha II.....	28

Capítulo 4

Figura 4.1 Caso 1. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.....	30
Figura 4.2 Caso 1. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.....	30
Figura 4.3 Caso 1. Velocidades articulares requeridas para la ejecución de la tarea.	31
Figura 4.4 Caso 2. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.....	32
Figura 4.5 Caso 2. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.....	32

Figura 4.6 Caso 2. Velocidades articulares requeridas para la ejecución de la tarea.....	33
Figura 4.7 Caso 3. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.....	34
Figura 4.8 Caso 3. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	34
Figura 4.9 Caso 3. Comportamiento de las velocidades articulares.....	35
Figura 4.10 Caso 3. Historia del ángulo ψ	35
Figura 4.11 Caso 4. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	36
Figura 4.12 Caso 4. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	37
Figura 4.13 Caso 4. Comportamiento de las velocidades articulares.....	37
Figura 4.14 Caso 5. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	38
Figura 4.15 Caso 5. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	39
Figura 4.16 Caso 5. Comportamiento de las velocidades articulares.....	39
Figura 4.17 Caso 6. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	40
Figura 4.18 Caso 6. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	41
Figura 4.19 Caso 6. Comportamiento de las velocidades articulares.....	41
Figura 4.20 Caso 6. Historia del ángulo ψ	42
Figura 4.21 Caso 7. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	42
Figura 4.22 Caso 7. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	43
Figura 4.23 Caso 7. Comportamiento de las velocidades articulares.....	43
Figura 4.24 Caso 8. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	44
Figura 4.25 Caso 8. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	45
Figura 4.26 Caso 8. Comportamiento de las velocidades articulares.....	45
Figura 4.27 Caso 9. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	46
Figura 4.28 Caso 9. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.....	46
Figura 4.29 Caso 9. Comportamiento de las velocidades articulares.....	47
Figura 4.30 Caso 9. Historia del ángulo ψ	47
Figura 4.31 Caso 10. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	48
Figura 4.32 Caso 10. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	49
Figura 4.33 Caso 10. Comportamiento de las velocidades articulares.....	49
Figura 4.34 Caso 11. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	50
Figura 4.35 Caso 11. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	50
Figura 4.36 Caso 11. Comportamiento de las velocidades articulares.....	51
Figura 4.37 Caso 12. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	52
Figura 4.38 Caso 12. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	52
Figura 4.39 Caso 12. Comportamiento de las velocidades articulares.....	53
Figura 4.40 Caso 12. Historia del ángulo ψ	53
Figura 4.41 Caso 13. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	54
Figura 4.42 Caso 13. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	55
Figura 4.43 Caso 13. Comportamiento de las velocidades articulares.....	55
Figura 4.44 Caso 14. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	56
Figura 4.45 Caso 14. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	56
Figura 4.46 Caso 14. Comportamiento de las velocidades articulares.....	57
Figura 4.47 Caso 15. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	58
Figura 4.48 Caso 15. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	58
Figura 4.49 Caso 15. Comportamiento de las velocidades articulares.....	59
Figura 4.50 Caso 15. Historia del ángulo ψ	59
Figura 4.51 Caso 16. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	60
Figura 4.52 Caso 16. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	60

Figura 4.53 Caso 16. Comportamiento de las velocidades articulares.....	61
Figura 4.54 Caso 17. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	62
Figura 4.55 Caso 17. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	62
Figura 4.56 Caso 17. Comportamiento de las velocidades articulares.....	63
Figura 4.57 Caso 18. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	63
Figura 4.58 Caso 18. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	64
Figura 4.59 Caso 18. Comportamiento de las velocidades articulares.....	64
Figura 4.60 Caso 18. Historia del ángulo ψ	65
Figura 4.61 Caso 19. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	66
Figura 4.62 Caso 19. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	66
Figura 4.63 Caso 19. Comportamiento de las velocidades articulares.....	67
Figura 4.64 Caso 20. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	67
Figura 4.65 Caso 20. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	68
Figura 4.66 Caso 20. Comportamiento de las velocidades articulares.....	68
Figura 4.67 Caso 21. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	69
Figura 4.68 Caso 21. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	70
Figura 4.69 Caso 21. Comportamiento de las velocidades articulares.....	70
Figura 4.70 Caso 21. Historia del ángulo ψ	71
Figura 4.71 Caso 22. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	71
Figura 4.72 Caso 22. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	72
Figura 4.73 Caso 22. Comportamiento de las velocidades articulares.....	72
Figura 4.74 Caso 23. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	73
Figura 4.75 Caso 23. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	74
Figura 4.76 Caso 23. Comportamiento de las velocidades articulares.....	74
Figura 4.77 Caso 24. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.....	75
Figura 4.78 Caso 24. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.....	76
Figura 4.79 Caso 24. Comportamiento de las velocidades articulares.....	76
Figura 4.80 Caso 24. Historia del ángulo ψ	77

Lista de abreviaturas y acrónimos

GDL	Grados de libertad
ITLag	Instituto Tecnológico de la Laguna
MDP	Modelo Directo de posición
MIP	Modelo Inverso de posición
MDV	Modelo Directo de velocidad
DHM	Denavit-Hartenberg modificado

1. Introducción

1.1 Conceptos Generales

Un robot manipulador o robot industrial es un sistema mecatrónico con movimientos reprogramables que posee varios grados de libertad (GDL) para desplazar su órgano terminal. Emplea diversos subsistemas, los cuales le permiten programar y controlar sus movimientos de manera adecuada. El primer subsistema es el mecánico, el cual consiste en una sucesión de eslabones articulados entre sí, el órgano terminal, los actuadores y transmisiones de potencia; este subsistema define la morfología del robot. El subsistema de control permite ejecutar los movimientos necesarios en cada uno de los actuadores a fin de desplazar de manera coordinada los eslabones del subsistema mecánico, de manera que el órgano terminal realice sus tareas. El subsistema de comunicación permite al usuario programar los movimientos del robot e informarse acerca del estado del robot. Las señales físicas necesarias para conocer y controlar el estado del robot son generadas por el subsistema de percepción.

Los atributos físicos de un robot manipulador deben permitirle desenvolverse en distintos ambientes de trabajo según se requiera; puede ser desde la tarea más sencilla como desplazar una pieza de un sitio a otro, hasta tareas complejas como la aplicación de cordones de soldadura en espacios de trabajo limitados o el ensamblaje de piezas de geometrías diversas. Las arquitecturas usadas comúnmente en las cadenas cinemáticas de un robot le confieren al robot la habilidad de desplazarse en zonas de trabajo restringidas. Un robot industrial típico cuenta con 6 GDL, los cuales le sirven para desplazar al órgano terminal en su espacio de trabajo de manera que pueda alcanzar las posiciones y orientaciones necesarias para realizar la operación o proceso para el que es habilitado. El movimiento que consigue el órgano terminal es de carácter tridimensional (3D); es decir que puede realizar un movimiento de traslación con respecto a tres ejes perpendiculares (X, Y, Z), combinados con rotaciones alrededor de ellos (conocidas como guiñada, cabeceo y alabeo). Estas tres traslaciones y tres rotaciones del órgano terminal deben poder controlarse de manera independiente; los movimientos de los eslabones que permiten controlar estas variables definen los 6 GDL del robot.

Para aplicaciones industriales se han desarrollado diferentes modelos de manipuladores, los cuales se distinguen por sus capacidades para realizar un proceso automatizado, entre ellos se encuentran el Kawasaki BX100 y el Kuka KR 16 L6-2, ambos de 6 GDL, que se muestran en la figura 1.1, los cuales permiten efectuar tareas de soldadura, manipulación de piezas, y otras que requieran de herramientas especializadas.

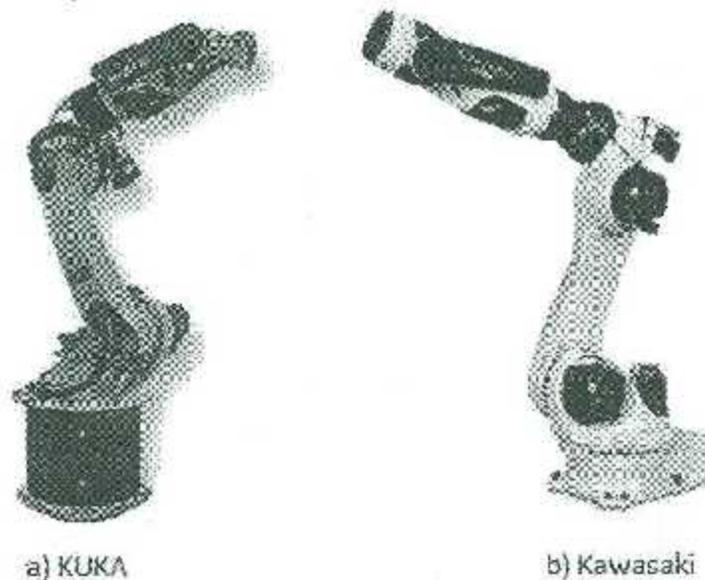


Figura 1.1 Ejemplos de robots industriales

1.2 Redundancia cinemática

Se dice que un robot manipulador es cinemáticamente redundante si su número de grados de libertad es mayor que el estrictamente indispensable para la movilidad deseada del órgano terminal. En otras palabras, cuando el número de grados de libertad, n , de un manipulador es mayor que el número de coordenadas operacionales, m , requerido para definir la pose deseada del órgano terminal, se considera que el manipulador es cinemáticamente redundante.

Las expectativas tecnológicas de los robots pueden ser mejoradas ampliamente mediante la redundancia cinemática. En efecto, este atributo ha permitido incrementar la versatilidad de las aplicaciones de los robots manipuladores. Esta es la razón por la cual el

número de investigaciones sobre redundancia ha sido consistente en las últimas décadas [1, 2].

Las coordenadas operacionales que definen la pose del órgano terminal con respecto a un marco de referencia se agrupan generalmente en un vector x de dimensión m . Asimismo, las variables articulares que definen la postura de un robot se asocian en un vector q de dimensión n . La diferencia entre el número de grados de libertad y el número de coordenadas operacionales del robot define su grado de redundancia r ; es decir $r = n - m$ con $r \geq 1$. Si $r=0$, entonces el robot es cinemáticamente *no redundante*.

Los robots manipuladores utilizados generalmente en el sector industrial poseen 6 GDL; sin embargo, dependiendo de las características de la operación a realizar y de la geometría del órgano terminal, sus tareas pueden requerir solamente 5 GDL. Este es el caso de las operaciones de pintura, de soldadura de puntos y de soldadura de arco eléctrico. En consecuencia, en tales casos los robots podrían trabajar como si fueran cinemáticamente redundantes pues existen infinitas soluciones para una sola pose deseada del órgano terminal. No obstante, en muchos casos no se aprovecha la redundancia cinemática y la orientación se especifica arbitrariamente, sin tener en cuenta la manera en que influye la orientación del órgano terminal en el desempeño cinemático del robot.

El presente trabajo se centra en el estudio de la redundancia cinemática del robot industrial Fanuc Arc Mate 100iC, de 6 GDL, como el que se encuentra en el Laboratorio de Mecatrónica y Control del Instituto Tecnológico de la laguna y se muestra en la figura 1.2. Específicamente, se propone definir un procedimiento para la planificación de los movimientos de robots con características similares, que permita aprovechar la redundancia cinemática en tareas que requieren solamente de cinco coordenadas operacionales, con el fin de mejorar el desempeño cinemático del robot al ejecutar sus tareas.

1.3 Trabajo previo sobre redundancia cinemática y tareas de soldadura

La redundancia cinemática en manipuladores fue propuesta por D.E. Whitney [3] a fin de mejorar su capacidad para eludir posturas singulares durante la ejecución de sus tareas. Si bien en ese trabajo se establecieron los fundamentos matemáticos para la resolución de la

redundancia cinemática, en él no se formuló ningún proceso computacional orientado a su aplicación en un robot manipulador.



Figura 1.2 Robot Manipulador Fanuc Arc Mate 100iC® del ITLag.

A. Liégeois fue uno de los primeros en implementar una aplicación específica de la redundancia cinemática [4] en un manipulador robótico; en ese trabajo se consideró dicha redundancia con el propósito de controlar las posturas de un manipulador durante la ejecución de su tarea, de tal manera que éstas se alejaran de los límites articulares tanto como fuera posible.

En estudios posteriores se propusieron diversos enfoques para la aplicación de la redundancia cinemática en la generación de trayectorias para prevenir colisiones en ambientes obstaculizados de manipuladores, v.gr. [5], [6]. Por otra parte, algunos autores presentaron procedimientos para la aplicación de la redundancia cinemática para la optimización del desempeño cinemático de manipuladores [7], [8]. En [7] se utilizó el índice de la manipulabilidad [9] como criterio de desempeño cinemático, mientras que en [8] se

aplicaron las relaciones de transmisión de velocidad y de fuerza en direcciones específicas propuestas en el mismo trabajo.

El índice de desempeño conocido como la *manipulabilidad* de un robot fue introducido por T. Yoshikawa [9]; se trata de un número que mide la facilidad de transformación de desplazamientos articulares en desplazamientos en el órgano terminal. Teniendo en cuenta la falta de homogeneización de la matriz jacobiana de un robot de más de tres GDL, la noción de la manipulabilidad fue ampliada posteriormente por T. Yoshikawa [10] para medir de manera independiente las *manipulabilidades traslacional y rotacional* de un robot, a través de los correspondientes índices de desempeño.

Por otra parte, el problema de la optimización del desempeño cinemático de robots redundantes ha sido estudiado a lo largo de varias décadas, v.gr. [11-13], teniendo en cuenta el emplazamiento relativo robot / tarea.

A pesar de que los conceptos de la *pseudoinversa* de la matriz jacobiana y de la *proyección de vectores al espacio nulo* de la matriz jacobiana, han sido aplicados desde hace varias décadas, ambos han sido revisados en diferentes trabajos: la aplicación de la *pseudoinversa* de J en [14] y, más recientemente, el uso de vectores de proyección en el espacio nulo en [15].

Con base en conceptos y formulaciones desarrolladas en los primeros estudios sobre la resolución de la redundancia cinemática, recientemente se han propuesto diversos trabajos orientados a la programación fuera de línea de robots redundantes [16-18]. Una de las aplicaciones que ha recibido una atención particular entre la comunidad científica, en relación con la programación fuera de línea, es la de soldadura de arco [18-20].

Este trabajo se centra en la planificación fuera de línea de los movimientos de un robot para tareas de soldadura de arco, basado en el algoritmo *fmincon* de Matlab®. El proceso de planificación propuesto permite obtener las posturas óptimas del manipulador requeridas para la ejecución de tareas, aprovechando las propiedades de la *pseudoinversa* de la matriz jacobiana del robot.

1.4 Objetivo de la tesis

Analizar la aplicación de un robot industrial de 6 GDL en tareas de soldadura de arco bajo condiciones de redundancia cinemática y proponer un procedimiento de planificación de movimientos del robot que permita aprovechar la redundancia para el mejoramiento del desempeño cinemático del robot.

1.5 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se efectúa una revisión de los fundamentos sobre la redundancia cinemática y el desempeño cinemático de manipuladores, en el cual se introducen los conceptos de *solución de mínima norma* y *solución homogénea* de la cinemática inversa de un robot cinemáticamente redundante.

En el capítulo 3 se desarrollan los modelos matemáticos que describen la cinemática del manipulador Fanuc ArcMate 100iC. Se trata del modelo directo de posición (MDP), el modelo inverso de posición (MIP), y el modelo directo de velocidad (MDV). Además se efectúa un análisis preliminar del comportamiento de los índices de manipulabilidad que se obtienen para una postura específica de la herramienta de soldar considerando múltiples posturas del robot.

En el capítulo 4 se efectúa el estudio de diversas soluciones posibles de la redundancia cinemática considerando, varias geometrías de la ruta del órgano terminal. En cada caso se utiliza un criterio distinto para la resolución de la redundancia: en el primer criterio se define una orientación intuitiva fija del órgano terminal especificada por el usuario; en el segundo anteno se supone una orientación fija de la herramienta, determinada mediante exploración exhaustiva; y por último se considera una orientación óptima para cada postura instantánea del manipulador requerida durante el seguimiento de la ruta deseada, aplicando un procedimiento original. En cada caso se estudia el comportamiento del robot con dos modelos de antorchas de soldar, de geometrías diferentes, a fin de apreciar los atributos del método propuesto bajo diferentes condiciones.

2. Fundamentos de redundancia cinemática y desempeño cinemático en robots manipuladores

2.1 Espacio nulo.

Se sabe que el modelo directo de velocidad de un robot se expresa como

$$\dot{x} = J\dot{q},$$

con $\dot{x} \in \mathbb{R}^m$, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$, $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$, siendo $n > m$

donde \dot{x} es el vector del estado de velocidad del órgano terminal del robot, \dot{q} es el vector de velocidades articulares del robot y J es la matriz Jacobiana del robot. Esta ecuación representa un mapeo del espacio de velocidades articulares $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ al espacio de velocidades operacionales realizables $\dot{x} \in \mathbb{R}^m$ como se muestra en la figura 2.1

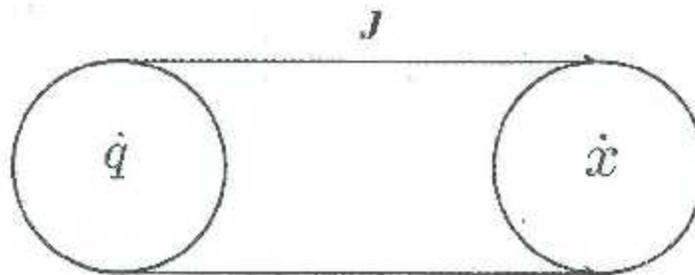


Figura 2.1 Representación del mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales

En el espacio de velocidades articulares es posible identificar un subconjunto $N(J)$ tal que para todo $\dot{q} \in N(J)$, verificando $\dot{q} \neq \mathbf{0}$, se tiene que $J\dot{q} = \mathbf{0}$. A este subconjunto $N(J)$ se le llama espacio nulo de J ; una representación gráfica de este subconjunto se aprecia en la figura 2.2. Por otra parte, todos los vectores del espacio de velocidades articulares, tales que $\dot{q} \notin N(J)$ son ortogonales a los vectores del espacio nulo de J . En consecuencia, al conjunto de vectores que verifican la condición $\dot{q} \notin N(J)$ se le llama complemento ortogonal $N(J)^\perp$

del espacio nulo de J . En la figura 2.2 se aprecia una representación esquemática del espacio nulo de J y su complemento ortogonal.

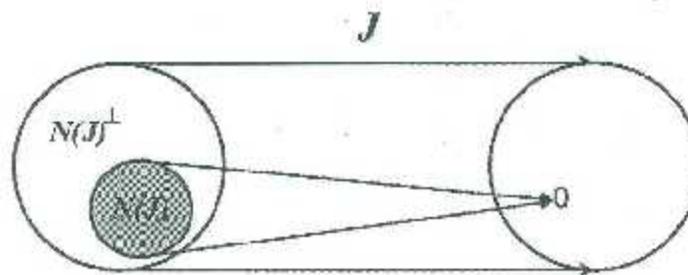


Figura 2.2 Mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales. Se representan el espacio nulo y su complemento ortogonal.

2.2 Proyección al espacio nulo de J

Se considera la siguiente ecuación trivial:

$$J\mathbf{a} - J\mathbf{a} = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

donde $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ siendo $n > m$, y $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^m$ es un vector arbitrario del espacio de velocidades articulares del manipulador.

Ahora bien, considerando las propiedades de la *pseudoinversa* (o inversa Moore-Penrose) de una matriz se sabe que:

$$J = JJ^+J \quad (2.2)$$

donde $J^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ es una matriz inversa generalizada que existe para todo $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Si J es de rango máximo, entonces J^+ es única y se puede calcular mediante cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} a) \quad J^+ &= J^T(JJ^T)^{-1} \quad \text{si } n > m \\ b) \quad J^+ &= (JJ^T)^{-1}J^T \quad \text{si } m > n \end{aligned}$$

Entonces, considerando la ecuación (2.2), se tiene que la ecuación (2.1) se puede escribir como

$$J\mathbf{a} - JJ^+J\mathbf{a} = \mathbf{0}$$

$$(J - JJ^+J)\mathbf{a} = \mathbf{0},$$

o bien,

$$J(I_n - J^+J)a = 0, \quad (2.3)$$

donde I_n es la matriz identidad de $n \times n$.

Se puede observar en la ecuación (2.3) que:

$$(I_n - J^+J)a \in R^n$$

Por lo tanto, $(I_n - J^+J)a$ es un vector en el espacio articular del manipulador. Así, se designará a este vector como \dot{q}^* ; es decir,

$$\dot{q}^* \equiv (I_n - J^+J)a \quad (2.4)$$

En consecuencia, sustituyendo \dot{q}^* en la ecuación (2.3), se obtiene:

$$J\dot{q}^* = 0 \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) permite observar que:

- a) \dot{q}^* es un vector de velocidades articulares pertenecientes al espacio nulo de J .
- b) Puesto que a se escogió arbitrariamente, entonces la matriz $(I_n - J^+J)$ es un operador que proyecta a todo vector de R^n al espacio nulo de J , como se muestra en la figura 2.3.

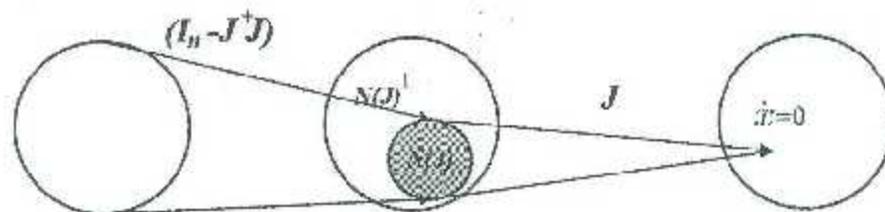


Figura 2.3 Proyección de vectores del espacio de velocidades articulares al espacio nulo de J , y mapeo de los vectores de este espacio al vector nulo de velocidad operacional

2.3 Modelo inverso de velocidad (MIV)

Se sabe que el modelo cinemático directo de velocidad de un robot manipulador está dado por

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (2.6)$$

donde $\dot{x} \in R^m$, $\dot{q} \in R^n$, $J \in R^{m \times n}$.

Si $m = n$, entonces el manipulador es no redundante y, si J es no singular, el modelo inverso de velocidad del robot se determina mediante

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x} \quad (2.7)$$

Si $n > m$, entonces el manipulador es redundante y el modelo inverso de velocidad no se puede obtener mediante la ecuación (2.7) puesto que J es rectangular y J^{-1} no está definida. Sin embargo, es posible demostrar que si J es de rango máximo y $\dot{x} \neq 0$ entonces el vector de velocidad articular dado por

$$\dot{q} = J^+\dot{x} \quad (2.8)$$

constituye una solución de la ecuación (2.6). Es decir que dicho vector de velocidad articular produce la correspondiente velocidad \dot{x} del órgano terminal y como $\dot{x} \neq 0$, entonces $\dot{q} \notin N(J)$. Ahora bien, puesto que J^+ es una matriz única, entonces el vector de velocidad articular \dot{q} del manipulador, dado por la ecuación (2.8), es el único que no pertenece a $N(J)^\perp$. Por lo tanto, cualquier otro vector solución de (2.6) tiene que ser la suma de $J^+\dot{x}$ más un vector \dot{q}^* en $N(J)$, de tal manera que $J^+\dot{x}$ garantice la verificación de la velocidad deseada \dot{x} mientras que el vector $\dot{q}^* \in N(J)$ no generaría desplazamiento en el órgano terminal. Así, considerando (2.9) se tiene que la solución general del modelo inverso de velocidad de un manipulador redundante se expresa mediante

$$\dot{q} = J^+\dot{x} + (I_n - J^+J)a \quad (2.9)$$

donde J^+ es la matriz *pseudoinversa* de J , a es un vector arbitrario $\in R^n$, e I_n es la matriz identidad de orden n . En la ec. (2.9), $J^+\dot{x}$ es conocida como la *solución de mínima norma* de la ecuación (2.6); es decir, es el vector \dot{q} de mínima norma euclidiana que satisface la ecuación (2.6). Por otra parte, el término $(I_n - J^+J)a$ representa la proyección de a al espacio nulo de J , y se le llama *solución homogénea* de (2.6); se trata de un vector de velocidades articulares que solamente produce una reconfiguración interna de la cadena cinemática del manipulador y, no genera desplazamiento alguno del órgano terminal.

2.4 Índice de manipulabilidad

Considérese un manipulador cuyo vector de velocidades articulares se restringe mediante $\|\dot{q}\| \leq 1$. Es posible demostrar usando (2.8) y la definición de J^+ para $n > m$, es decir $J^+ = J^T(JJ^T)^{-1}$ que el dominio de velocidades realizables de su órgano terminal está definido por la siguiente expresión:

$$\dot{x}^T (JJ^T)^{-1} \dot{x} \leq 1 \quad (2.10)$$

La expresión (2.10) describe un hiper-elipsoide en el espacio euclidiano R^m , al cual se lo ha definido como el *elipsoide de manipulabilidad* [9].

En la figura 2.4 se muestra la elipse de manipulabilidad para un robot de dos grados de libertad, con articulaciones rotacionales. En este caso particular el-elipsoide se reduce a una elipse. Ésta resulta del mapeo, mediante la matriz jacobiana, del espacio de velocidades articulares (las cuales satisfacen la condición $\|\dot{q}\| \leq 1$) al espacio de velocidades operacionales.

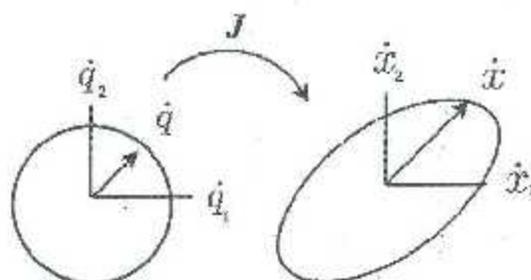


Figura 2.4 Mapeo del espacio de velocidades articulares al espacio de velocidades operacionales de un manipulador 2R.

En general, si el volumen de un elipsoide de manipulabilidad es grande, las normas de los vectores de velocidad del órgano terminal \dot{x} también serán grandes en cualquier dirección. Esto implica una conversión eficiente de las velocidades articulares en velocidad del órgano terminal. Inversamente, un elipsoide pequeño obtenido a partir de las mismas velocidades articulares significa que la mencionada conversión es ineficiente. La forma y tamaño del elipsoide dependerá de la matriz jacobiana y, por lo tanto, de la postura instantánea del manipulador. En consecuencia, el volumen del elipsoide de manipulabilidad

puede interpretarse como una medida de la eficacia con la cual la postura de un manipulador transforma las velocidades articulares en velocidades del órgano terminal en cualquier dirección. Dicha transformación es óptima cuando la postura del manipulador agranda el volumen del elipsoide tanto como sea posible. Este volumen se determina mediante:

$$V = kw \quad (2.11)$$

donde k es una constante que depende de la dimensión m de la tarea del manipulador, mientras que la variable w se calcula mediante la expresión (2.12):

$$w = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (2.12)$$

Obsérvese que, puesto que k es una constante, la maximización del volumen del elipsoide equivale a la maximización de la variable w , que es denominada por T. Yoshikawa [9] como el índice de *manipulabilidad*. Considerando lo anterior, la manipulabilidad permite evaluar globalmente la facilidad de convertir velocidades articulares en velocidad del órgano terminal, para una postura dada del manipulador.

Ahora bien, cuando un manipulador debe controlar tanto la velocidad lineal como la velocidad angular del órgano terminal, se tiene que algunos renglones de la matriz jacobiana corresponden al cálculo de la velocidad lineal del órgano terminal, mientras que otros renglones están asociados a la velocidad angular de dicho eslabón. En consecuencia, el cálculo del determinante de la ecuación (2.12) con base en la matriz jacobiana completa implica una mezcla de dimensiones que impide evaluar eficazmente, la facilidad de efectuar los dos tipos de movimiento del órgano terminal: los traslacionales y los rotacionales. Considerando este efecto de la ecuación (2.12), T. Yoshikawa, en otro trabajo [10], propuso índices para cuantificar de manera independiente las manipulabilidades *traslacional* y *rotacional*. Bajo este enfoque, si se desea evaluar tales índices en un manipulador, éste debe satisfacer las siguientes condiciones:

- El manipulador es considerado como integrado por dos sub-cadenas cinemáticas: la primera asociada al brazo y la otra a la muñeca. El brazo contiene n_b articulaciones ($n_b \geq 3$) y la muñeca n_w articulaciones ($n_w \geq 3$).
- Todas las articulaciones de la muñeca son rotacionales, y sus ejes son concurrentes.

Adicionalmente, a cada eslabón del manipulador se le asigna un marco de referencia ortonormal. Los marcos y eslabones se numeran del 0 (en la base) al n (en el órgano terminal), y se verifica que $n \geq 6$. ($n = n_A + n_W$). El eslabón 0 se une al 1 mediante la articulación 1, y así sucesivamente. El vector unitario z_i del marco i ($i=1, \dots, n$) coincide con el eje de la articulación i si ésta es rotacional (tipo R), y es paralelo a ese eje si la articulación es prismática (tipo P). El vector x_i del mismo marco se encuentra sobre la perpendicular común a los ejes de las articulaciones i e $i-1$.

Para manipuladores que satisfacen las condiciones anteriores, la manipulabilidad traslacional (w_A) del brazo y la manipulabilidad rotacional (w_W) de la muñeca del manipulador, se definen, respectivamente, como:

$$w_A = \sqrt{\det(J_{TA} J_{TA}^T)} \quad (2.13)$$

$$w_W = \sqrt{\det(J_{RW} J_{RW}^T)} \quad (2.14)$$

donde:

$$J_{TA} = [J_{TA1} \ J_{TA2} \ \dots \ J_{TAn}] \quad (2.15)$$

$$J_{RW} = [z_{nA+1} \ z_{nA+2} \ \dots \ z_n] \quad (2.16)$$

con

$$J_{TAi} = \begin{cases} z_i \times p_{iw} & \text{si la articulación es tipo R} \\ z_i & \text{si la articulación es tipo P} \end{cases} \quad (2.17)$$

En la expresión (2.17), p_{iw} ($i=1, \dots, n_A$) es un vector con su origen en el punto O_i (el origen del marco i) y extremo final en O_w (el punto de concurrencia de los ejes de las articulaciones de la muñeca).

3. Modelado del robot y análisis preliminar del desempeño cinemático

En este capítulo se determinan las ecuaciones de los modelos cinemáticos de posición y de velocidad del robot Fanuc en estudio, obtenidos mediante el paquete SYMORO.

3.1 Modelado cinemático de posición

El modelado cinemático de posición (MDP) del manipulador Fanuc Arc Mate100iC se desarrolla en esta sección con el propósito de aplicarlo en la simulación de los movimientos del mismo, que permitirá verificar las tareas deseadas.

3.1.1 Descripción cinemática del robot Fanuc Arc Mate 100iC

En la figura 3.1 se observa el esquema cinemático del manipulador, así como los marcos de referencia asignados a sus eslabones aplicando la convención de Denavit-Hartenberg modificada (DHM) [21]. A partir de esos marcos se identifican los parámetros geométricos del manipulador, los cuales se muestran en la tabla 3.1. En la figura 3.2 se representa un esquema del robot en su estación de trabajo donde se aprecian algunos marcos de referencia auxiliares.

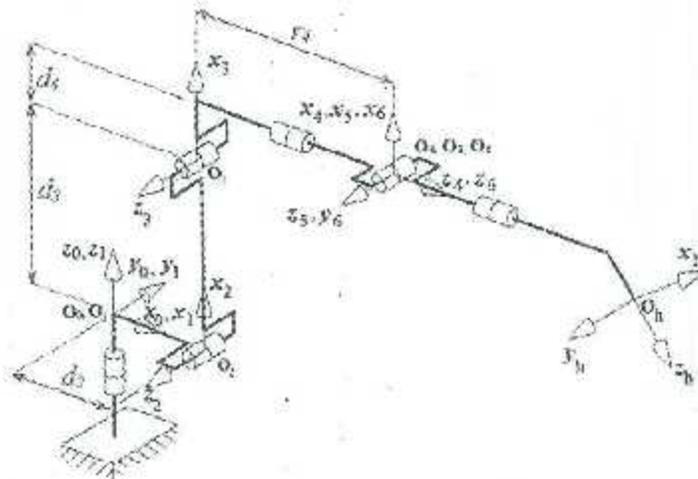


Figura 3.1 Esquema cinemático del robot Fanuc ARC Mate 100iC.

Tabla 3.1 Parámetros de Denavit-Hartenberg del robot Fanuc ARC Mate 100iC

Articulación	S	A	D	θ	B
1	0	0°	0	θ_1	0
2	0	90°	d_2	θ_2	0
3	0	0°	d_3	θ_3	0
4	0	90°	d_4	θ_4	r_4
5	0	-90°	0	θ_5	0
6	0	90°	0	θ_6	0

$d_2 = 150 \text{ mm}$, $d_3 = 600 \text{ mm}$, $d_4 = 200 \text{ mm}$, $r_4 = 640 \text{ mm}$

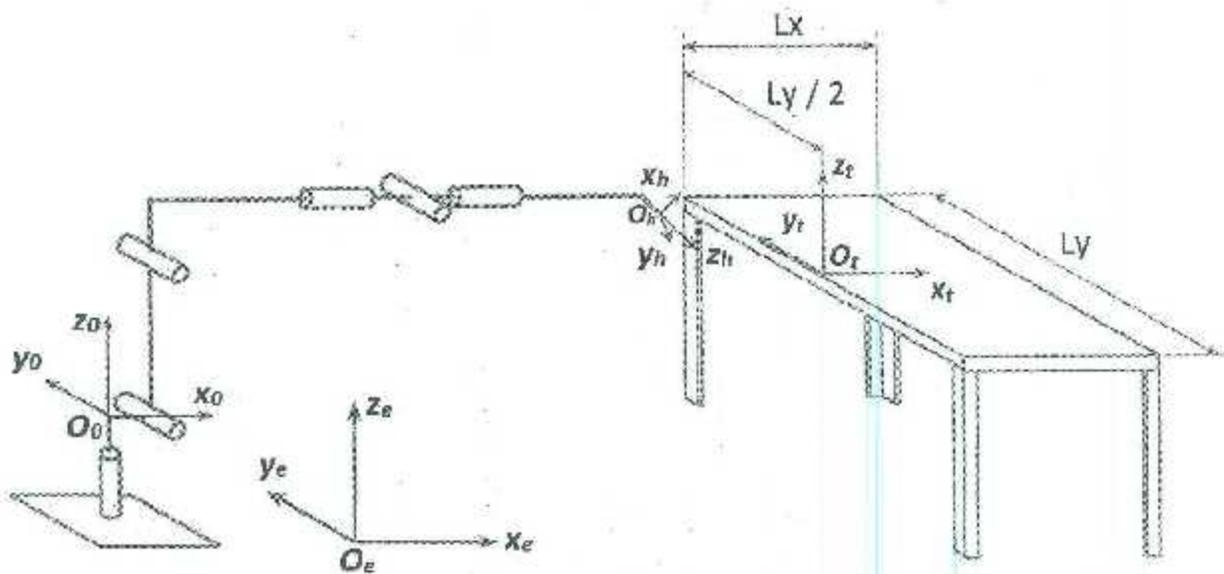


Figura 3.2 Esquema del robot en su estación de trabajo. Se aprecian los marcos Σ_e de la estación de trabajo, Σ_0 de la base del robot, Σ_t de la mesa de trabajo y Σ_h de la herramienta (antorcha) del robot.

El desempeño cinemático del robot se estudia considerando alternativamente dos antorchas de soldadura con geometrías distintas en el extremo del robot. A estas herramientas se les denominara antorcha I y antorcha II. La antorcha I tiene un ángulo de desviación de su boquilla de 22.5° , mientras que la antorcha II tiene un ángulo de desviación de 45° . En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran más detalles de las geometrías de ambas antorchas.

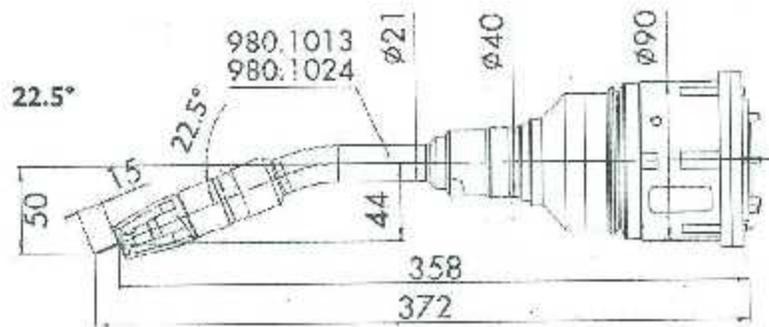


Figura 3.3 Geometría de la antorcha I. Ángulo de boquilla de 22.5° (Acot. en mm.).

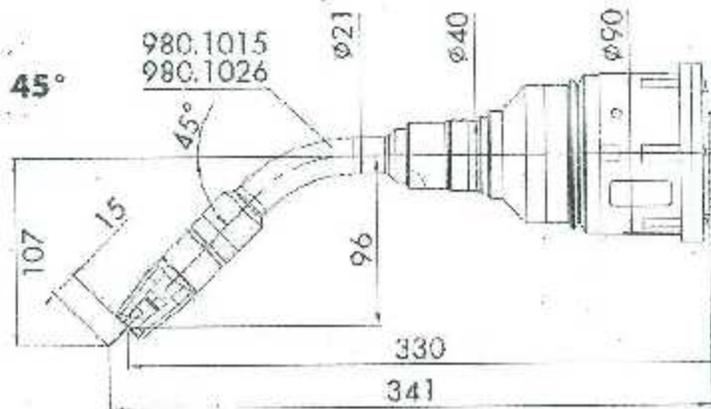


Figura 3.4 Geometría de la antorcha II. Ángulo de boquilla de 45° (Acot. en mm.).

3.1.2 Matrices elementales del manipulador

A partir de las matrices elementales del manipulador se resuelven los modelos directo e inverso de posición del robot. Este último permite calcular los valores de las variables articulares que determinan una pose (posición y orientación) deseada del órgano terminal.

Considerando los parámetros de la tabla 3.1 se obtienen las siguientes matrices elementales del manipulador:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & 0 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & d_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & -1 & -r_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_5 & -C\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.1.3 Modelado cinemático directo de posición

El modelado cinemático directo de posición de un manipulador es la relación que permite determinar el vector x de la pose del órgano terminal en función de una postura q :

$$x = f(q) \quad (3.1)$$

donde $f(q)$ es una función vectorial de la postura q del robot.

Para obtener el modelo cinemático directo de posición, al eslabón fijo de un robot se le asigna un marco de referencia Σ_0 , y al órgano terminal (eslabón n) se le asigna un marco Σ_n . Así, la matriz 0_nT define la pose del órgano terminal del robot con respecto al marco Σ_0 . Esta matriz se obtiene mediante:

$${}^0_nT = {}^0_1T {}^1_2T \dots {}^{n-2}_{n-1}T {}^{n-1}_nT \quad (3.2)$$

Obsérvese que, mientras la matriz del lado izquierdo de esta última expresión contiene implícitamente las coordenadas operacionales, el producto de las matrices del lado derecho

determina implícitamente las componentes de la función vectorial f de la ecuación (3.1). En consecuencia, el desarrollo de este producto equivale a la resolución del modelo cinemático directo de posición.

3.1.4 Modelo cinemático inverso de posición

El modelo cinemático inverso de posición de un robot es la función inversa $f^{-1}(x)$ que, si existe para un robot dado, permite obtener la postura q necesaria para ubicar a su órgano terminal en una pose deseada x , especificada mediante una matriz ${}^0_nT^*$. En este trabajo se utiliza el método de Paul [22] para la obtención de las ecuaciones del modelo inverso de posición del robot Fanuc. En este método, la matriz que especifica la pose deseada del órgano terminal con respecto al marco Σ_0 , unido a la base del robot se designa como U_0 , por lo que

$$U_0 \equiv {}^0_nT^*$$

A la matriz U_0 se le conoce como *matriz snap*, y a los elementos de ésta se les designa de la manera como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg modificados del manipulador Fanuc ARC Mate 100iC se obtiene las siguientes ecuaciones del modelo inverso de posición mediante el método de Paul, con ayuda del programa SYMORO (*SYmbolic MOdelling of ROBots*) [23]:

$$\theta_1 = \text{atan2}(e1 * p_y, e1 * p_x)$$

$$z1 = -d_2 + p_x * \cos(\theta_1) + p_y * \sin(\theta_1)$$

$$b1 = 2 * (-(d_4 * p_z) - r_4 * z1)$$

$$b2 = 2 * (p_z * r_4 - r_4 * z1)$$

$$b3 = d_3^2 - d_4^2 - p_z^2 - r_4^2 - z1^2$$

$$SQ = \frac{(b1 + b3 + b2 * \sqrt{b1^2 + b2^2 - b3^2} * e2)}{b1^2 + b2^2}$$

$$CQ = \frac{(b2 * b3 - b1 * \sqrt{b1^2 + b2^2 - b3^2} * e2)}{b1^2 + b2^2}$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(-\left(\frac{-p_x - r_4 * CQ + d_4 * SQ}{d_3}\right), \left(\frac{z1 - d_4 * CQ - r_4 * SQ}{d_3}\right)\right)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(SQ, CQ) - \theta_2$$

$$X = -(a_y * \cos \theta_1) + a_x * \sin \theta_1$$

$$Y = -(a_x * \cos \theta_1 * \cos(\theta_2 + \theta_3)) - a_y * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin \theta_1 - a_z * \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(-X, Y)$$

$$Y12 = -\left(\cos \theta_4 * (a_x * \cos \theta_1 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_y * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin \theta_1 + a_z * \sin(\theta_2 + \theta_3))\right) \\ - \left(- (a_y * \cos \theta_1) + a_x * \sin \theta_1\right) * \sin \theta_4$$

$$Y1 = a_z * \cos(\theta_2 + \theta_3) - a_x * \cos \theta_1 * \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_y * \sin \theta_1 * \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(-e5 * Y12, -e5 * Y1)$$

$$Y22 = -\left(\cos \theta_4 * \left(- (s_y * \cos \theta_1) + s_x * \sin \theta_1\right)\right) \\ + (s_x * \cos \theta_1 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + s_y * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin \theta_1 + s_z * \sin(\theta_2 + \theta_3)) \\ * \sin \theta_4$$

$$Y21 = -\left(\cos \theta_4 * \left(- (n_y * \cos \theta_1) + n_x * \sin \theta_1\right)\right) \\ + (n_x * \cos \theta_1 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + n_y * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin \theta_1 + n_z * \sin(\theta_2 + \theta_3)) \\ * \sin \theta_4$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-Y22, -Y21)$$

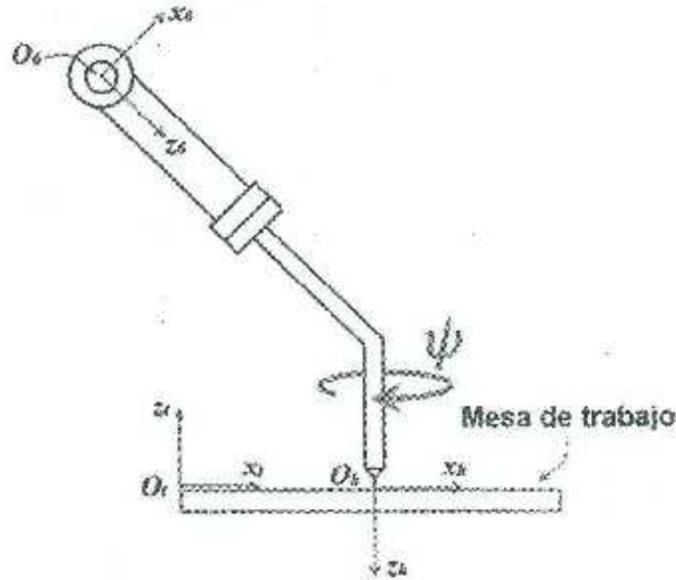


Figura 3.5 Marcos Σ_c y Σ_h asociados a la antorcha, e interpretación del ángulo ψ en la definición de la orientación de la antorcha.

3.2 Especificación de la matriz ${}^c_h T$

Se sabe que la matriz de rotación ${}^A_B R$ que describe la orientación de un marco ortonormal Σ_B con respecto a un marco ortonormal Σ_A mediante los ángulos de Euler φ , θ , ψ (correspondientes a rotaciones sucesivas en el orden Z-Y-Z) está dada por:

$${}^c_h R = \begin{bmatrix} C\theta_\varphi C\theta_\theta C\theta_\psi - S\theta_\varphi S\theta_\psi & -C\theta_\psi S\theta_\varphi - C\theta_\varphi C\theta_\theta S\theta_\psi & C\theta_\varphi S\theta_\theta \\ C\theta_\varphi S\theta_\psi + C\theta_\theta C\theta_\psi S\theta_\varphi & C\theta_\varphi C\theta_\psi - C\theta_\theta S\theta_\varphi S\theta_\psi & S\theta_\varphi S\theta_\theta \\ -C\theta_\psi S\theta_\theta & S\theta_\theta S\theta_\psi & C\theta_\theta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Esta matriz es la que se aplicará para describir la orientación de un marco ortonormal con respecto a otro en el desarrollo de este trabajo.

En la figura 3.5 se muestran en detalle las ubicaciones de los marcos ortonormales Σ_h (o marco "h", de la herramienta) y Σ_c , ambos asignados a la antorcha del robot, colocados en los extremos de ésta, como se aprecia en la figura 3.5. La pose del marco Σ_h con respecto al marco Σ_c depende de la geometría de la antorcha. Para las dos antorchas utilizadas en este

trabajo se tienen las siguientes matrices homogéneas ${}^6_h\mathbf{T}$ que definen la pose del marco Σ_h con respecto al marco Σ_6 :

Para la antorcha I los ángulos de Euler Z-Y-Z tienen los siguientes valores: $\varphi = \pi$, $\theta = -\frac{\pi}{8}$, $\psi = \pi$, y teniendo en cuenta la geometría de la antorcha, mostrada en la figura 3.3, se tiene que la matriz ${}^6_h\mathbf{T}$ es:

$${}^6_h\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.9239 & 0 & -0.3827 & -50 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.3827 & 0 & 0.9239 & 400 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para la antorcha II los ángulos de Euler Z-Y-Z tienen los siguientes valores: $\varphi = \pi$, $\theta = -\frac{\pi}{4}$, $\psi = \pi$, y considerando la geometría de la antorcha, que se aprecia en la figura 3.4, se tiene para este caso que ${}^6_h\mathbf{T}$ está dada por:

$${}^6_h\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.7071 & 0 & -0.7071 & -96 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.7071 & 0 & 0.7071 & 330 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 Especificación de la matriz *snap* de la antorcha

Como se mencionó en la sección 3.1.4, la matriz *snap* es la matriz que describe la pose deseada del marco Σ_6 de la antorcha del robot con respecto al marco Σ_0 de la base del robot, y debe especificarse para poder resolver el problema inverso de posición. Esta matriz se calculará mediante

$${}^0_n\mathbf{T}^* = {}^0_e\mathbf{T} {}^e_t\mathbf{T} {}^t_h\mathbf{T}^* {}^h_n\mathbf{T} \quad (3.4)$$

donde todas las matrices del lado derecho son conocidas. En efecto, ${}^0_e\mathbf{T}$ es la inversa de la matriz de emplazamiento de la base del robot con respecto a la estación de trabajo; ${}^e_t\mathbf{T}$ es la matriz de emplazamiento de la mesa de trabajo con respecto a la estación de trabajo; ${}^t_h\mathbf{T}^*$ es la matriz que especifica la pose deseada de la antorcha con respecto a la mesa de trabajo y ${}^h_n\mathbf{T}$ es la inversa de la matriz que describe la pose del marco Σ_h con respecto al marco Σ_6 .

La matriz de emplazamiento del manipulador se especifica mediante la matriz 3.5:

$${}^e_0T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e_x \\ 0 & 1 & 0 & e_y \\ 0 & 0 & 1 & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

donde $e_x = -200 \text{ mm}$, $e_y = 500 \text{ mm}$ y $e_z = 0 \text{ mm}$

La matriz e_0T en esta tesis se considera igual a la matriz identidad de orden 4, I_4 . Así, la pose deseada de la antorcha se especifica directamente con respecto al marco Σ_e de la estación de trabajo mediante la matriz ${}^e_hT^*$, que se definirá más adelante. Por otra parte, la matriz e_hT quedó definida en la sección 3.2.

El cálculo simbólico de la matriz ${}^0_nT^*$ no es indispensable para propósitos de la simulación del robot y la visualización de sus movimientos. Sólo se requiere su cálculo numérico, el cual se realiza en el programa de simulación desarrollado en Matlab.

3.4 Modelado cinemático de velocidad

Derivando la expresión del MDP con respecto al tiempo se obtiene el modelo cinemático directo de velocidad del robot:

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (3.6)$$

donde \dot{x} es el vector del estado de velocidad del órgano terminal del robot ($\dot{x} \in \mathbb{R}^m$, con $m = 6$ en el caso del robot Fanuc):

$$\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_m]^T \quad (3.7)$$

y \dot{q} es el vector de velocidades articulares del robot ($\dot{q} \in \mathbb{R}^n$, con $n = 6$ en el caso del robot Fanuc):

$$\dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T \quad (3.8)$$

J es la matriz jacobiana del robot, cuyos elementos J_{ij} se calculan mediante:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (3.9)$$

Mediante el programa SYMORO se obtienen las siguientes ecuaciones de los elementos de la matriz Jacobiana:

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= -(d_2 * \sin(\theta_1)) - d_3 * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) - d_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) - r_4 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3); \\
 J_{21} &= d_2 * \cos(\theta_1) + d_3 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) + d_4 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2 + \theta_3) + r_4 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3); \\
 J_{31} &= 0 \\
 J_{41} &= 0 \\
 J_{51} &= 0 \\
 J_{61} &= 1 \\
 J_{12} &= r_4 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2 + \theta_3) - d_3 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) - d_4 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{22} &= r_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) - d_3 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) - d_4 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{32} &= d_3 * \cos(\theta_2) + d_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + r_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{42} &= \sin(\theta_1) \\
 J_{52} &= -\cos(\theta_1) \\
 J_{62} &= 0 \\
 J_{13} &= r_4 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2 + \theta_3) - d_4 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{23} &= r_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) - d_4 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{33} &= d_4 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + r_4 * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{43} &= \sin(\theta_1) \\
 J_{53} &= -\cos(\theta_1) \\
 J_{63} &= 0 \\
 J_{14} &= 0 \\
 J_{24} &= 0 \\
 J_{34} &= 0 \\
 J_{44} &= \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{54} &= \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{64} &= -\cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 J_{15} &= 0 \\
 J_{25} &= 0 \\
 J_{35} &= 0 \\
 J_{45} &= \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_4) \\
 J_{55} &= -(\cos(\theta_1) * \cos(\theta_4)) - \cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\
 J_{65} &= -(\sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_4)) \\
 J_{76} &= 0 \\
 J_{86} &= 0 \\
 J_{96} &= 0 \\
 J_{46} &= \cos(\theta_1) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) + \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\
 &\quad * \sin(\theta_5) \\
 J_{56} &= \cos(\theta_5) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_5) - \cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) \\
 &\quad * \sin(\theta_5) \\
 J_{66} &= -(\cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_5)) + \cos(\theta_4) * \sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_5)
 \end{aligned}$$

Estos elementos de la matriz jacobiana, quedan ordenados de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.5 Análisis preliminar del desempeño cinemático del robot

Antes de desarrollar el estudio de diferentes alternativas para la ejecución de movimientos del robot en la realización de sus tareas, se propone un análisis preliminar con el propósito de apreciar la importancia del aprovechamiento del carácter redundante del manipulador bajo ciertas condiciones de la tarea. Este análisis se basa en la ejecución de una reconfiguración interna para una posición fija del extremo O_h de la antorcha que permita determinar las posturas del robot que produzcan su mejor desempeño cinemático, entre aquellas que ubiquen al extremo de la antorcha en la misma posición con diferentes valores de ψ en la matriz ${}^eT_h^*$ (ecuación 3.11). El desempeño cinemático del robot se mide aplicando los índices de manipulabilidad traslacional y rotacional.

Teniendo en cuenta la orientación deseada de la herramienta, y debido a la simetría de la punta de la antorcha con respecto al eje del alambre de aporte, es posible efectuar la reconfiguración interna del manipulador de una manera muy simple, sin necesidad de recurrir al cálculo de la solución homogénea del modelo inverso de velocidad del robot. La pose deseada de la antorcha es tal que el eje Z_h del marco Σ_h queda en posición vertical, apuntando hacia abajo, y el punto O_h se ubica en la posición requerida, como se observa en la figura 3.5. De esta manera el alambre del material de aporte podrá llegar al punto deseado para que se realice el proceso de soldadura, sin importar la orientación de los ejes x_h y y_h . Así, la posición de O_h y la orientación de Z_h son las únicas condiciones que se requiere satisfacer para ubicar el extremo de la antorcha en la pose deseada. Las orientaciones de los ejes x_h y y_h son irrelevantes.

Se observa que la orientación deseada se obtiene, con respecto al marco Σ_e unido a la estación de trabajo, con los ángulos de Euler $\varphi = 180^\circ$ y $\theta = 180^\circ$, mientras que ψ puede tomar un número infinito de valores. Teniendo en cuenta los valores mencionados de φ y θ , se tiene que la matriz homogénea ${}^e_h T$ que especifica la pose deseada de la antorcha se expresa de la siguiente manera con respecto al marco Σ_e de la estación de trabajo:

$${}^e_h T = \begin{bmatrix} C\psi & S\psi & 0 & p_{hx} \\ -S\psi & -C\psi & 0 & p_{hy} \\ 0 & 0 & -1 & p_{hz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

El ángulo ψ de esta matriz puede tomar valores arbitrarios. Nótese que la tercera y cuarta columnas no dependen de ese ángulo. La tercera columna, que corresponde a la orientación deseada de \mathbf{z}_h , es definida únicamente por $\varphi = 180^\circ$ y $\theta = 180^\circ$, mientras que la cuarta columna está determinada por la posición de O_h . En la figura 3.5 se observa que este ángulo puede tomar cualquier valor manteniendo al punto O_h en la misma posición y conservando fija la orientación del vector \mathbf{z}_h . Para la reconfiguración interna aquí considerada, se hará un barrido de valores de ψ desde un límite inferior ψ_{min} hasta un límite superior ψ_{max} , y para cada ψ se obtendrá la correspondiente postura del robot. En particular se propone $\psi_{min} = -120^\circ$ y $\psi_{max} = 120^\circ$. En cuanto a la posición deseada de O_h (cuarta columna de la matriz de la ecuación 3.11), con respecto al marco Σ_e se especifican $p_{hx} = 1000 \text{ mm}$, $p_{hy} = 0 \text{ mm}$, $p_{hz} = 50\theta \text{ mm}$.

Se efectúan simulaciones para el barrido propuesto de ψ con las dos antorchas consideradas. Las simulaciones de la reconfiguración del manipulador permiten observar las sucesivas posturas que determinan la ubicación deseada de la antorcha. Para las antorchas I y II, en las figuras 3.6 y 3.8 respectivamente se muestra gráficamente el resultado de las simulaciones, mientras que en las figuras 3.7 y 3.9 se aprecia el comportamiento de las manipulabilidades traslacional y rotacional durante las reconfiguraciones. En el caso de la manipulabilidad traslacional, ésta se normaliza dividiendo su valor entre la máxima manipulabilidad traslacional que puede alcanzar el robot considerado, de tal manera que la manipulabilidad traslacional normalizada w_A^* queda acotada de la siguiente manera:

$$0 < w_A^* < 1$$

La manipulabilidad rotacional (w_w) no requiere de una normalización toda vez que ésta oscila entre 0 y 1. En ambas manipulabilidades, el valor de 0 significa que el robot está en una postura singular, mientras que el valor de 1 corresponde a posturas óptimas. Con $w_A^* = 1$ y $w_w = 1$ la eficacia de la transformación de las velocidades articulares en velocidad de la antorcha es máxima, lo cual implica un mejor aprovechamiento del movimiento de los actuadores. Si $w_A^* = 1$, entonces la conversión de velocidades articulares en velocidad lineal de la antorcha será óptima. Si $w_w = 1$, entonces la conversión de velocidades articulares en velocidad angular de esa herramienta se optimiza. En la figura 3.6 la antorcha se representa de color rojo.

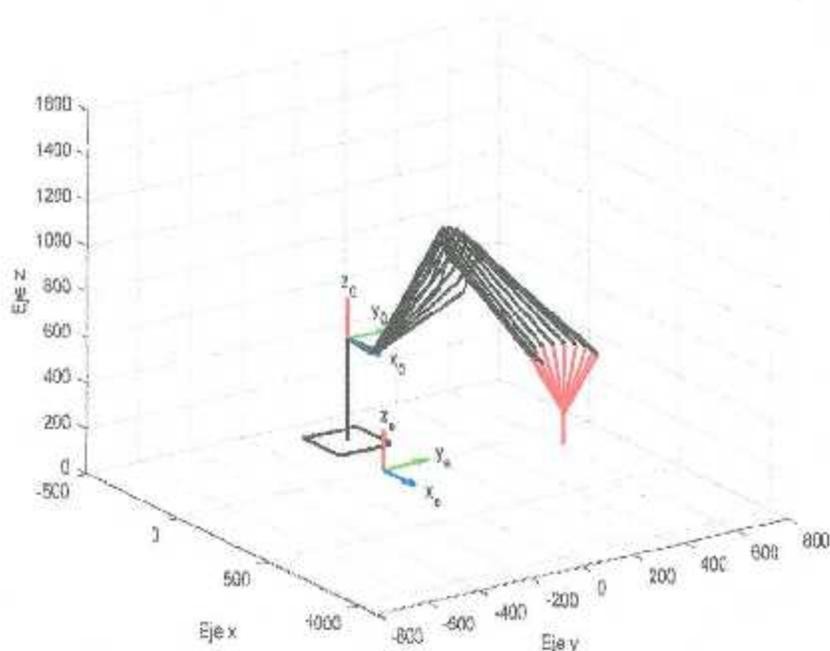


Figura 3.6 Secuencia de posturas en diagrama de alambre del manipulador durante una reconfiguración interna con la antorcha I.

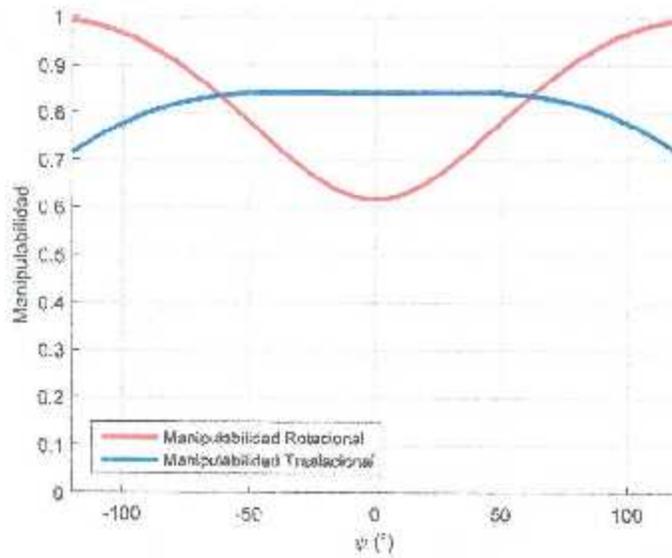


Figura 3.7 Evolución de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional durante la reconfiguración con la antorcha I.

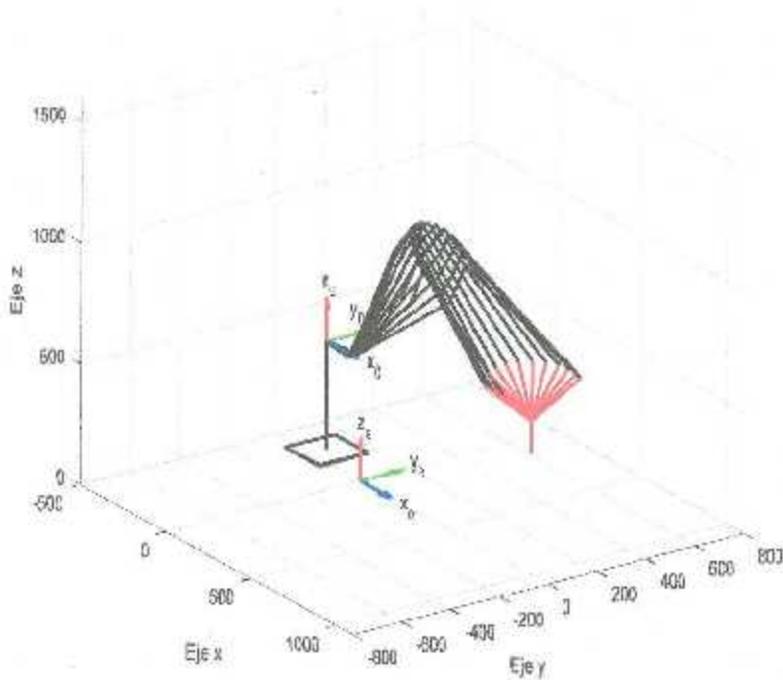


Figura 3.8 Secuencia de posturas en diagrama de alambre del manipulador durante una reconfiguración interna con la antorcha II.

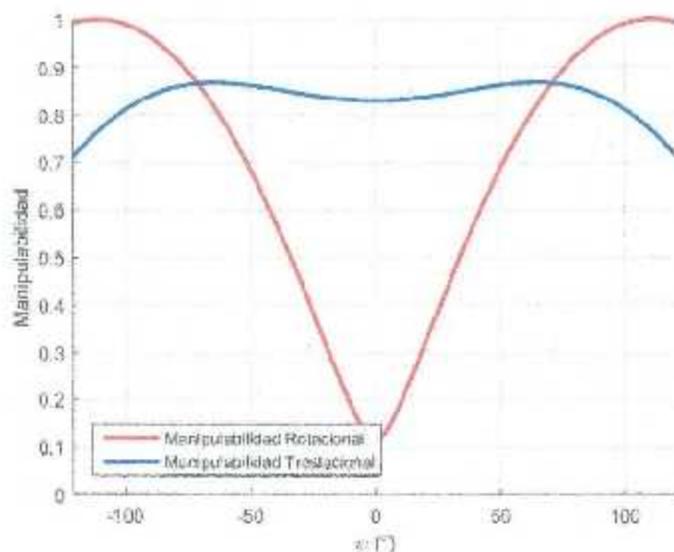


Figura 3.9 Evolución de las manipulabilidades translacional normalizada y rotacional durante la reconfiguración con la antorcha II.

En los dos barridos efectuados se observa que el desempeño cinemático del manipulador puede variar en forma significativa con la orientación de la antorcha definida por el valor de ψ . En particular se aprecia una reducción drástica de la manipulabilidad rotacional con la antorcha II (ver figura 3.9). Estos resultados demuestran la importancia de una adecuada especificación de ψ durante la ejecución de tareas que permitan variar dicho ángulo. En el siguiente capítulo se estudiarán diferentes casos de ejecución de tareas con diversas rutas a seguir con el extremo de la antorcha, y se definirá una estrategia para el control del ángulo ψ que permita mejorar el desempeño del robot tanto como sea posible.

4. Casos de Estudio

En el presente capítulo se aborda el estudio del desempeño del robot manipulador Fanuc Arc Mate 100iC durante la ejecución de diferentes rutas propuestas, en las cuales se usarán la solución de mínima norma y la solución homogénea del modelo inverso de velocidad para obtener las posturas del robot. De manera previa, para propósitos comparativos, se abordarán los casos en los cuales las posturas del manipulador son seleccionadas intuitivamente por el operador, y cuando se aplica solamente la solución de mínima norma.

Se considerarán varias geometrías de rutas con las dos antorchas descritas en el capítulo precedente y se determinará el comportamiento de las manipulabilidades traslacional y rotacional del robot en los diferentes casos. Las rutas propuestas son una línea recta, una circunferencia, una curva sinusoidal y una lemniscata de dos hojas.

Cada caso será estudiado mediante un proceso de simulación en el paquete Matlab®, aplicando los modelos cinemáticos inverso y directo de posición del robot, y analizando el comportamiento de las manipulabilidades. Es necesario advertir que en todos los casos el emplazamiento relativo robot / tarea fue establecido de manera intuitiva, por lo que en ningún caso se privilegió o se penalizó el desempeño del robot mediante un emplazamiento robot/tarea previamente calculado. En los primeros tres casos de cada ruta el robot utiliza la antorcha I, mientras que en los siguientes tres casos se aplica la antorcha II.

4.1 Caso 1. Antorcha I, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con

$$\psi = 0^\circ$$

En este caso se establece de manera intuitiva la orientación que deberá usar la antorcha durante toda la tarea, con lo cual se considera al robot como no redundante y se aplica el modelo cinemático inverso de posición determinado en el capítulo precedente.

La tarea consiste en seguir una ruta rectilínea de 0.3 m de longitud en 15 segundos, a velocidad constante a lo largo de una recta paralela al eje x_e . Las coordenadas del punto inicial son $p_{hx} = 900$ mm, $p_{hy} = 0$ mm y $p_{hz} = 500$ mm. Los ángulos de Euler que definen la

orientación de la antorcha son $\varphi=180^\circ$, $\theta=180^\circ$ y $\psi=0^\circ$, los cuales se mantienen constantes durante la ejecución de la tarea. En las figuras 4.1 a 4.3 se muestran gráficamente los resultados de la simulación realizada en Matlab.

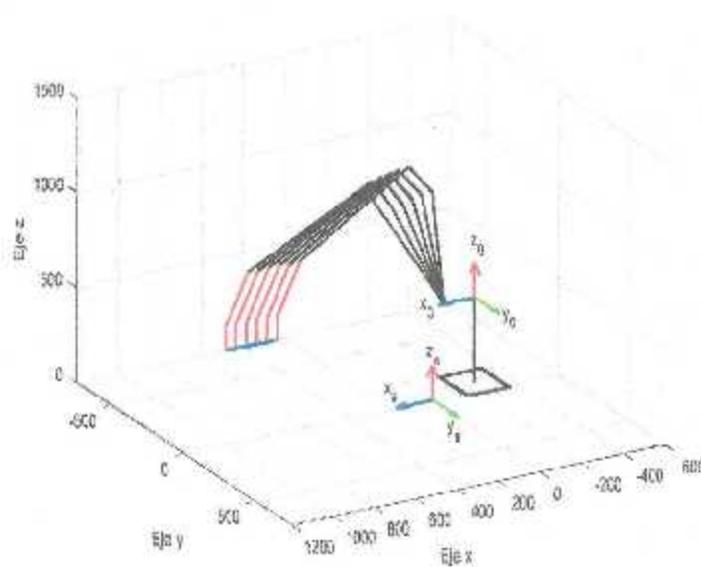


Figura 4.1 Caso 1. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.

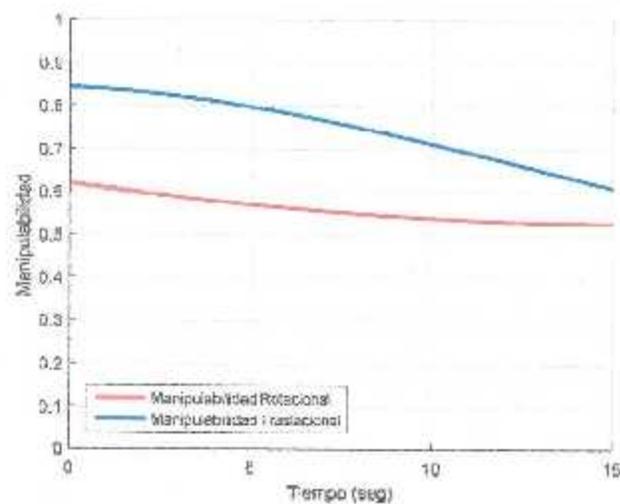


Figura 4.2 Caso 1. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.

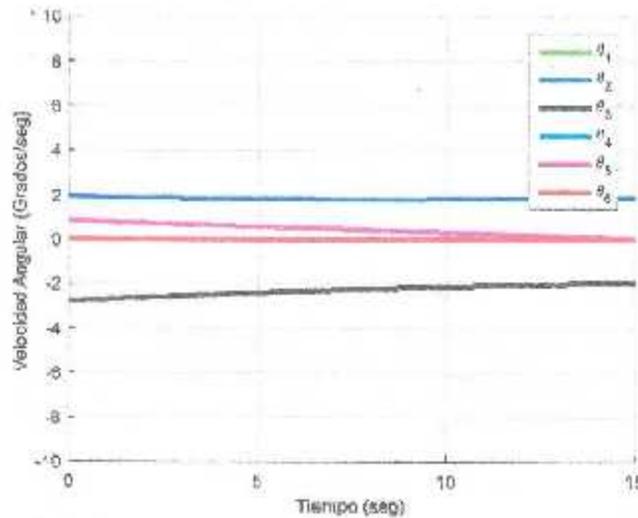


Figura 4.3 Caso 1. Velocidades articulares requeridas para la ejecución de la tarea.

En la figura 4.2 se observa que la manipulabilidad traslacional inicia con magnitudes aceptables, mientras que la manipulabilidad rotacional toma valores moderados. En la medida en que el manipulador avanza, ambos índices se van deteriorando por lo que la orientación seleccionada de la antorcha no favorece el buen desempeño cinemático del robot.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se busca establecer una orientación de la antorcha que favorezca el desempeño del robot. Para este propósito se considera el análisis de las posturas del robot efectuado en el capítulo precedente que da como resultado un compromiso aceptable entre las manipulabilidades traslacional y rotacional con $\psi = -90^\circ$ para una pose específica de la antorcha.

4.2 Caso 2. Antorcha I, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

En el caso 2 se aplica una pose mejorada de la antorcha, obtenida con base en la simulación del análisis preliminar desarrollado en el capítulo 3. Así se selecciona la orientación definida con $\psi = -90^\circ$, que se mantiene constante durante toda la ruta. En las

figuras 4.4 a 4.6 se muestran gráficamente los resultados de la simulación realizada en Matlab.

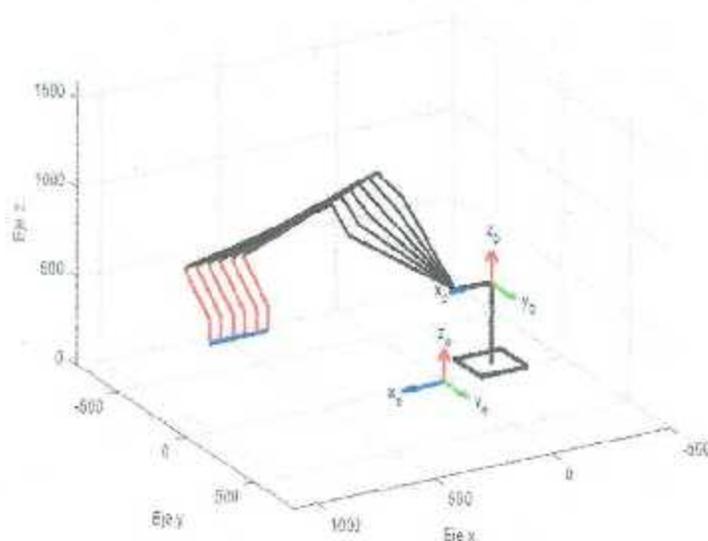


Figura 4.4 Caso 2. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.

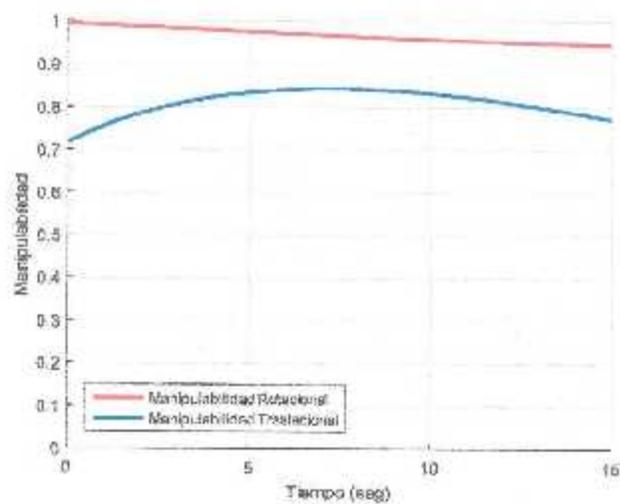


Figura 4.5 Caso 2. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.

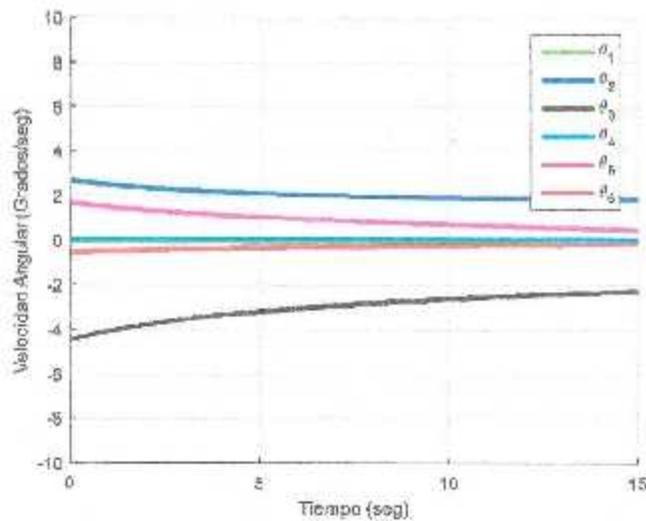


Figura 4.6 Caso 2. Velocidades articulares requeridas para la ejecución de la tarea.

Como se puede observar, las manipulabilidades obtenidas del manipulador en el caso 2 son mejores en comparación con las del caso 1, lo que implica un mejor desempeño cinemático. Aunque las manipulabilidades se deterioran conforme se desplaza la antorcha, al igual que en el caso 1, es evidente que lo hacen en menor proporción. Aun así, con el fin de evitar este deterioro se explorará el comportamiento de la manipulabilidad al considerar al robot como redundante.

4.3 Caso 3. Antorcha 1, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

En este caso el ángulo ψ se deja libre, con lo que se considera al robot como redundante, pues sólo se especifican 5 coordenadas operacionales, mientras que el robot posee 6 variables articulares. Así, el ángulo ψ se irá ajustando de manera continua en cada punto de la ruta de manera que el robot adopte posturas óptimas durante la ejecución de la tarea. El criterio de optimización consiste en maximizar la menor de las dos manipulabilidades (la traslacional y la rotacional) en cada punto de la ruta de la antorcha. La

estrategia que se propone en este trabajo consiste en determinar el valor óptimo de ψ y obtener la postura del robot utilizando el modelo inverso de posición del robot como si fuera instantáneamente no redundante. Este procedimiento equivale a la aplicación simultánea de las soluciones de mínima norma y homogénea del modelo inverso de velocidad en cada punto. Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.7 a 4.10.

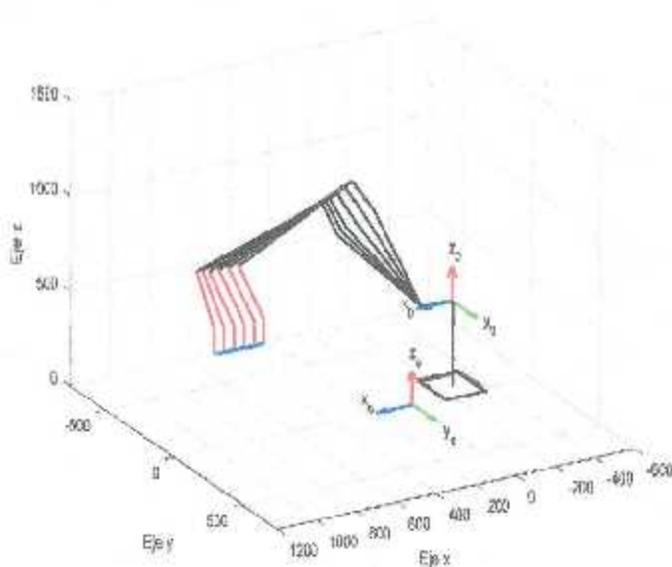


Figura 4.7 Caso 3. Secuencia de posturas del manipulador durante la ejecución de la tarea.

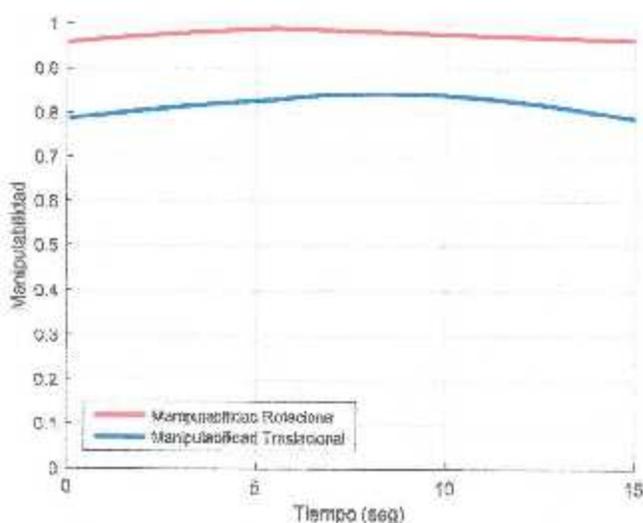


Figura 4.8 Caso 3. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

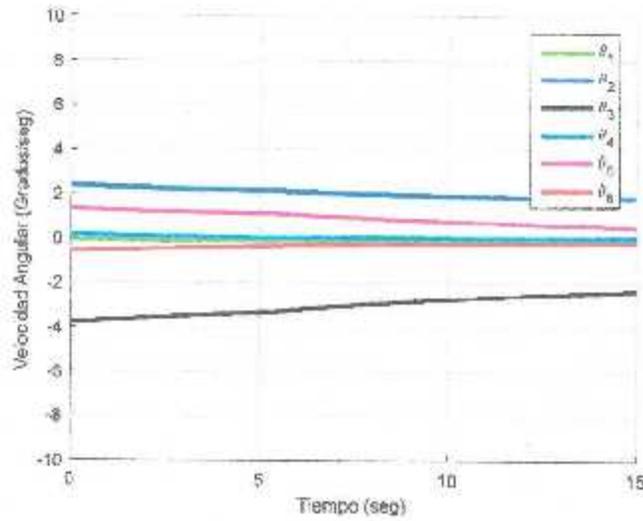


Figura 4.9 Caso 3. Comportamiento de las velocidades articulares.

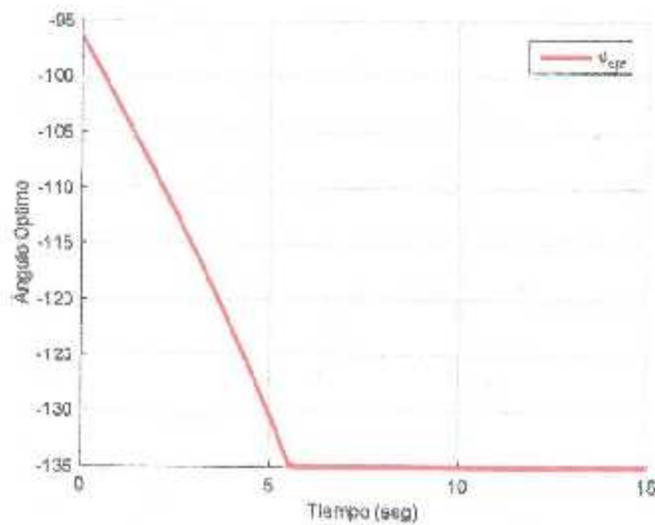


Figura 4.10 Caso 3. Historia del ángulo ψ .

Al analizar las manipulabilidades del caso 3 se puede observar que el deterioro se ha reducido de forma significativa y que incluso las manipulabilidades suben hasta que llegan al límite impuesto para ψ en el programa, el límite impuesto para este ángulo fue de -135° a fin de evitar atoramientos en el suministro del micro alambre. Aún con esta consideración ambas manipulabilidades se mejoraron en comparación a las obtenidas en los casos 1 y 2.

4.4 Caso 4. Antorcha II, ruta rectilnea, orientaci3n de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

Se considera la antorcha II (3ngulo de 45°), con lo que se cambian las dimensiones de la antorcha, y se obtienen resultados muy diferentes al caso 1, como se muestra en las siguientes figuras.

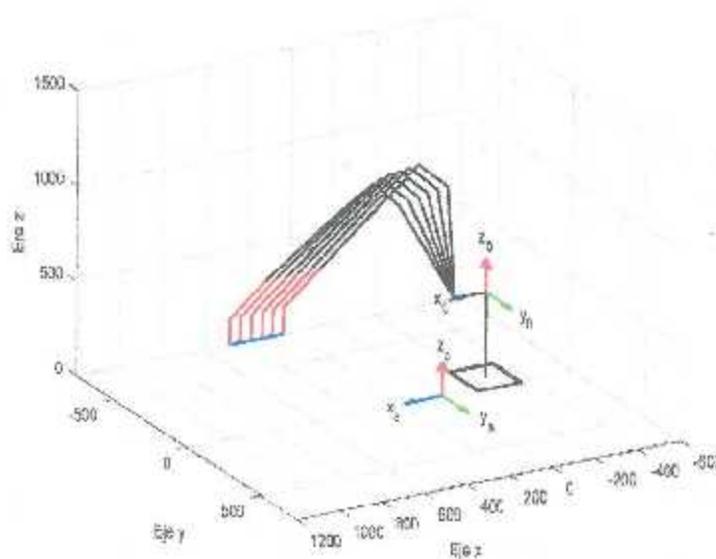


Figura 4.11 Caso 4. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulaci3n de la tarea.

En la figura 4.11 se aprecia que las posturas del manipulador cambian de manera considerable, lo que hace que el comportamiento de las manipulabilidades se altere dr3sticamente con comparaci3n con el desempe1o observado en el caso 1, sobre todo en lo que se refiere a la manipulabilidad rotacional.

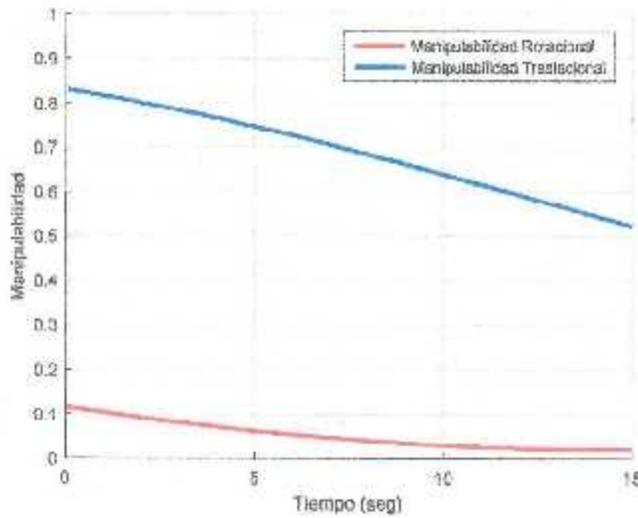


Figura 4.12 Caso 4. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

Como se ve en la figura anterior, las manipulabilidades que se obtuvieron para este caso son pobres. En particular la manipulabilidad rotacional alcanza valores menores a 0.1, además de que la manipulabilidad traslacional decae notablemente conforme avanza la tarea.

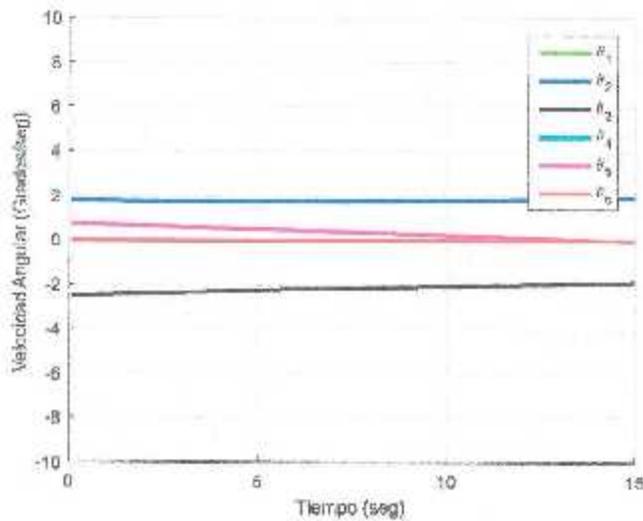


Figura 4.13 Caso 4. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.5 Caso 5. Antorcha II, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

Para este caso se asigna una pose mejorada de la antorcha, que se obtuvo con base en el análisis efectuado en el capítulo 3. Los resultados se muestran a continuación.

Como se aprecia en la figura 4.15, las manipulabilidades mejoran significativamente en este caso, al punto de que casi no hay margen para mejorar ya que ambas manipulabilidades se encuentran arriba de 0.80 en casi todo momento. No obstante, conforme avanza el manipulador se registra una ligera caída de la manipulabilidad rotacional mientras que en la manipulabilidad traslacional al principio de la tarea se mejora, pero después disminuye nuevamente, pasados 10 segundos del comienzo de la tarea. Se intentará reducir esta oscilación mediante cambios apropiados de ψ en el caso 6.

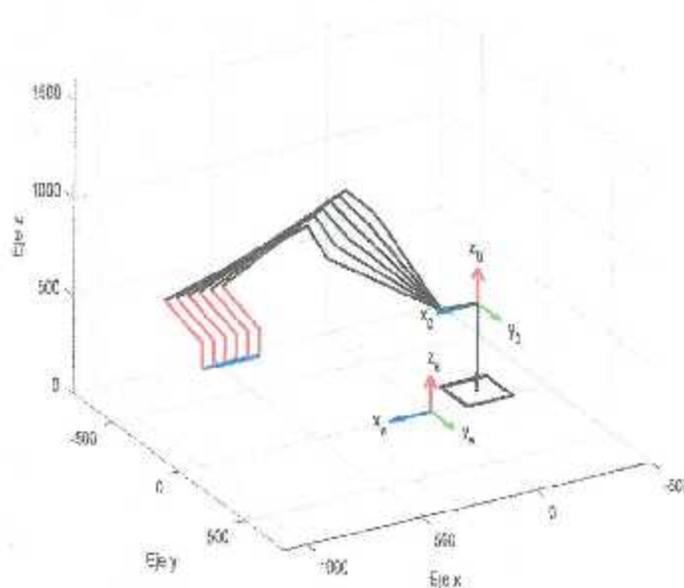


Figura 4.14 Caso 5. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

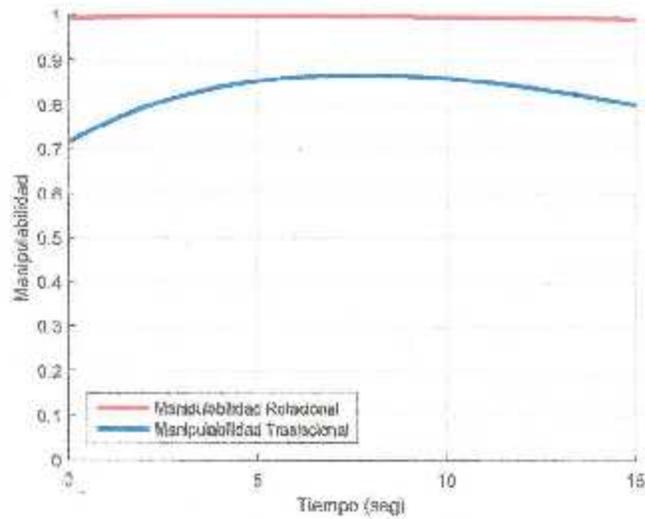


Figura 4.15 Caso 5. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

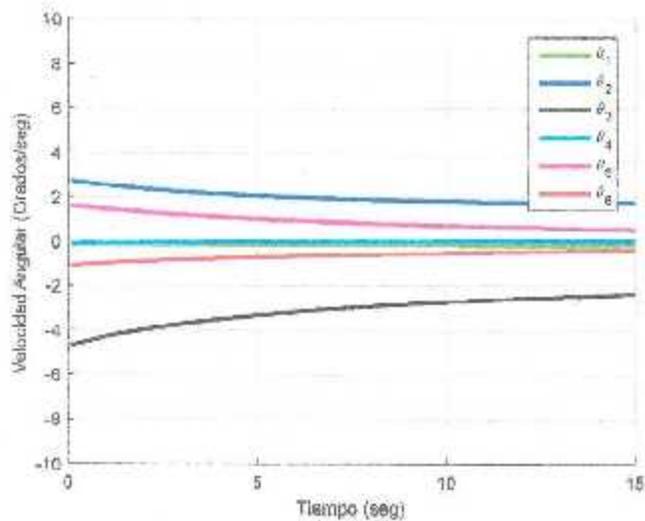


Figura 4.16 Caso 5. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.6 Caso 6. Antorcha II, ruta rectilínea, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

El ángulo ψ se deja libre, considerando al robot como redundante. Este ángulo se ajusta de manera continua en cada punto de la ruta de manera que el robot adopte posturas óptimas durante la ejecución de la tarea. Se determina el valor de ψ que maximiza las

manipulabilidades traslacional y rotacional, para después calcular la postura utilizando el modelo inverso de posición del robot como si éste fuera instantáneamente no redundante. Este procedimiento equivale a la aplicación de las soluciones de mínima norma y homogénea del modelo inverso de velocidad en cada punto. Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.17 a 4.20.

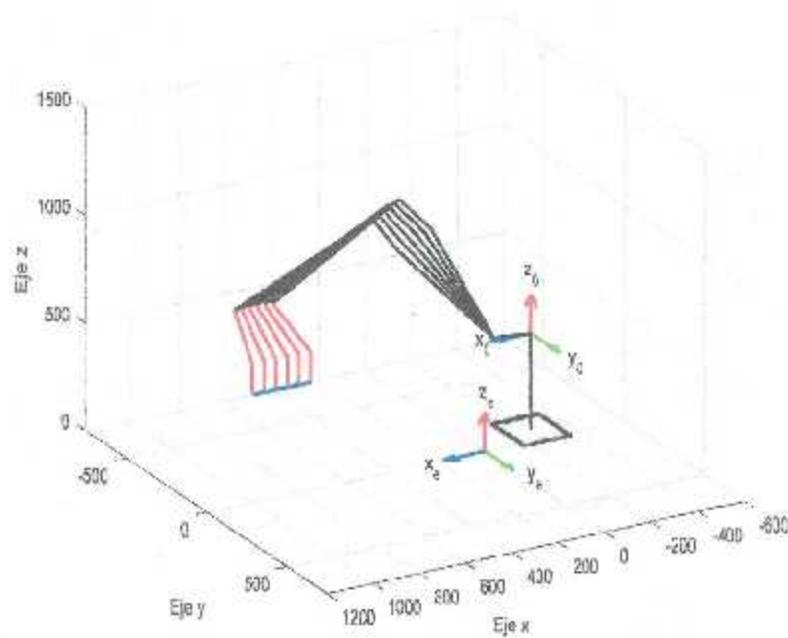


Figura 4.17 Caso 6. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarca.

En la figura 4.18 se puede observar el aumento de las dos manipulabilidades en comparación con el caso 5, aun cuando la manipulabilidad rotacional se ve reducida un poco, esto es debido a que en ciertos puntos es necesario reducir una manipulabilidad para hacer crecer la otra.

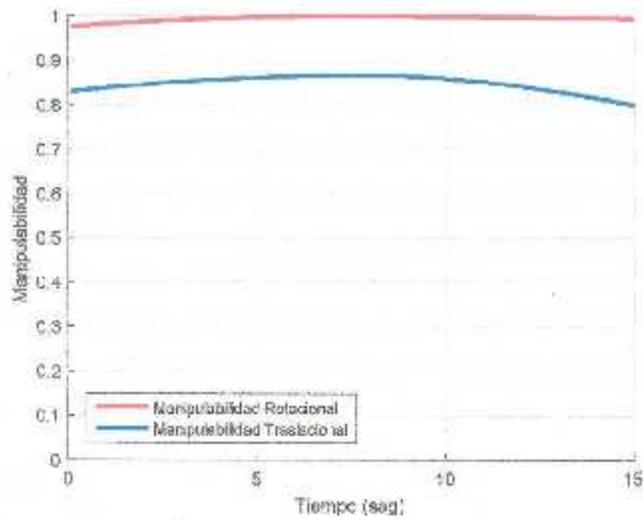


Figura 4.18 Caso 6. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

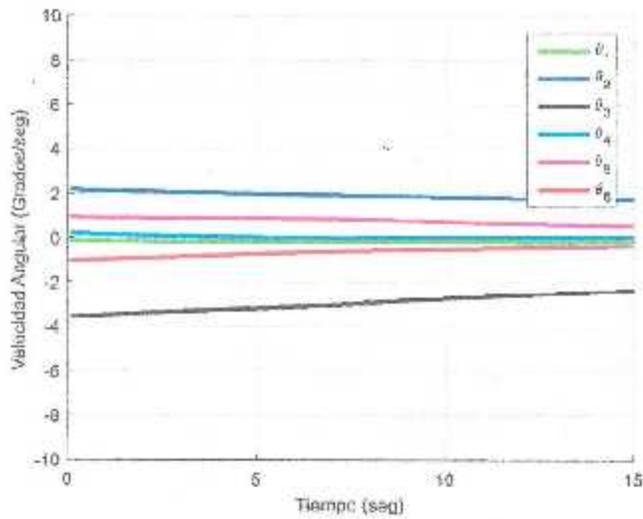


Figura 4.19 Caso 6. Comportamiento de las velocidades articulares.

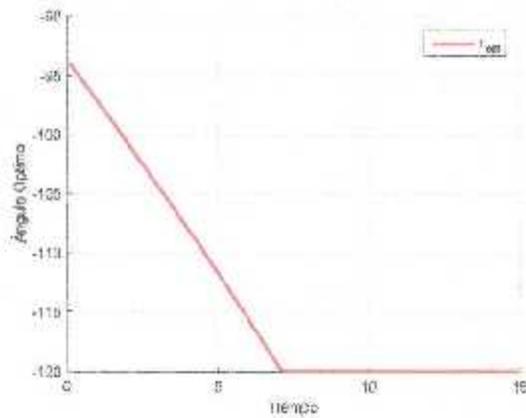


Figura 4.20 Caso 6. Historia del ángulo ψ .

4.7 Caso 7. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

En los casos 7 a 12 se considera una ruta circular con un radio de 100 mm en el plano xy cuyo centro tiene coordenadas $x=1000$ mm $y=0$ mm y $z=500$ mm, con respecto al marco de la estación de trabajo. Los resultados del caso 7 se presentan en las figuras 4.21 a 4.23.

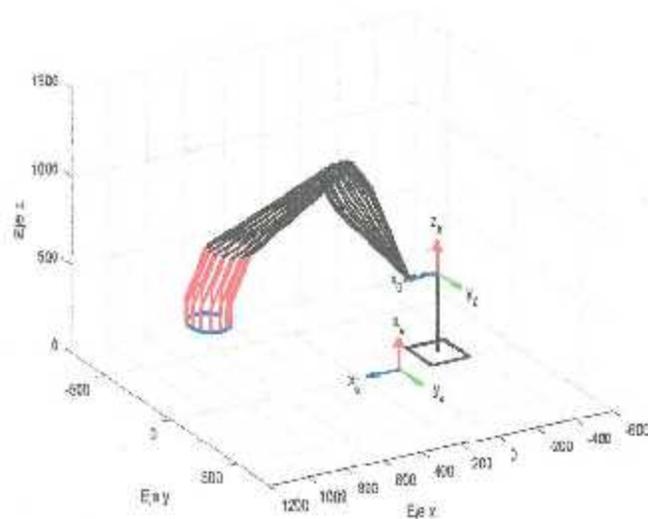


Figura 4.21 Caso 7, Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

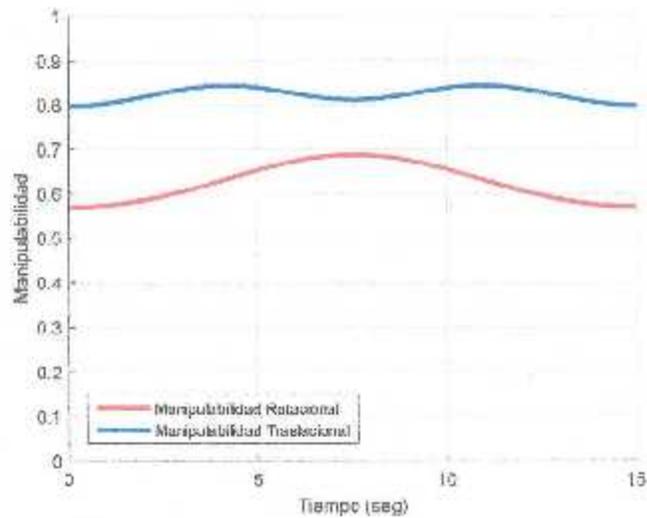


Figura 4.22 Caso 7. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

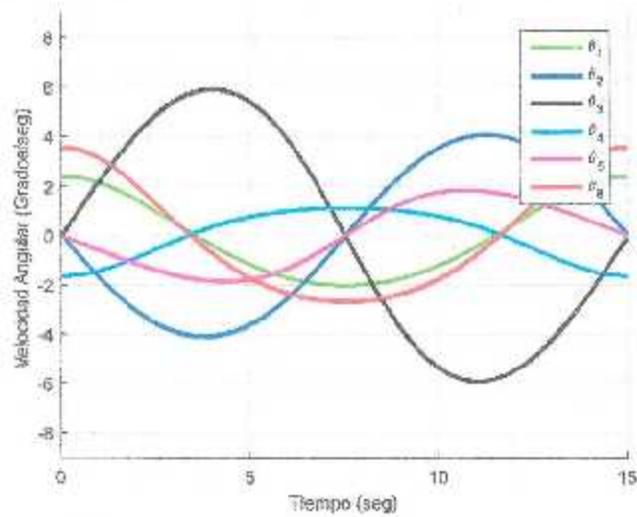


Figura 4.23 Caso 7. Comportamiento de las velocidades articulares.

En la figura 4.22 se puede observar que las manipulabilidades tienen valores mejores en comparación con los casos anteriores con orientaciones intuitivas de la antorcha, y no sufre un gran deterioro, todo esto es debido a la forma de la ruta a seguir, ya que los puntos

de ésta no permiten que la antorcha se aleje demasiado del centro, donde las manipulabilidades tienen valores aceptables.

4.8 Caso 8. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

Las posturas en la simulación se representan en la figura 4.24. Al utilizar esta orientación podemos observar en la figura 4.25 que la manipulabilidad rotacional ha mejorado sustancialmente en comparación con el caso anterior. Sin embargo, a cambio de esta mejora, la manipulabilidad traslacional disminuye un poco.

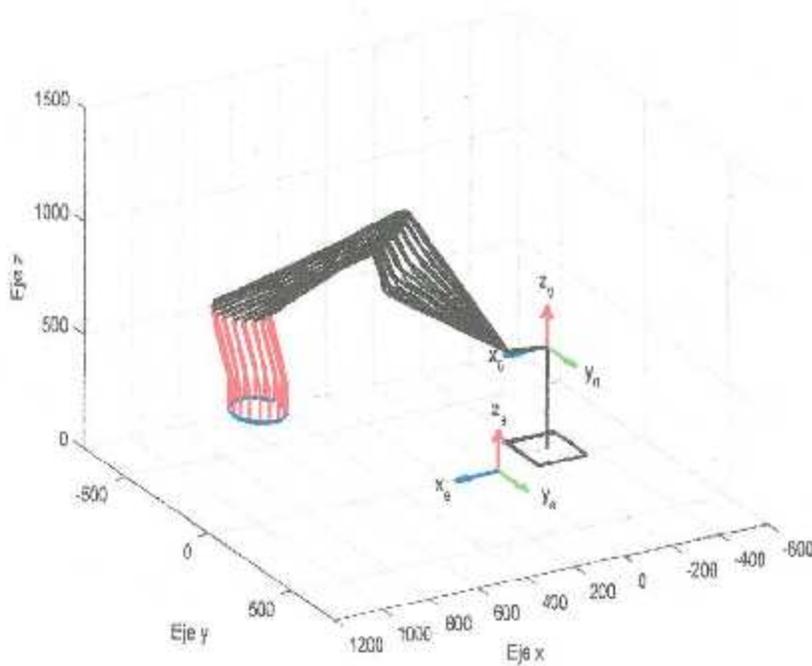


Figura 4.24 Caso 8. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

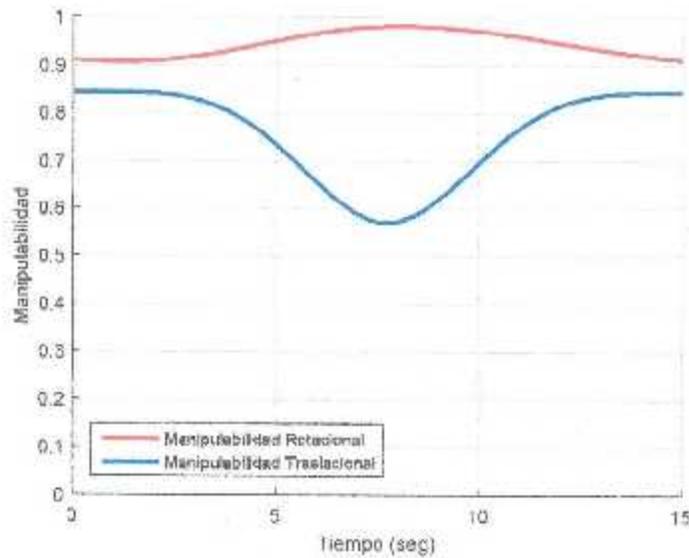


Figura 4.25 Caso 8. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

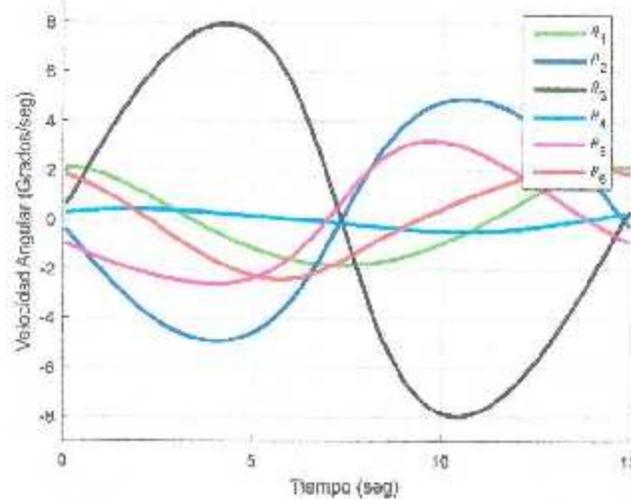


Figura 4.26 Caso 8. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.9 Caso 9. Antorcha I, ruta circular, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

El ángulo ψ se deja libre nuevamente, considerando al robot como redundante. Este ángulo se ajusta de manera continua en cada punto de la ruta de manera que el robot adopte

posturas óptimas durante la ejecución de la tarea. Se determina el valor de ψ que maximiza las manipulabilidades traslacional y rotacional, para después calcular la postura utilizando el modelo inverso de posición del robot como si éste fuera instantáneamente no redundante. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -140° debido al tipo de trayectoria que se está trabajando. Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.27 a 4.30.

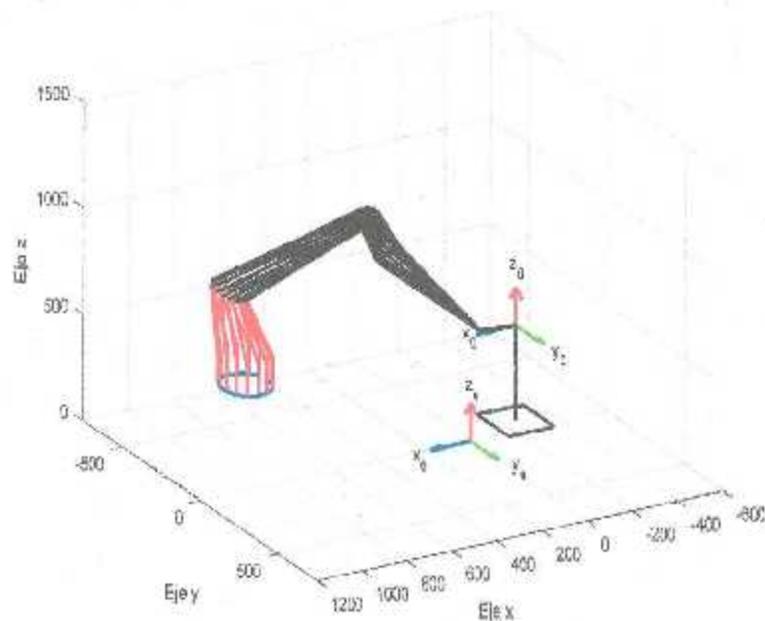


Figura 4.27 Caso 9. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

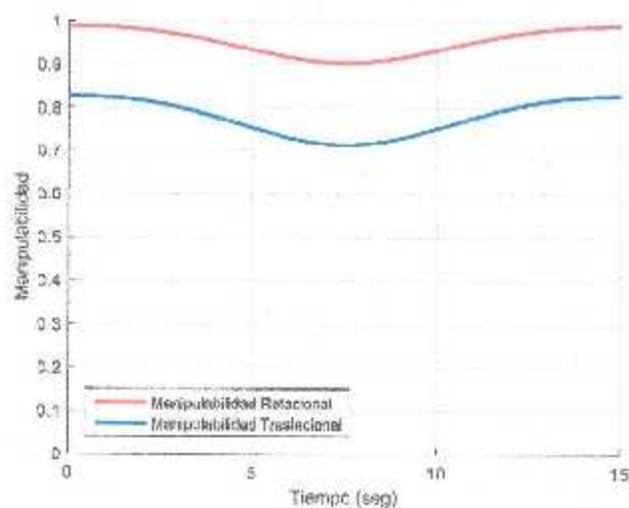


Figura 4.28 Caso 9. Historia de las manipulabilidades traslacional y rotacional.

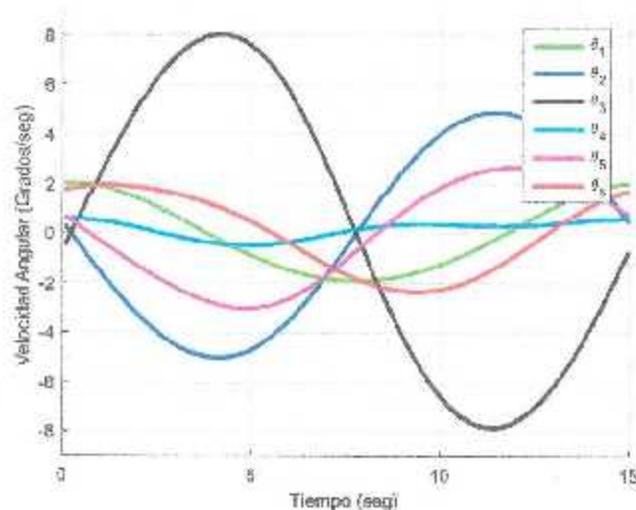


Figura 4.29 Caso 9. Comportamiento de las velocidades articulares.

Como se puede observar en la figura 4.28 al agregar la solución homogénea al movimiento del robot se obtiene un mejor comportamiento global de las dos manipulabilidades.

Como se puede observar en la figura 4.30, gracias a que la trayectoria tiene una mayor complejidad en comparación a la trayectoria rectilínea, el comportamiento del ángulo ψ también se vuelve más complejo. Este ángulo oscila entre -131° y -65° aproximadamente.

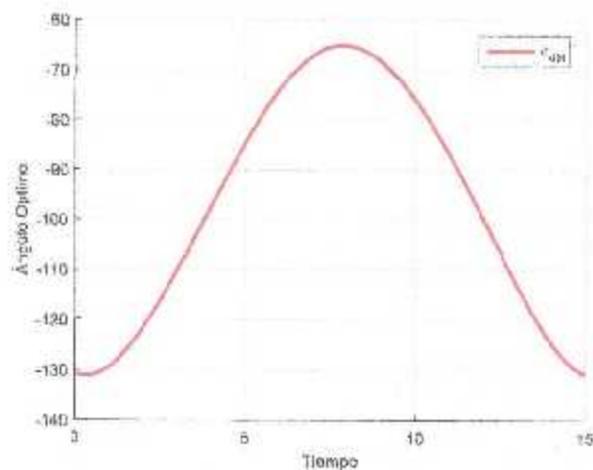


Figura 4.30 Caso 9. Historia del ángulo ψ .

4.10 Caso 10. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

En el caso 10 se usa la antorcha II para observar los cambios que resultan en las manipulabilidades en comparación con los casos anteriores. Como se puede observar en la figura 4.32 las manipulabilidades empeoran en comparación con el comportamiento mostrado en la figura 4.22, correspondiente al caso 7 (robot con la antorcha I para la misma ruta circular). La manipulabilidad rotacional es la más deteriorada, toda vez que en su mejor punto sólo alcanza el valor de 0.2. Por otro lado, se advierte que las velocidades articulares comienzan muy elevadas en las articulaciones 4 y 6; si bien dichas velocidades se reducen después del inicio de la ruta, éstas vuelven a elevarse en la parte final del círculo. Estos incrementos de velocidad se deben a que las posturas de la muñeca en esa zona se aproximan a una singularidad de muñeca. No obstante que este comportamiento se observó para la antorcha II, este caso prueba que una pose intuitiva de una antorcha podría demandar posturas singulares y, en consecuencia, exigir velocidades desproporcionadas a algunas articulaciones en comparación con el resto.

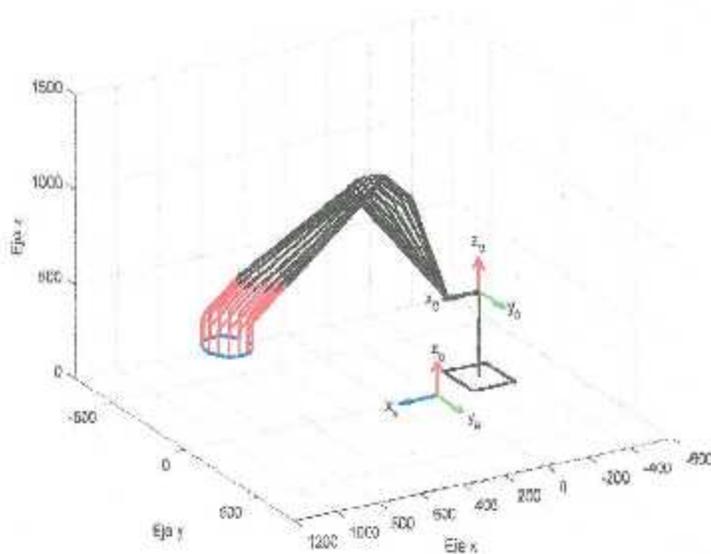


Figura 4.31 Caso 10. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

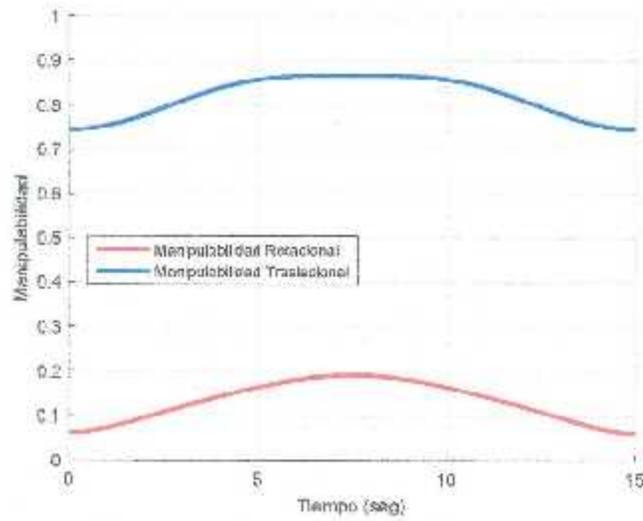


Figura 4.32 Caso 10. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

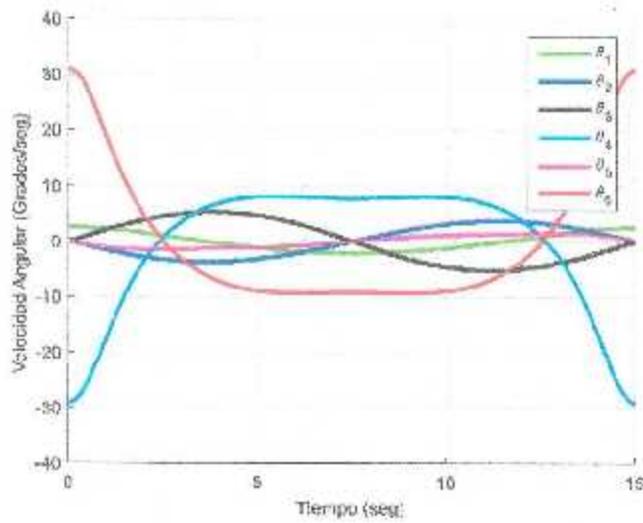


Figura 4.33 Caso 10. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.11 Caso 11. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

La orientación de la antorcha definida con $\psi = -90^\circ$ se determinó a partir del comportamiento observado durante el barrido ψ efectuado en el capítulo 3.

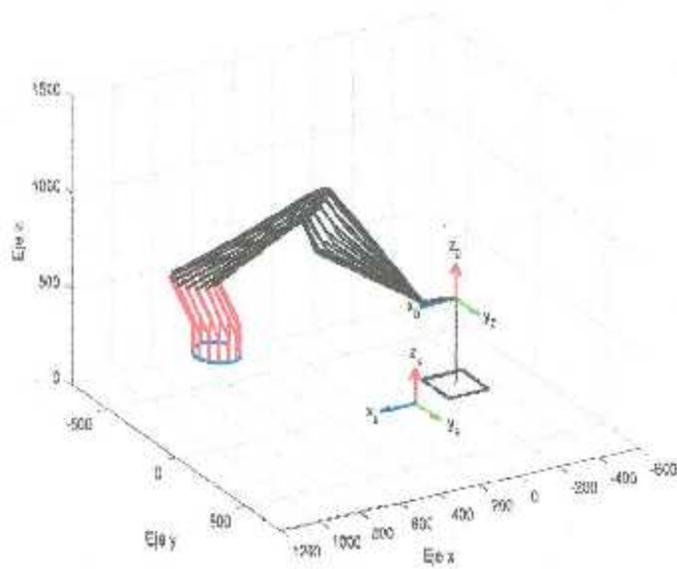


Figura 4.34 Caso 11. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

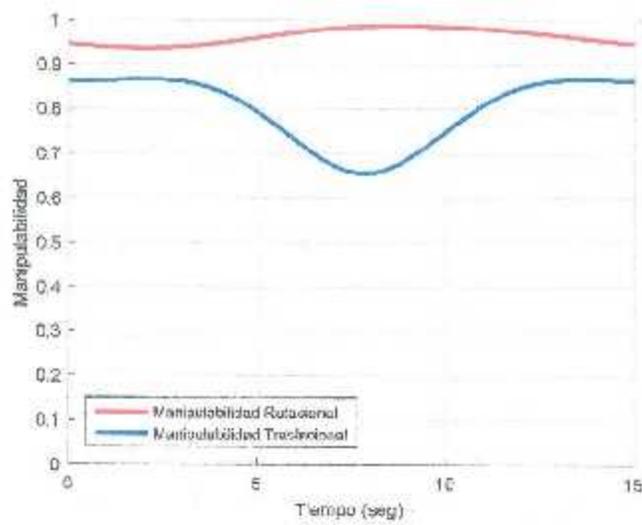


Figura 4.35 Caso 11. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

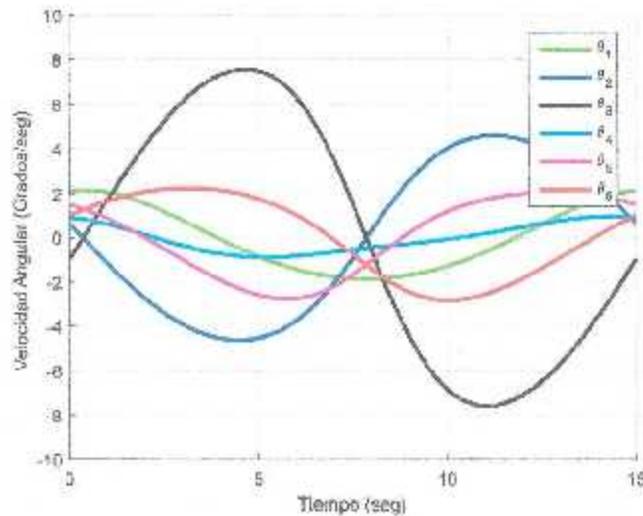


Figura 4.36 Caso 11. Comportamiento de las velocidades articulares.

Como se observa en la figura 4.35, las manipulabilidades aumentaron significativamente con respecto al caso anterior. Además, en la figura 4.36 se aprecia que las articulaciones 4 y 6 ya no tienen velocidades elevadas, lo que comprueba que la pose definida con $\psi = -90^\circ$ resulta más conveniente que la determinada de manera intuitiva.

4.12 Caso 12. Antorcha II, ruta circular, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

Al igual que en el caso 9, el ángulo ψ se deja libre, considerando al robot como redundante. Se determina el valor de ψ que maximiza las manipulabilidades traslacional y rotacional, para después calcular la postura utilizando el modelo inverso de posición del robot como si éste fuera instantáneamente no redundante. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -120° . Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.37 a 4.40.

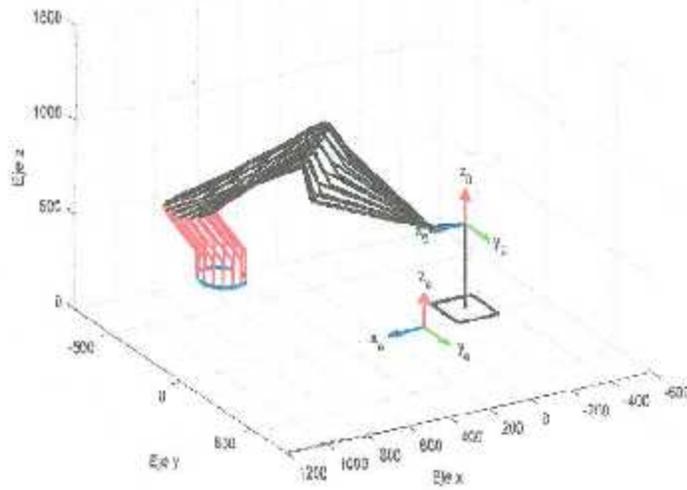


Figura 4.37 Caso 12. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

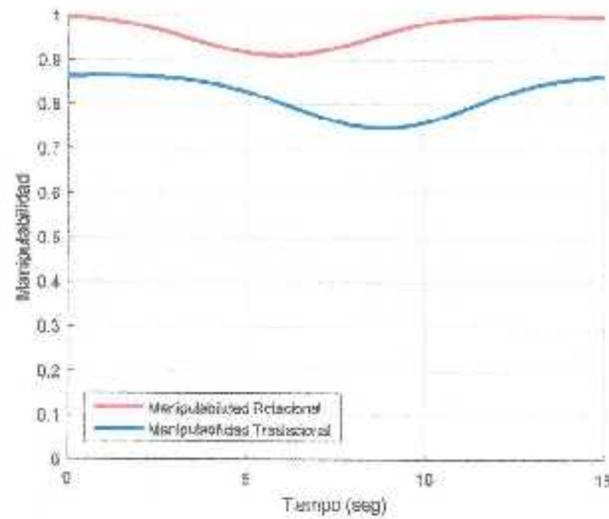


Figura 4.38 Caso 12. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

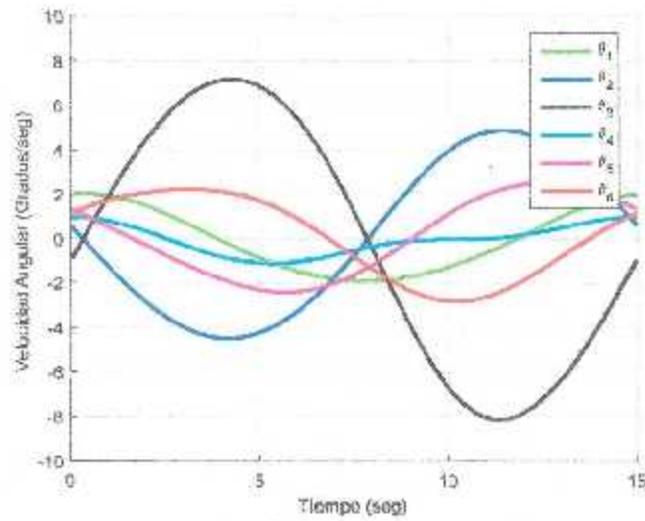


Figura 4.39 Caso 12. Comportamiento de las velocidades articulares.

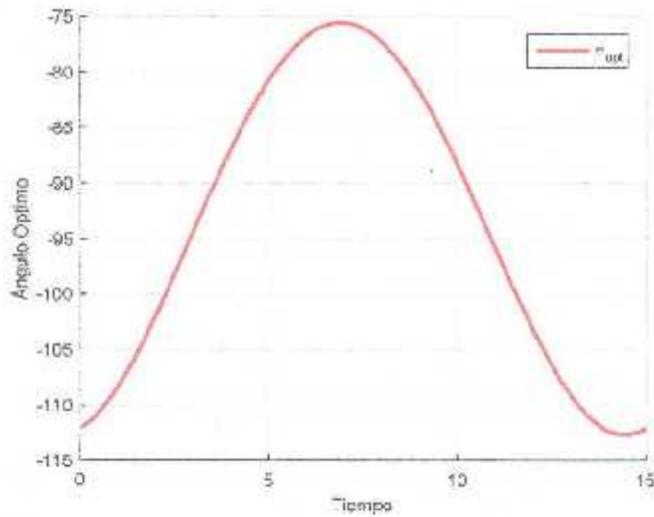


Figura 4.40 Caso 12. Historia del ángulo ψ .

En este caso se observa una pequeña mejora del desempeño del robot en comparación con el obtenido mediante la orientación fija con $\psi = -90^\circ$. La manipulabilidad traslacional mejora ligeramente a cambio de una degradación leve de la manipulabilidad rotacional. Las velocidades articulares no varían significativamente con respecto al caso 11. Sin embargo,

se aprecia que el ángulo ψ presenta una amplitud de oscilación de magnitud igual a 36° , casi la mitad de la amplitud del caso nueve, que es de 65° .

4.13 Caso 13. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

En este caso la antorcha debe describir una ruta sinusoidal la cual está predefinida en la programación del robot Famic, con el propósito de usarse en algunas aplicaciones especiales de soldadura. La ruta considerada en este caso tiene un desplazamiento de 200 mm sobre el eje x, y una amplitud de 100 mm. Para este caso teniendo $\psi = 0^\circ$, se obtienen valores de moderados a aceptables para la manipulabilidad traslacional, y valores moderados para la rotacional, como se aprecia en la figura 4.42. Si bien estas manipulabilidades no son excelentes, sí impiden que las velocidades articulares alcancen valores excesivos. Los resultados completos de este caso, para una orientación intuitiva de la antorcha, se aprecian en las figuras 4.41 a 4.43.

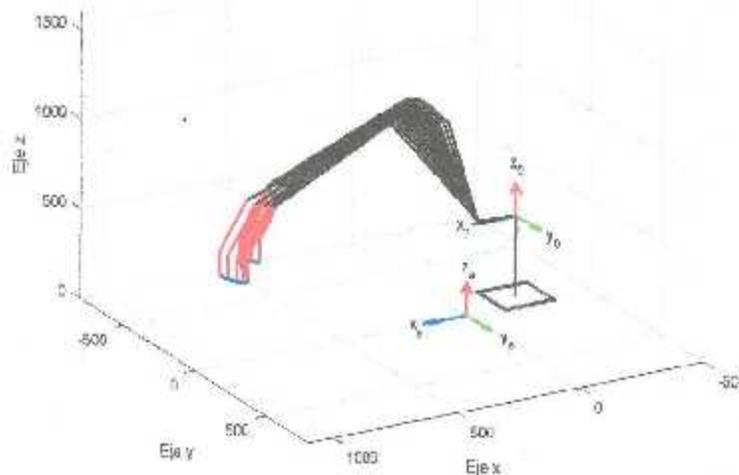


Figura 4.41 Caso 13. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

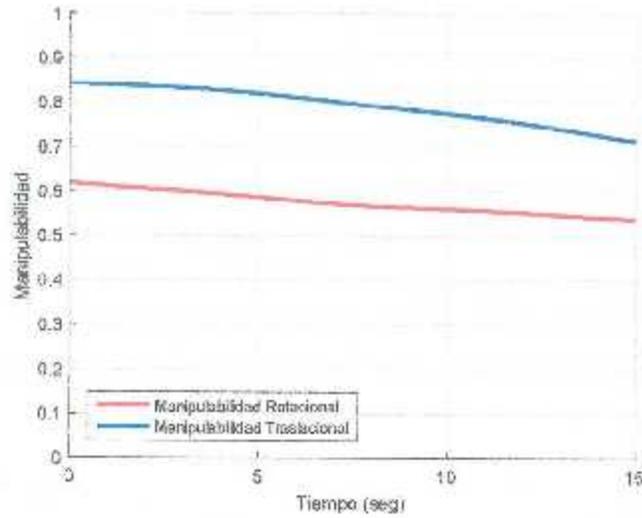


Figura 4.42 Caso 13. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

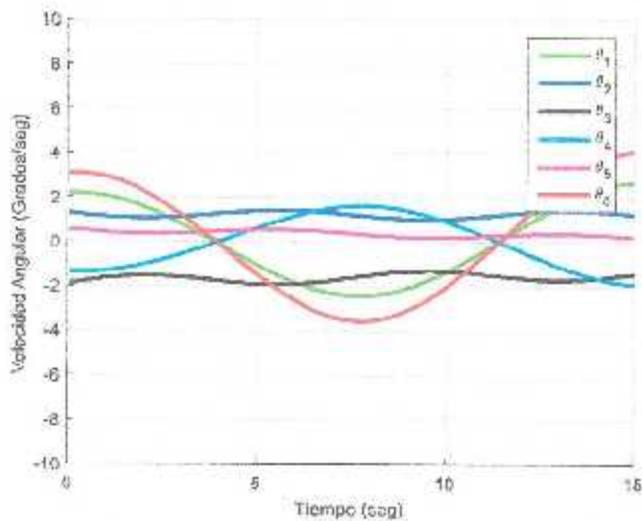


Figura 4.43 Caso 13. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.14 Caso 14. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = -120^\circ$

Al realizar un estudio similar a los mostrados en el capítulo anterior se considera para este caso se considera un $\psi = -120^\circ$ con el fin de llegar a los valores más altos de las manipulabilidades. En la figura 4.45 se observa que la manipulabilidad rotacional se

incrementa de manera significativa, mientras que la traslacional decrece al principio y aumenta conforme se realiza la trayectoria.

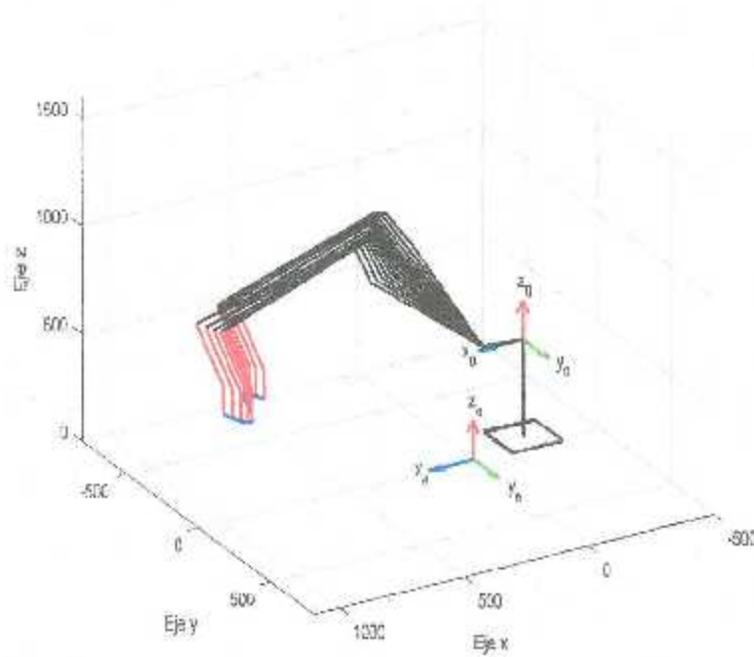


Figura 4.44 Caso 14. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

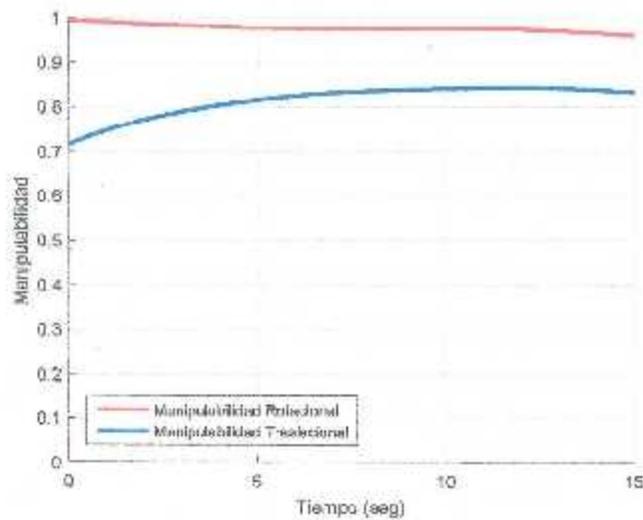


Figura 4.45 Caso 14. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

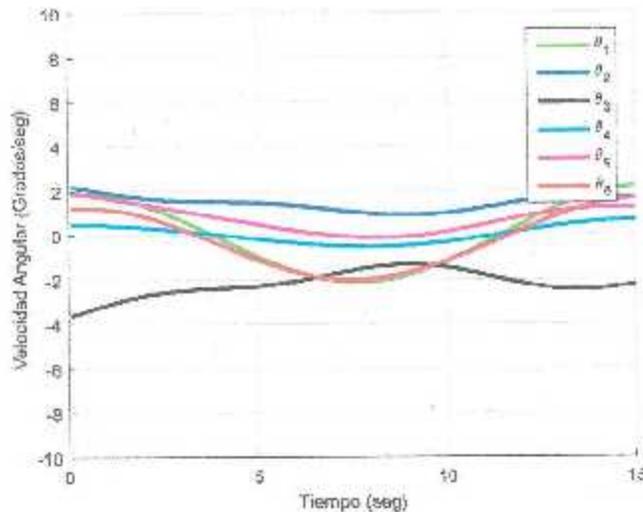


Figura 4.46 Caso 14. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.15 Caso 15. Antorcha I, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

En este caso no se especifica el ángulo ψ de la orientación de la antorcha, con lo que el manipulador se vuelve redundante. Dicho ángulo se determina de tal manera que se optimice el desempeño cinemático del robot. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -120° como el caso anterior. Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.47 a 4.50. En comparación con el caso precedente, se observa un incremento en la manipulabilidad traslacional a costa de una ligera disminución de la rotacional. En términos generales, sin embargo, el desempeño cinemático es mejor.

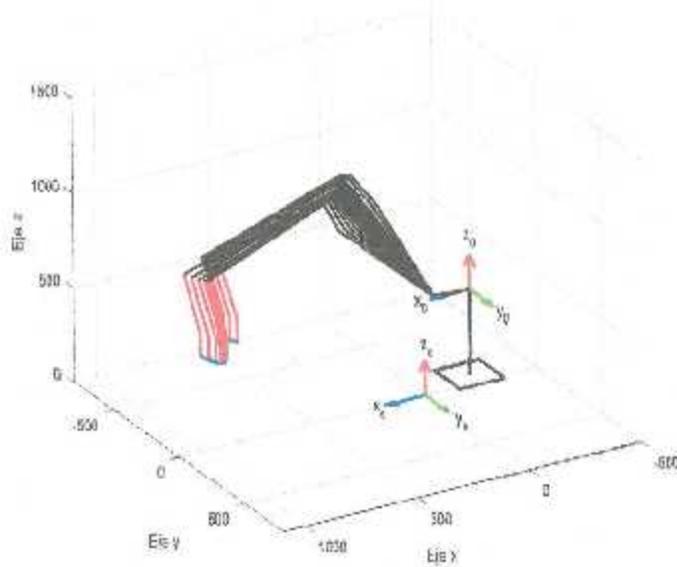


Figura 4.47 Caso 15. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

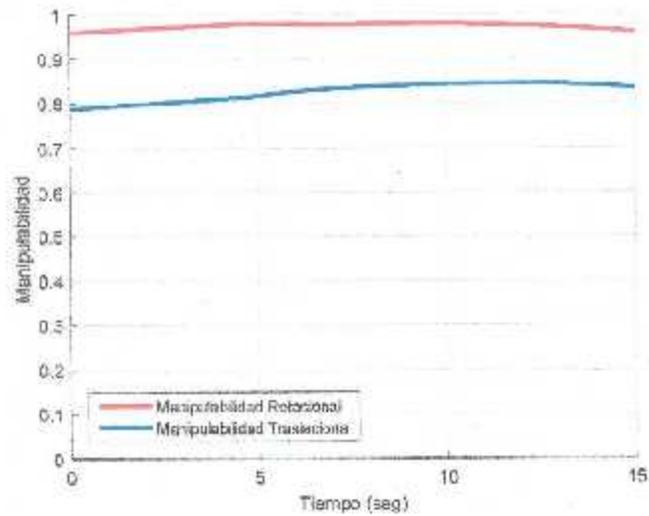


Figura 4.48 Caso 15. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

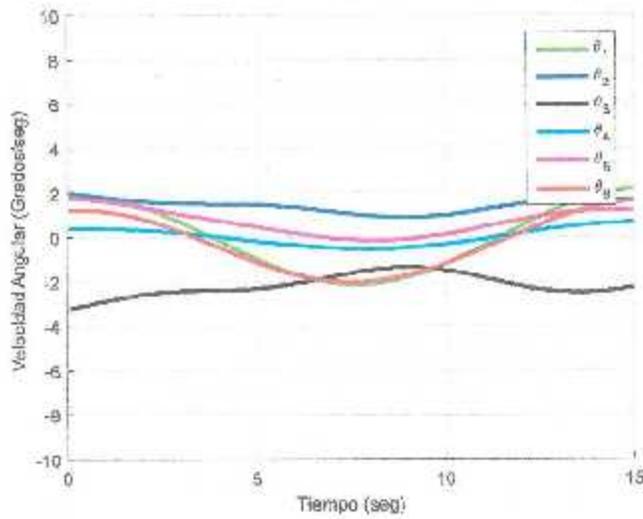


Figura 4.49 Caso 15. Comportamiento de las velocidades articulares.

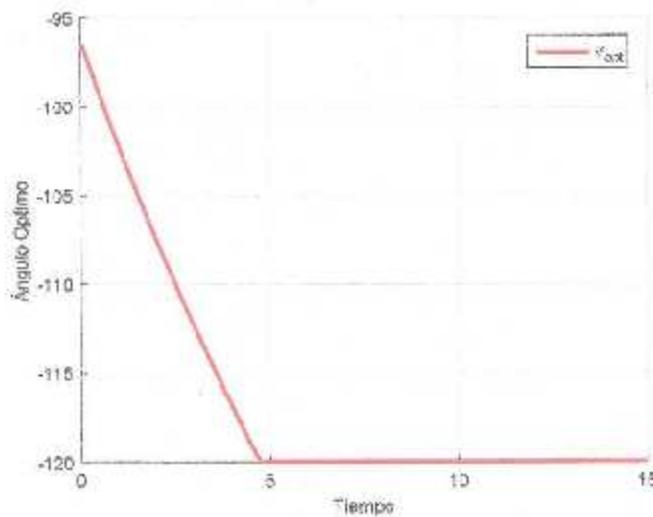


Figura 4.50 Caso 15. Historia del ángulo ψ .

4.16 Caso 16. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.51 a 4.53. Se observa en la figura 4.52 que la manipulabilidad rotacional es muy baja, sobre todo en la parte final de la

ruta. Este comportamiento ocasiona velocidades articulares demasiado elevadas, típicas de las posturas en la vecindad de una singularidad de muñeca, como se aprecia en la figura 4.53.

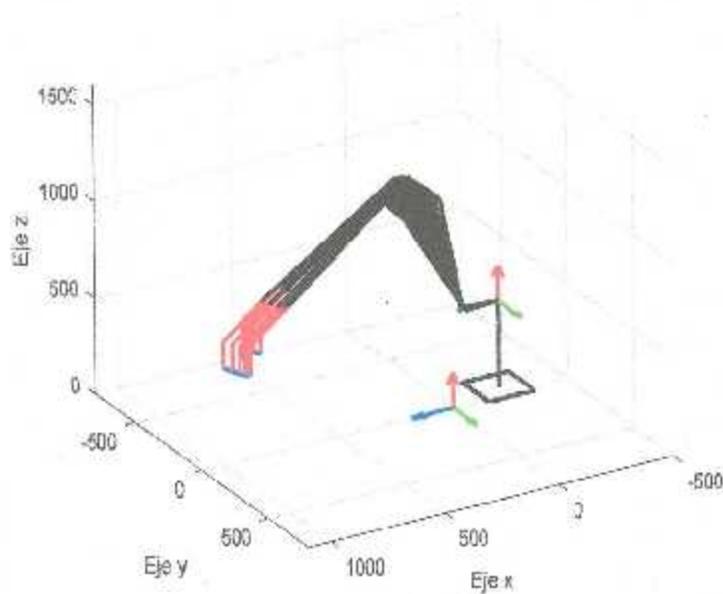


Figura 4.51 Caso 16. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la larca.

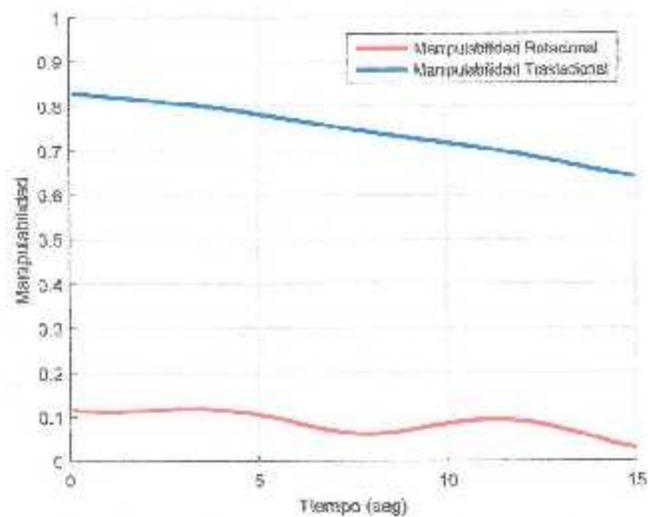


Figura 4.52 Caso 16. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

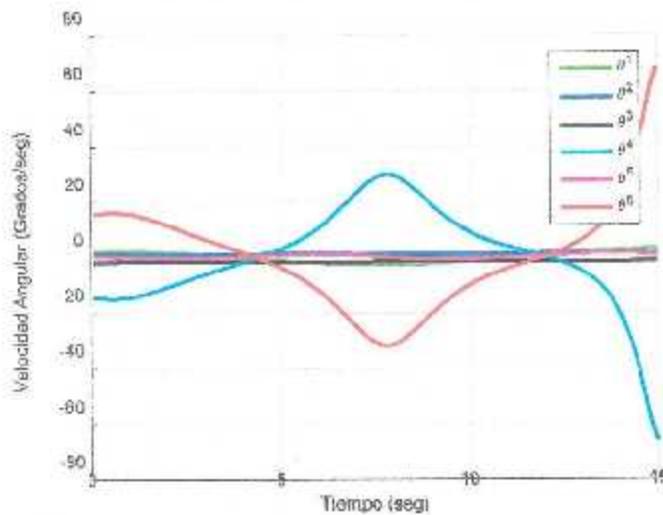


Figura 4.53 Caso 16. Comportamiento de las velocidades articulares.

Por esta razón se consideran las posturas obtenidas en el capítulo de planificación de movimientos. Como se muestra en el caso 17 y 18.

4.17 Caso 17. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con $\psi = -120^\circ$

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.54 a 4.56. En la figura 4.55 se advierte que, gracias a la nueva pose especificada para la antorcha, la manipulabilidad rotacional ha aumentado hasta el punto de ser óptima en todo momento. Como consecuencia, todas las velocidades articulares se encuentran dentro de rangos aceptables de operación, como se aprecia en la figura 4.56. No obstante, aun cuando se tiene una manipulabilidad rotacional alta se puede observar que la manipulabilidad traslacional comienza en valores moderados y comienza a aumentar. Esto significa que aún se tiene un margen para mejorar las posturas durante la ejecución de la tarea.

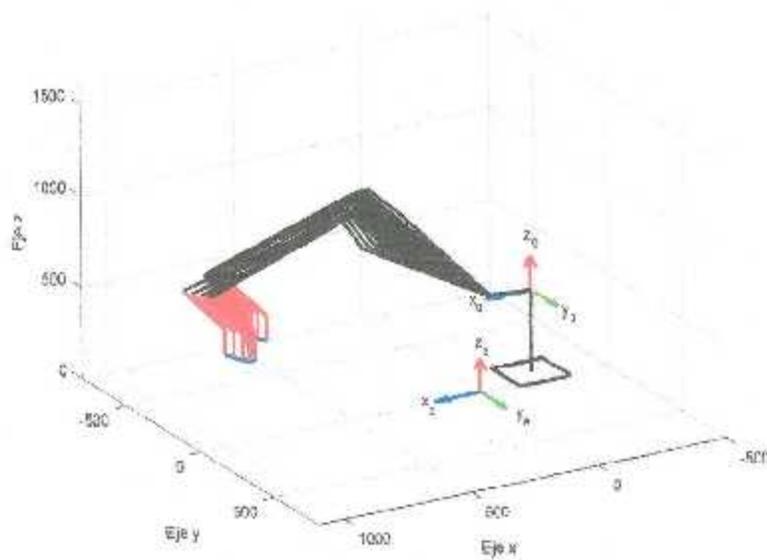


Figura 4.54 Caso 17. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

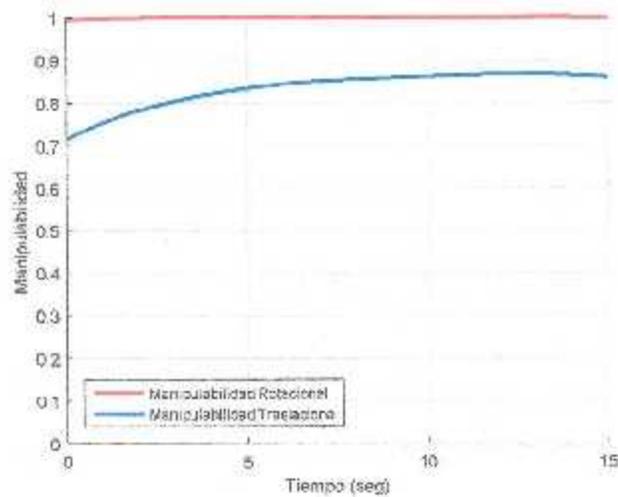


Figura 4.55 Caso 17. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

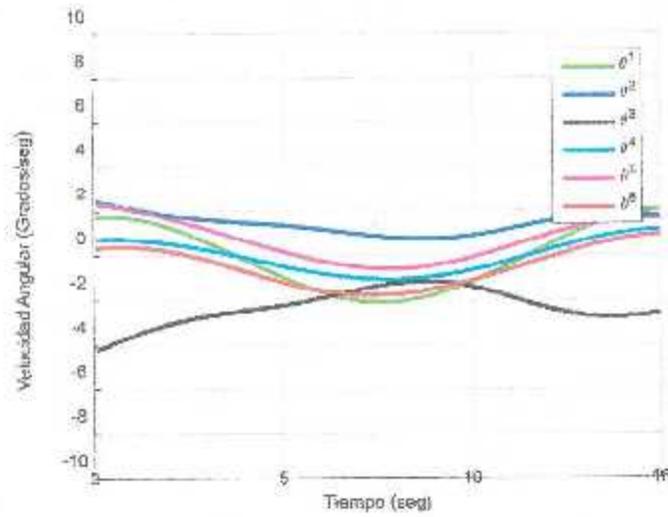


Figura 4.56 Caso 17. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.18 Caso 18. Antorcha II, ruta sinusoidal, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

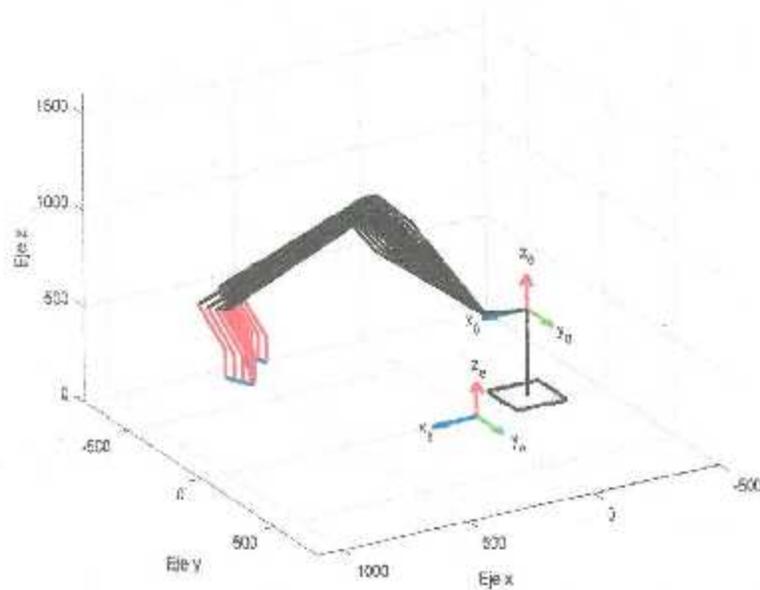


Figura 4.57 Caso 18. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

Se considera al robot como redundante toda vez que no se especifica el ángulo ψ de la orientación de la antorcha. Este ángulo se calcula de manera que optimice el desempeño cinemático del robot. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -120° . Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.57 a 4.60. En comparación con el caso precedente, se observa un incremento en la manipulabilidad traslacional a costa de una ligera disminución de la rotacional, sin que se afecte de manera significativa a las velocidades articulares. El desempeño cinemático del robot es mejor en términos generales.

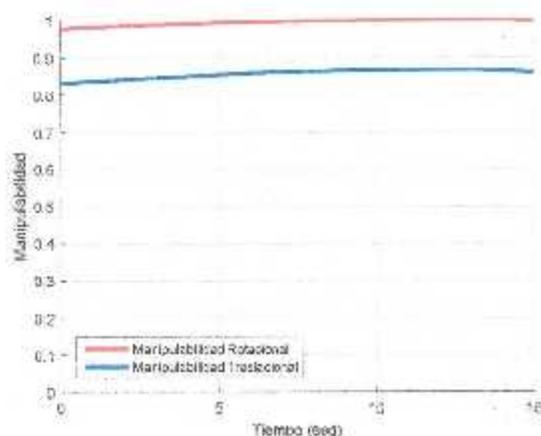


Figura 4.58 Caso 18. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

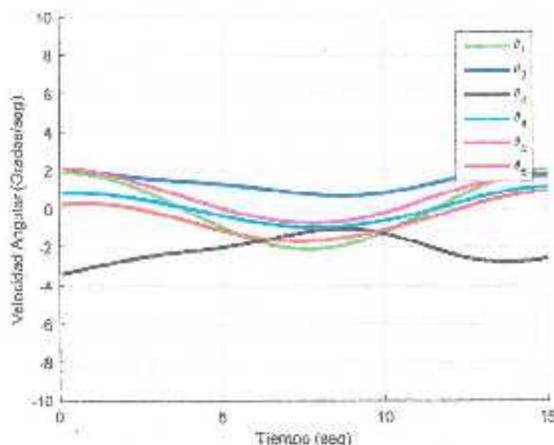


Figura 4.59 Caso 18. Comportamiento de las velocidades articulares.

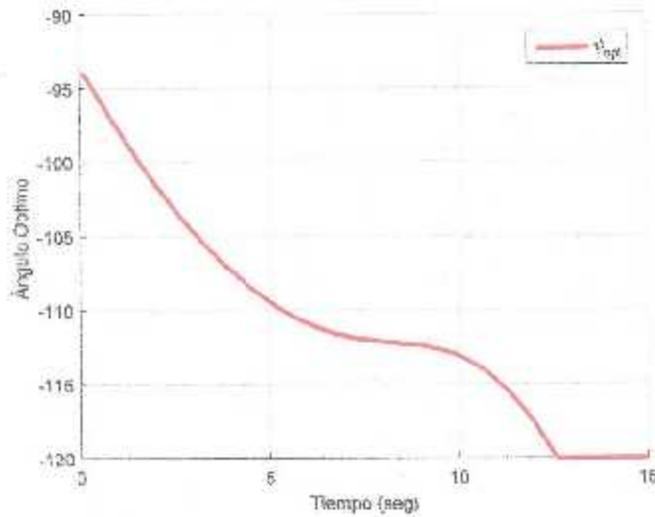


Figura 4.60 Caso 18. Historia del ángulo ψ .

En los siguientes 6 casos se analiza el desempeño del robot para una ruta que describe una lemniscata de 2 hojas. Esta ruta también se encuentra predefinida en la programación del robot manipulador Fanuc, y su aplicación se recomienda para tareas de soldadura en piezas que se encuentren colocadas en un plano vertical [24].

4.19 Caso 19. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.61 a 4.63. Se observa en la figura 4.62 que la manipulabilidad rotacional es relativamente baja, mientras que la traslacional es aceptable. No obstante, se espera mejorar ambos índices en los casos subsecuentes.

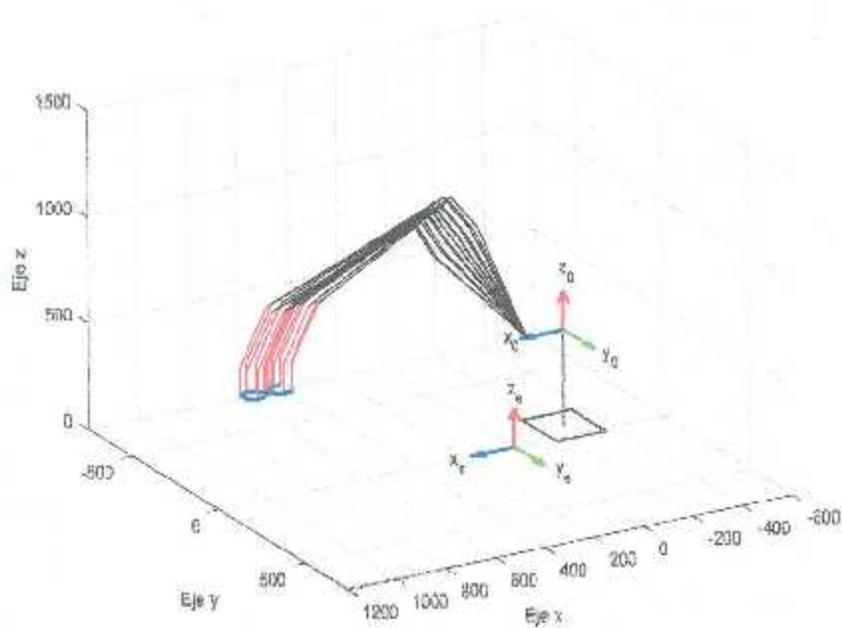


Figura 4.61 Caso 19. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

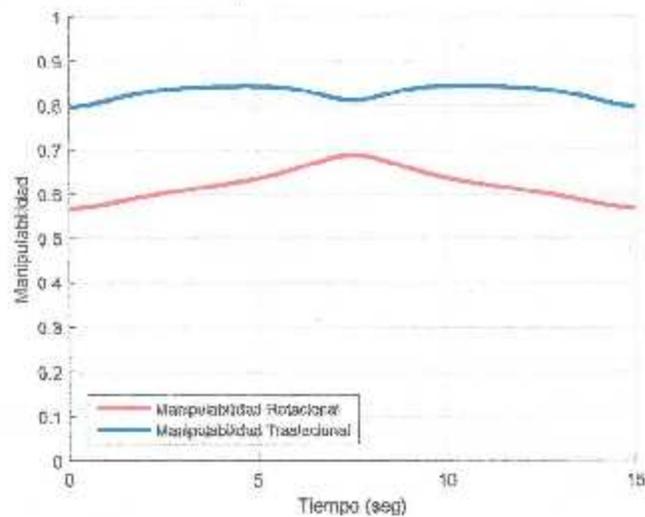


Figura 4.62 Caso 19. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

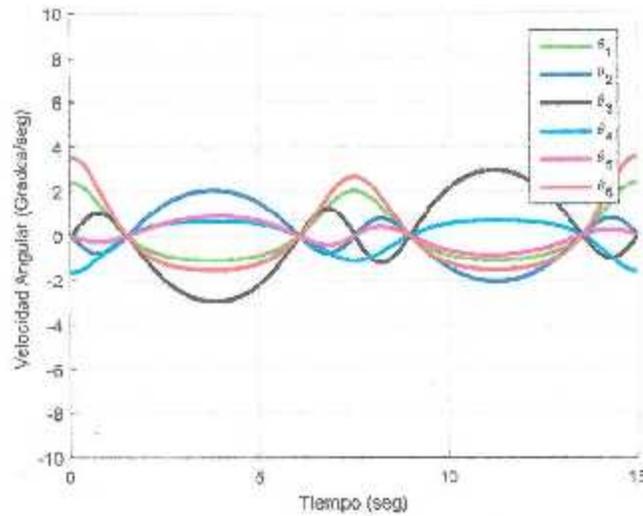


Figura 4.63 Caso 19. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.20 Caso 20. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

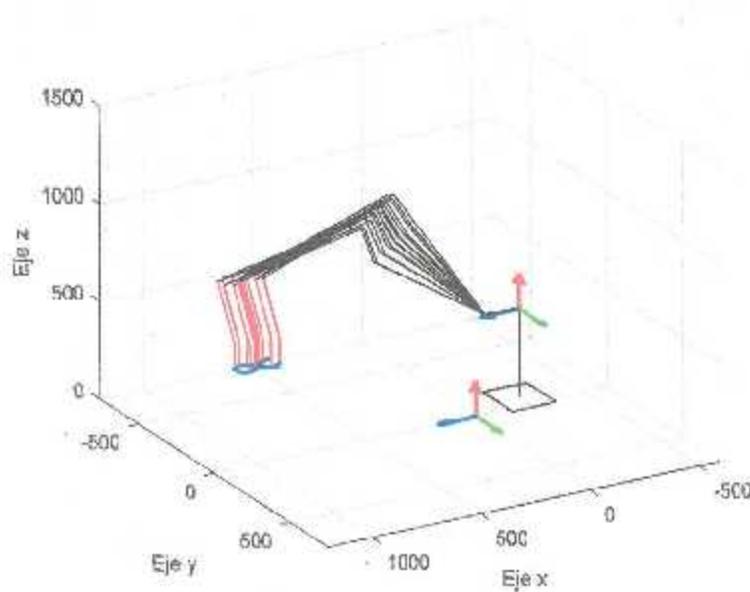


Figura 4.64 Caso 20. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.64 a 4.66. En la figura 4.65 se advierte que la pose especificada para la antorcha en este caso propicia un aumento en la manipulabilidad rotacional. No obstante, la manipulabilidad traslacional sufre un deterioro importante. Se espera que este deterioro se reduzca en el siguiente caso, en el cual se optimiza la postura del manipulador en cada punto de la ruta mediante una adecuada selección del ángulo ψ .

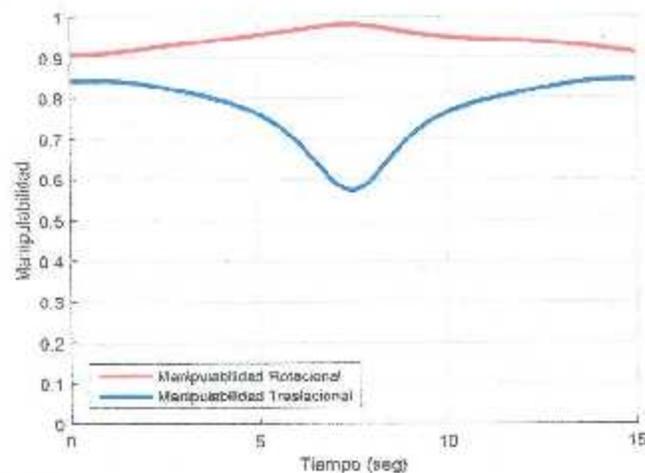


Figura 4.65 Caso 20. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

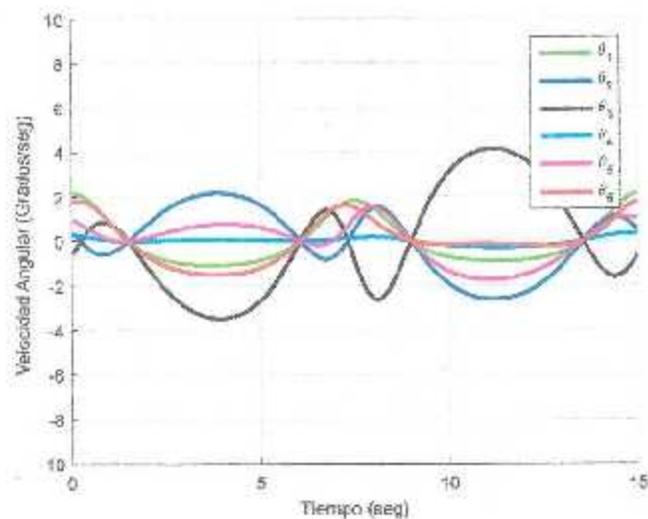


Figura 4.66 Caso 20. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.21 Caso 21. Antorcha I, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

Se considera al robot como redundante toda vez que no se especifica el ángulo ψ de la orientación de la antorcha. Este ángulo se calcula de manera que optimice el desempeño cinemático del robot. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -130° . Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.67 a 4.70. En comparación con el caso 20, se observa en la figura 4.68 una notable mejoría en la manipulabilidad traslacional sin que se afecte de manera significativa la rotacional. El desempeño cinemático del robot globalmente es mejor.

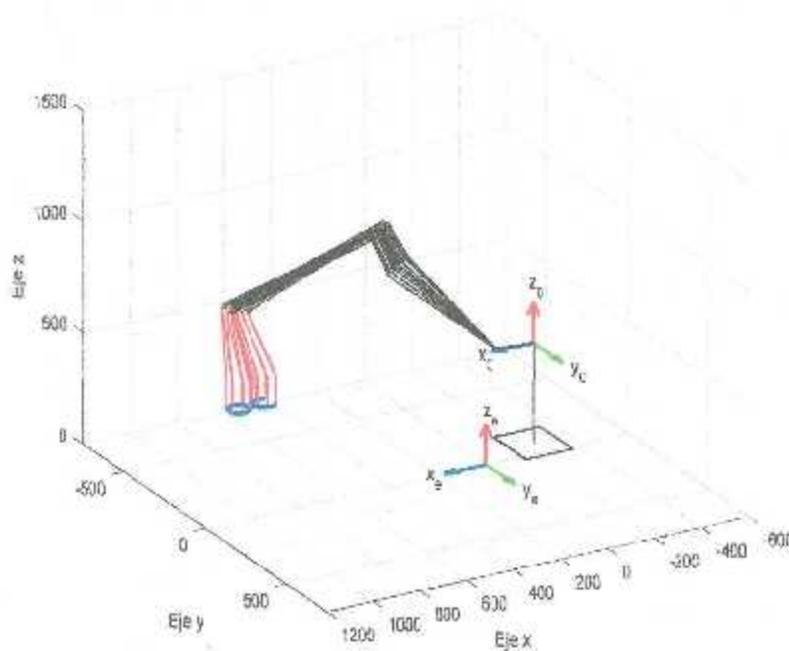


Figura 4.67 Caso 21. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

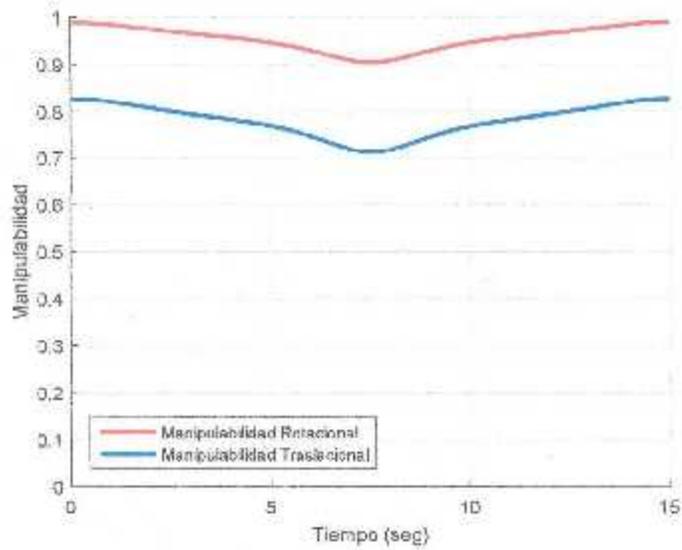


Figura 4.68 Caso 21. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

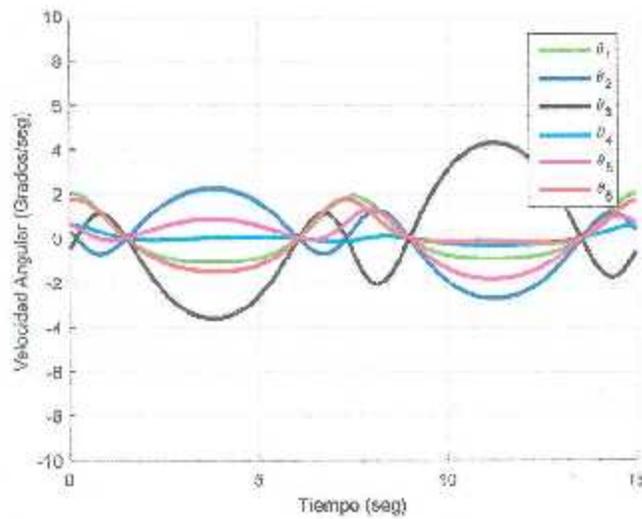


Figura 4.69 Caso 21. Comportamiento de las velocidades articulares.

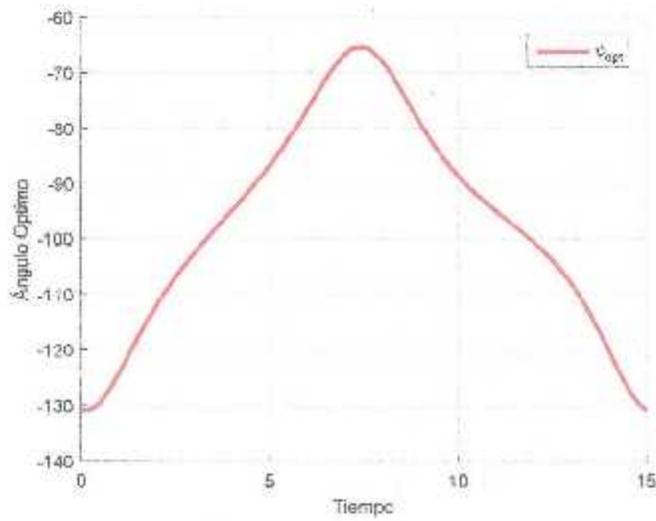


Figura 4.70 Caso 21. Historia del ángulo ψ .

4.22 Caso 22. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = 0^\circ$

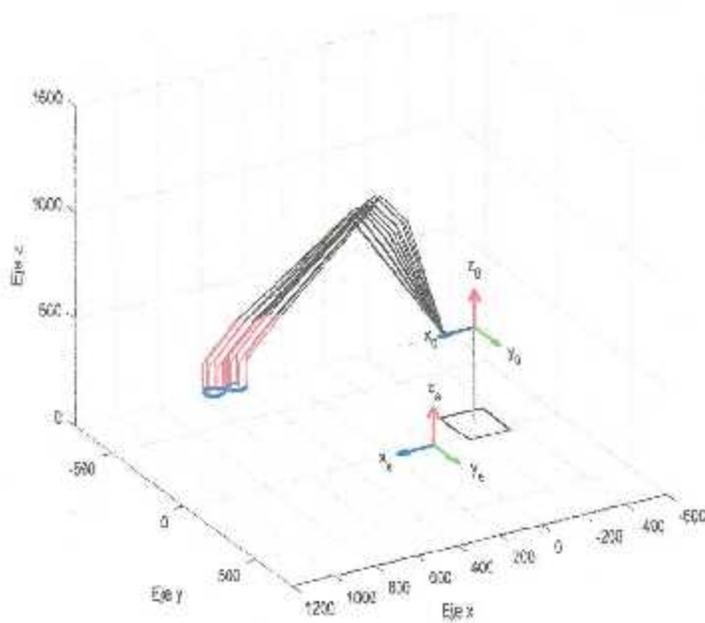


Figura 4.71 Caso 22. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarea.

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.71 a 4.73. Al igual que en todos los casos anteriores con la antorcha II y con la orientación fija en $\psi=0$ la manipulabilidad rotacional se ve severamente afectada. Al inicio y al final de la ruta se alcanzan los valores más bajos de este índice, lo que significa que las posturas se aproximan a singularidades de muñeca en esa zona. Este comportamiento se confirma con las elevadas velocidades en las articulaciones 4 y 6. La manipulabilidad traslacional muestra un comportamiento aceptable.

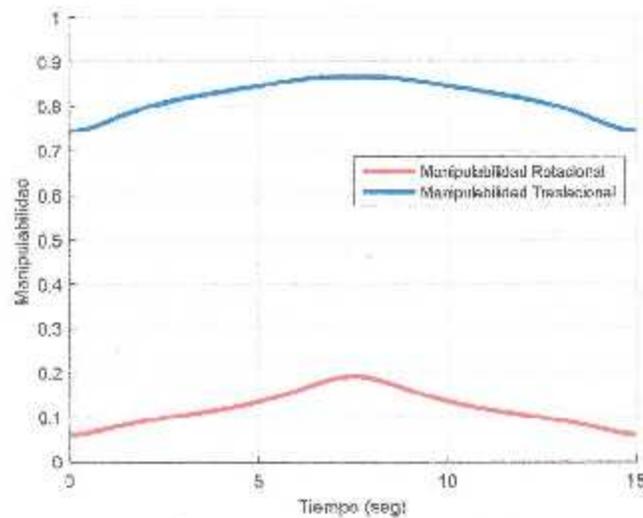


Figura 4.72 Caso 22. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

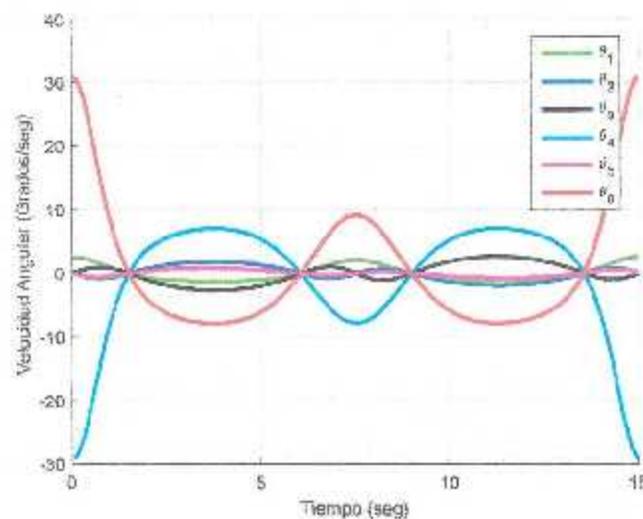


Figura 4.73 Caso 22. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.23 Caso 23. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con $\psi = -90^\circ$

Los resultados de este caso se muestran en las figuras 4.74 a 4.76. Se logró un aumento significativo en la manipulabilidad rotacional, como se aprecia en la figura 4.75, en comparación con el desempeño del robot en el caso 22. La manipulabilidad traslacional, en cambio, desciende ligeramente.

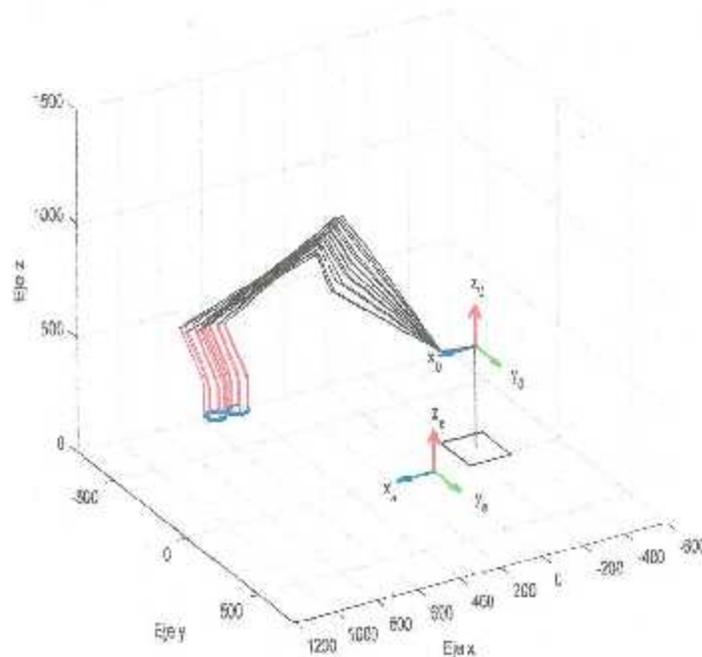


Figura 4.74 Caso 23. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarca.

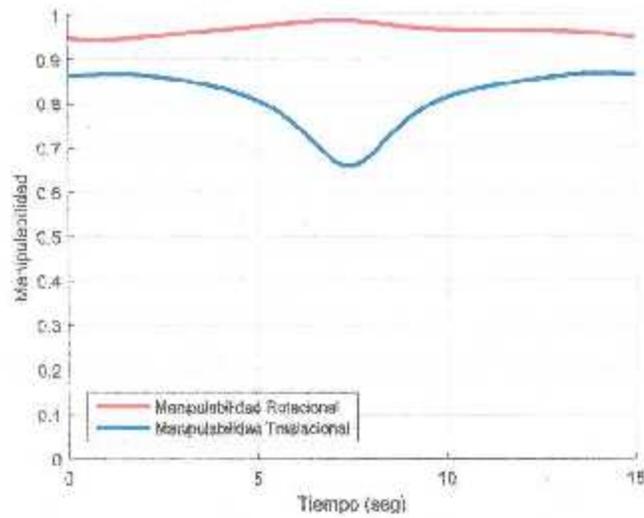


Figura 4.75 Caso 23. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

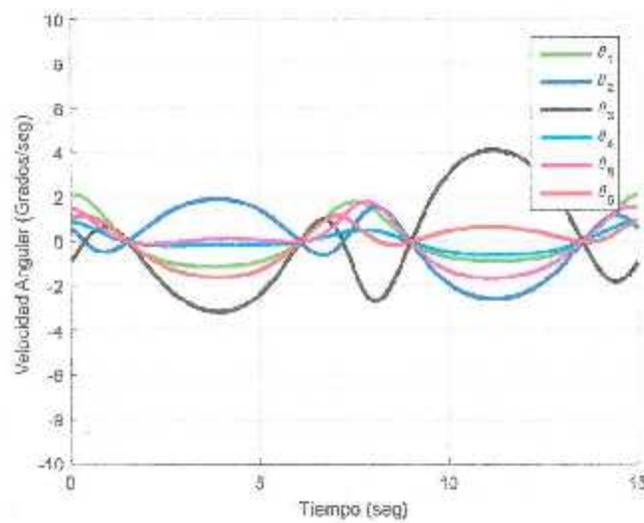


Figura 4.76 Caso 23. Comportamiento de las velocidades articulares.

4.24 Caso 24. Antorcha II, descripción de una lemniscata de dos hojas, orientación de la herramienta con ψ óptima en cada punto de la ruta

Se considera al robot como redundante y no se especifica el ángulo ψ de la orientación de la antorcha. El cálculo del valor óptimo de este ángulo permitirá maximizar los índices de manipulabilidad del robot. En este caso se establece el límite inferior de ψ en -115° . Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.77 a 4.80. En comparación con el caso 23, se observa una notable mejoría en la manipulabilidad traslacional sin que se afecte de manera significativa la rotacional, como se aprecia en la figura 4.78. El desempeño cinemático del robot es globalmente mejor.

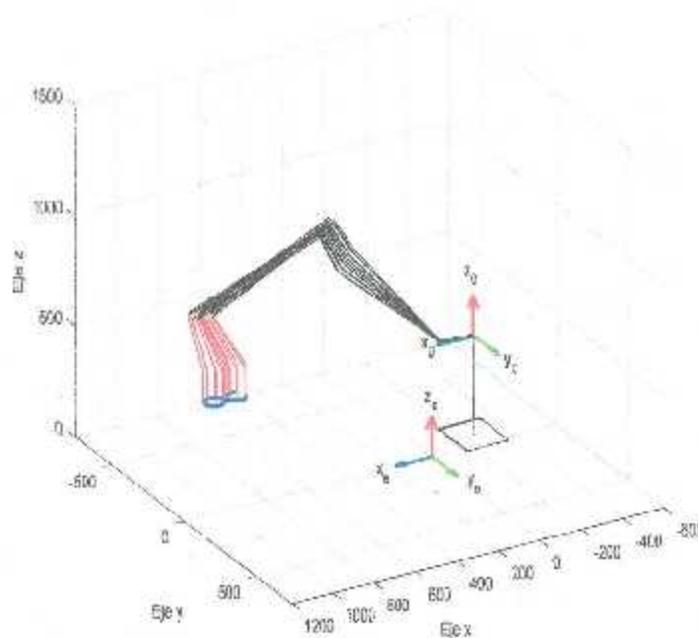


Figura 4.77 Caso 24. Secuencia de posturas del manipulador durante la simulación de la tarca.

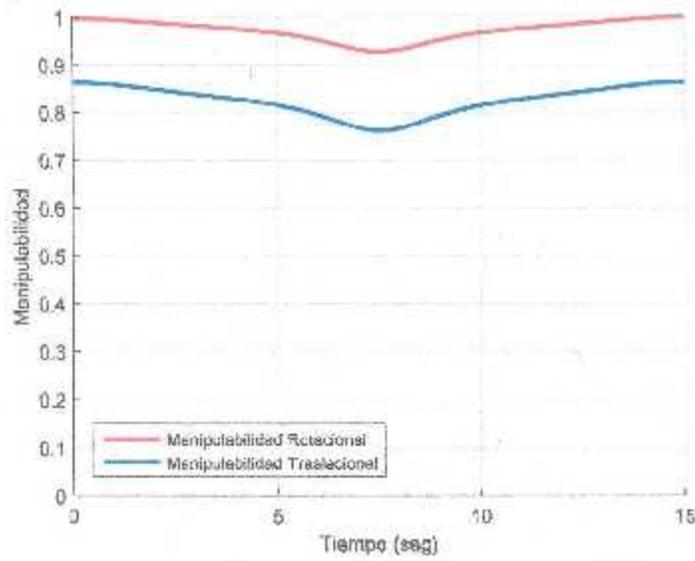


Figura 4.78 Caso 24. Historia de las manipulabilidades traslacional normalizada y rotacional.

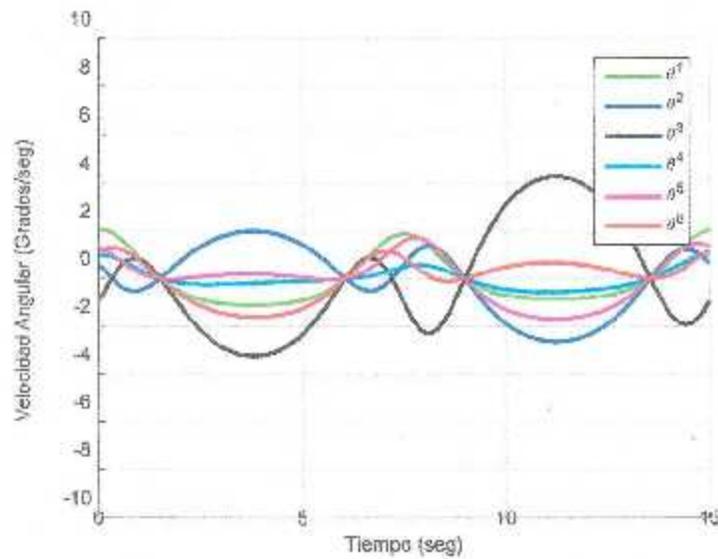


Figura 4.79 Caso 24. Comportamiento de las velocidades articulares.

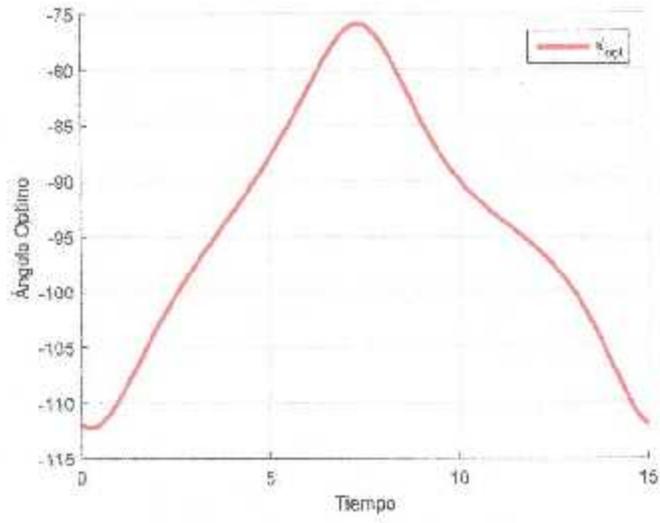


Figura 4.80 Caso 24. Historia del ángulo ψ .

5. Conclusiones

En este trabajo se efectuó el análisis del desempeño cinemático de un robot manipulador industrial de 6 gdl, en la realización de tareas de soldadura de arco eléctrico. El análisis permite comparar la eficacia de diferentes estrategias para la obtención del mejor desempeño cinemático del manipulador. La primer estrategia se basa en el establecimiento de una orientación intuitiva de la antorcha del robot que corresponde a un valor de $\psi=0^\circ$. La segunda estrategia parte de un análisis preliminar del desempeño cinemático del robot que permite, a través de un barrido de los posibles valores de ψ , identificar el valor de este ángulo que define su mejor desempeño cinemático en una posición específica de la antorcha. Eventualmente, los valores óptimos obtenidos de ψ se utilizan para establecer una orientación fija de la antorcha durante la ejecución de la tarea deseada. En estas dos primeras estrategias, al especificar una orientación fija de la antorcha, el robot se considera como no-redundante. La última estrategia consiste en dejar libre el valor de ψ que utilizará el robot en cada punto de la tarea para que después, mediante un proceso de optimización en cada punto de la ruta de la antorcha, se determine el valor de dicho ángulo que hace que la postura del robot obtenga localmente el máximo desempeño cinemático. En esta última estrategia se considera al robot como cinemáticamente redundante. Así, en la tercera estrategia, la solución de la cinemática inversa de posición del robot equivale a la aplicación de la solución del modelo inverso de velocidad mediante la suma de la solución de mínima norma y de una solución homogénea, a la resolución del problema inverso de posición. En este caso, la solución homogénea reconfigura internamente al robot de tal manera que las posturas que se determinan en cada punto de la ruta son óptimas bajo el criterio de las manipulabilidades traslacional y rotacional. Es decir, que se obtiene implícitamente la solución de mínima norma sin necesidad de recurrir al cálculo de un vector del espacio nulo de la matriz jacobiana del robot a partir del gradiente de un vector del espacio de velocidades articulares. Esta

estrategia reduce significativamente el tiempo de cómputo de la redundancia cinemática para la obtención de una postura óptima, lo que representa una ventaja importante con respecto a los procedimientos propuestos en la literatura en [17] y [18].

Los resultados muestran las ventajas que se obtienen al considerar al robot como cinemáticamente redundante en la planificación de sus movimientos orientada a la optimización de su desempeño cinemático. En este trabajo de tesis se utilizó el índice de manipulabilidad como criterio de optimización. La maximización de este índice permite determinar posturas del manipulador tan alejadas como sea posible de las singularidades del robot, y maximizar la eficacia del robot en la conversión de movimientos articulares en desplazamientos del órgano terminal. Los resultados de los casos de estudio demuestran la efectividad del criterio considerado. En contraste, el comportamiento que se obtiene del desempeño cinemático del robot al establecer de manera intuitiva una orientación de la herramienta puede llegar a ser muy pobre y, aún más, llevar a éste a posturas singulares o vecinas de éstas. Hacer funcionar a un robot industrial en esas condiciones puede llevarlo a acortar de manera significativa su vida útil.

La realización de este trabajo incluyó la obtención de los modelos cinemáticos del robot, la creación de un modelo geométrico del mismo, y el desarrollo de software en el paquete de *Matlab* para la simulación y la animación del modelo del robot. Cada proceso de simulación permitió constatar visualmente los movimientos del robot durante la ejecución de la tarea deseada, además de analizar numéricamente el comportamiento de los índices de manipulabilidad traslacional y rotacional así como las velocidades articulares.

Se evaluaron varias rutas con diferentes geometrías, considerando dos tipos de antorcha de soldadura, con el fin de observar la influencia tanto de la geometría de la ruta como del tipo de antorcha utilizada en el desempeño cinemático del robot. Todos los casos mostraron la relevancia de la realización de un proceso previo de planificación de movimientos mediante la resolución de la redundancia cinemática del manipulador.

Las principales aportaciones de este trabajo de tesis son las siguientes:

1. Un método para la planificación de movimientos óptimos de robots de soldadura cuyas tareas permitan considerar al robot como cinemáticamente

redundante, que incluye el desarrollo de un método eficiente para la resolución de la redundancia. Como resultado de la aplicación de este método se consigue una mayor vida útil del manipulador ya que se reducen las velocidades articulares toda vez que éstas son mejor distribuidas entre todos los actuadores.

2. La integración de un software para el análisis de movimientos del robot manipulador Fanuc Arc Mate 100ic®, además de la posibilidad de adaptar dicho software a diferentes robots manipuladores para su aplicación posterior.
3. Hacer evidente, mediante múltiples casos de estudio, que las posturas obtenidas a partir de una selección intuitiva de la orientación de la antorcha generalmente no constituyen la mejor opción para realizar una tarea. Si bien en tareas simples no es tan grande la ventaja de las soluciones óptimas con respecto a las obtenidas a partir de poses intuitivas de la antorcha, cuando se trata de tareas con una geometría compleja siempre es mejor considerar las posturas óptimas obtenidas con el software.

Referencias bibliográficas

- [1] **J.W. Burdick**, *On the inverse kinematics of redundant manipulators: characterization of the self-motion manifolds*; Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Scottsdale, AZ, USA, May 1989.
- [2] **M. Pfurner**, *Closed form inverse kinematics solution for a redundant anthropomorphic robot arm*. Computer Aided Geometric Design, Vol. 47, pp 163–171, 2016.
- [3] **D.E. Whitney**, *The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators*; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol 94, N° 4, pp. 303-309;1972.
- [4] **A. Liégeois**, *“Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms”*; IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics smc-Vol 7, N° 12, pp. 868-871; 1977.
- [5] **Y. Nakamura, H. Hanafusa, T. Yoshikawa**, *Task priority based redundancy control of robot manipulators*; The International Journal of Robotics Research, Vol 4, N° 2, pp 3-15, 1987.
- [6] **A. A. Maciejewski, C. A. Klein**, *Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments* ; The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, no. 3, pp. 109-117, 1985.
- [7] **T. Yoshikawa, S. Kiriama**, *Four-joint redundant wrist mechanism and its control*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 111, N° 2, pp. 200-204, 1989.
- [8] **S. L. Chiu**, *Task compatibility of manipulator postures*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 7, N° 5, pp. 13-21, 1988.

- [9] **T. Yoshikawa**, *Manipulability of robotic mechanisms*; The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, N° 2, 1985.
- [10] **T. Yoshikawa**, *Translational and rotational manipulability of robotic manipulators*; Proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, USA, May 1990.
- [11] **J. Hemmerle, F. Prinz**, *Optimal path placement for kinematically redundant manipulators*, Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, USA, April, 1991.
- [12] **Pámanes J.A., Cuán E. and Zeghloul S.**; "Single and Multi-Objective Optimization of Path Placement for Redundant Robotic Manipulators"; Ingeniería: Investigación y Tecnología, Vol. 9, No. 3, pp. 231-257; 2008.
- [13] **N. C. N. Doan, W. Lin**, *Optimal robot placement with consideration of redundancy problem for wrist-partitioned 6R articulated robots*; Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 48, pp. 233-242. 2017.
- [14] **C. A. Klein, C. H. Huang**, *Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 13, N° 2, pp 245-250, 1983
- [15] **J.A Dietrich, C. Ott, A. Albu-Shaffer** .. *An overview of null space projections for redundant torque-controlled robots*, The International Journal of Robotics Research, Vol. 34, N°11, pp 1-16. 2015.
- [16] **L Tian, C. Collins, R. Chu**, *Optimal trajectory planning of redundant manipulators in constrained workspace*, IEEE Electronics Letters, Vol. 38, No.14, 2002.
- [17] **J. Léger, J. Angeles**. *Off-line programming of six-axis robots for optimum five-dimensional tasks*, Mechanism and Machine Theory, Vol. 100, pp. 155-169. 2016.
- [18] **H. Chen, Z. Liu**, *Offline programming for an arc welding robot with redundant DOF*, Applied Mechanics and Materials, Vols. 184-185, pp. 1623-1627, 2012.
- [19] **J. Polden, Z. Pan, N. Larkin, J. Norrish**, *Offline programming for a complex welding system using DELMLA automation in: Robotic welding. Intelligence and Automation: RWIA 2010*, Springer 2011.

- [20] **Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, J. Norrish**, *Automated offline programming for robotic welding system with high degree of freedoms*, In: Y. Wo (Ed.) *Advances in Computer, Communication, Control and Automation*, Springer, 2012.
- [21] **W. Khalil, J.F. Kleinfinger**, *A new geometric notation for open and closed-loop robots*; Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation; San Francisco, CA, USA, April 1986.
- [22] **Paul R.**, *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*, The MIT Press, 1981.
- [23] **W. Khalil, Ph. Lemoine**, *SYMORO+ Symbolic Modeling of Robots: User Guide*, Technical document, *Institute de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes*), 2003.
- [24] **Guerrero Y.**, *Contribución al estudio de la selección de parámetros de la estación de soldadura robotizada Famuc 100iC*, Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de la Laguna, 2017.

