

**SISTEMA PARA MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE DE CANALETAS USANDO  
ROBÓTICA COOPERATIVA**

**GERMÁN ANDRÉS VARGAS TORRES**  
Cód. 1800960



**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
ÁREA DE ROBÓTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL  
BOGOTÁ D.C.  
2012**

**SISTEMA PARA MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE DE CANALETAS USANDO  
ROBÓTICA COOPERATIVA**

**GERMÁN ANDRÉS VARGAS TORRES**

**Cód. 1800960**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**Director:**

**NELSON FERNANDO VELASCO TOLEDO**

**Ingeniero en Mecatrónica**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA  
ÁREA DE ROBÓTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL  
BOGOTÁ D.C.**

**2012**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bogotá, Abril 17 del 2012**

## DEDICATORIA

No hay nada malo en mirar atrás, pues vemos  
las experiencias que nos han formado  
con quienes están a nuestro lado, mirando  
con alegría hacia adelante.

Dedicado a mis padres, Cecilia Torres Rodríguez  
y Edgar Vargas Vargas, por su gran apoyo  
a lo largo de mis estudios; así como a todas  
las personas que han depositado  
su voto de confianza en mí y me han  
apoyado día tras día en mi camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa sus agradecimientos a:

Nelson Fernando Velasco Toledo. Ingeniero en Mecatrónica, docente del Programa de Ingeniería en Mecatrónica, director del trabajo de grado. Su experiencia ha sido fundamental para abordar los elementos de mi trabajo desde un punto global y de confluencia; así como un análisis de diversas alternativas para afrontar los problemas propuestos en este trabajo.

Ricardo Andrés Castillo Estepa. Ingeniero en Mecatrónica, docente del Programa de Ingeniería en Mecatrónica. Su asistencia fue de inmensa ayuda para corroborar la totalidad de los cálculos realizados en la cinemática directa e inversa del robot móvil.

Leonel Darío Rozo Castañeda. Ingeniero en Mecatrónica, Ingeniero de Investigación y Desarrollo del Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (IRI). Su orientación ha sido vital en el desarrollo de los modelos dinámicos relacionados al robot móvil y al manipulador.

Wilson Andrés Rojas Gutiérrez. Ingeniero en Mecatrónica. Sus sugerencias permitieron una mejora sustancial de los algoritmos vinculados a la simulación de la cinemática inversa del robot móvil.

Y aquellas otras personas que directa o indirectamente contribuyeron a este trabajo de grado.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA . . . . .	2
1.2. OBJETIVOS . . . . .	3
1.2.1. Objetivo General . . . . .	3
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3. JUSTIFICACIÓN . . . . .	3
1.4. ESTADO DEL ARTE . . . . .	4
<b>2. ROBÓTICA COOPERATIVA</b>	<b>6</b>
2.1. DESARROLLOS PRELIMINARES . . . . .	6
2.2. FUNDAMENTOS DE LA COOPERACIÓN . . . . .	7
2.3. SISTEMAS MULTI-AGENTE (SMA) . . . . .	8
2.3.1. Cooperación en un SMA . . . . .	8
2.3.2. Interacciones al interior de un SMA . . . . .	9
2.3.3. Técnicas de cooperación . . . . .	10
2.3.4. Selección de técnicas según las interacciones . . . . .	11
2.4. PROGRAMACIÓN ORIENTADA A AGENTES (POA) . . . . .	12
2.4.1. Planteamiento del paradigma POA . . . . .	12
2.4.2. Metodologías POA . . . . .	13
2.4.2.1. Gaia . . . . .	13
2.4.2.2. MaSE . . . . .	13
2.4.2.3. MAS-CommonKADS . . . . .	15
<b>3. DISEÑO DEL SISTEMA</b>	<b>17</b>
3.1. DISEÑO MECÁNICO . . . . .	17
3.1.1. Diseño del Manipulador . . . . .	18
3.1.2. Diseño del Chasis Móvil . . . . .	21

3.2. MODELOS CINEMÁTICOS Y DINÁMICOS . . . . .	24
3.2.1. Manipulador . . . . .	24
3.2.1.1. Cinemática directa e inversa . . . . .	24
3.2.1.2. Cinemática diferencial . . . . .	26
3.2.1.3. Dinámica . . . . .	27
3.2.1.4. Validación . . . . .	31
3.2.2. Chasis Móvil . . . . .	32
3.2.2.1. Cinemática directa e inversa . . . . .	32
3.2.2.2. Validación de las cinemáticas . . . . .	34
3.2.2.3. Dinámica . . . . .	36
3.2.2.4. Validación de la dinámica . . . . .	38
3.3. PERCEPCIÓN . . . . .	39
3.3.1. Aplicación de los sensores en la tarea de transporte . . . . .	39
3.3.2. Sensor Inductivo . . . . .	40
3.3.3. Sensor Infrarrojo . . . . .	41
3.3.4. Sensor de Ultrasonido . . . . .	42
3.4. ACTUACIÓN . . . . .	43
3.4.1. Motor paso a paso (deslizador eTrack) . . . . .	44
3.4.2. Motorreductores Faulhaber (ruedas suecas) . . . . .	45
3.4.3. Realimentación mediante encoders . . . . .	48
3.5. OTROS COMPONENTES . . . . .	49
3.5.1. Unidad de control . . . . .	49
3.5.2. Alimentación de los robots . . . . .	50
3.5.3. Estación de recarga de baterías . . . . .	50
3.5.3.1. Etapa de carga . . . . .	51
3.5.3.2. Etapa de testeo . . . . .	52
3.5.4. Estiba y estante . . . . .	52
<b>4. MODELO DE COOPERACIÓN MULTINIVEL . . . . .</b>	<b>54</b>
4.1. ALGORITMO PRELIMINAR DE COOPERACIÓN . . . . .	55
4.2. CARACTERIZACIÓN DEL SMA . . . . .	56
4.2.1. Selección de técnicas de cooperación . . . . .	57
4.3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA POA . . . . .	58
4.3.1. mGaia: Etapa de análisis . . . . .	59
4.3.2. mGaia: Etapa de diseño . . . . .	59

4.3.3. Asociación de sub-modelos obtenidos . . . . .	61
4.4. CONTROL DE BAJO NIVEL . . . . .	62
4.4.1. Movimiento de los agentes (comando C1) . . . . .	62
4.4.2. Posicionamiento del gripper (comando C2) . . . . .	63
4.4.3. Detección en los sensores (comando C5) . . . . .	63
4.4.4. Envío de tramas de datos (comando C6) . . . . .	63
4.5. SEGUIMIENTO DE LA UBICACIÓN . . . . .	64
4.5.1. Consideraciones respecto a la trayectoria . . . . .	65
4.5.2. Seguimiento mediante odometría . . . . .	66
4.6. ALGORITMO FINAL DE COOPERACIÓN . . . . .	66
<b>5. DISEÑO DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN</b>	<b>68</b>
5.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DEL ENTORNO . . . . .	68
5.2. CORRELACIÓN DE LOS SUB-MODELOS DEL SMA . . . . .	70
5.3. DESARROLLO DE LA GUI . . . . .	70
5.3.1. Descripción de las áreas de la GUI . . . . .	71
5.3.2. Representación de los elementos del SMA . . . . .	72
5.3.3. Aproximaciones respecto al comportamiento real . . . . .	73
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>74</b>
6.1. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN . . . . .	74
6.2. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN ACCIONES COOPERATIVAS . . . . .	75
6.3. ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE COOPERACIÓN . . . . .	78
6.4. ANÁLISIS EN TÉRMINOS DEL DISEÑO . . . . .	79
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>86</b>
A.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE SIMMECHANICS . . . . .	86
A.2 CIRCUITOS Y PCB . . . . .	92
A.3 DIAGRAMAS DEL ALGORITMO COOPERATIVO . . . . .	99
A.4 PLANOS DEL DISEÑO MECÁNICO . . . . .	151

# Índice de figuras

2.1. Interacciones Agentes - Ambiente de Trabajo . . . . .	9
2.2. Metodología Gaia . . . . .	14
2.3. Metodología MaSE . . . . .	15
2.4. Metodología MAS-CommonKADS . . . . .	16
3.1. Diagrama de Flujo - Diseño del Manipulador . . . . .	18
3.2. Dimensiones del Perfil de la Canaleta . . . . .	18
3.3. Diseño de los Grippers . . . . .	19
3.4. Libertad de Rotación del Manipulador . . . . .	19
3.5. Diagrama de Cuerpo Libre de la Canaleta . . . . .	20
3.6. Sistema de Tensión del Manipulador . . . . .	20
3.7. Diagrama de Flujo - Diseño del Chasis Móvil . . . . .	21
3.8. Diagrama de Cuerpo Libre para Rueda Sueca . . . . .	22
3.9. Armazón de Protección . . . . .	23
3.10. Vista Isométrica del Robot . . . . .	23
3.11. Diagrama de Flujo - Modelos del Manipulador . . . . .	24
3.12. Diagrama Equivalente del Manipulador . . . . .	25
3.13. Diagrama Detallado del Manipulador . . . . .	27
3.14. Diagrama de Flujo - Modelos del Chasis Móvil . . . . .	32
3.15. Configuración del Chasis Móvil . . . . .	32
3.16. Medición de los Ángulos $\beta$ . . . . .	34
3.17. Relación Geométrica de Velocidades del Chasis . . . . .	37
3.18. Ubicación y Uso de los Sensores de Ultrasonido . . . . .	40
3.19. Diagrama de Bloques del Motorreductor . . . . .	47
3.20. Regulación de Velocidad Mediante Ciclo Útil . . . . .	47
3.21. Puntos Inicial y Final de la Tarea de Transporte . . . . .	52

4.1. Diagrama de Flujo - Modelo de Cooperación Multinivel . . . . .	54
4.2. Versión Preliminar del Algoritmo de Cooperación . . . . .	56
4.3. Fases de la Metodología mGaia . . . . .	58
4.4. Esquema de Viaje de los Agentes (NO a escala) . . . . .	61
4.5. Analogía entre Sub-Modelos y Niveles de Cooperación . . . . .	62
4.6. Ruta Detallada de los Agentes (NO a escala) . . . . .	65
4.7. Algoritmo Principal de los Agentes Cooperativos . . . . .	67
5.1. Entorno de Simulación Propuesto . . . . .	69
5.2. Interfaz Gráfica de Usuario . . . . .	71
5.3. Dibujado de los Robots en el Ambiente Virtual . . . . .	72
5.4. Objetos Adicionales en el Ambiente Virtual . . . . .	73
6.1. Pruebas con Eventos de Interrupción . . . . .	75
6.2. Análisis de la Acción Cooperativa <b>I1</b> . . . . .	76
6.3. Análisis de la Acción Cooperativa <b>I2</b> . . . . .	76
6.4. Análisis de la Acción Cooperativa <b>I3</b> . . . . .	77
6.5. Análisis de la Acción Cooperativa <b>I4</b> . . . . .	77
6.6. Demostración de Coordinación en un Punto Cooperativo Crucial . . . . .	78
6.7. Reportes ante Conflictos Potenciales en el Sistema . . . . .	79
-----	
A.1. Modelo Inicial Importado a SimMechanics . . . . .	88
A.2. Añadir Puertos de Sensores-Actuadores . . . . .	89
A.3. Configuración de Bloques Tipo Actuador . . . . .	89
A.4. Configuración de Bloques Tipo Sensor . . . . .	90
A.5. Doble Integrador para los Actuadores . . . . .	90
A.6. Conexión Completa a las Articulaciones . . . . .	91
A.7. Visualización del Movimiento del Sistema en 3D . . . . .	91
A.8. Circuito de Acople para Sensor Inductivo . . . . .	92
A.9. Circuito de Acople para Sensor Infrarrojo . . . . .	92
A.10.Circuito de Potencia para el Motor Paso a Paso . . . . .	93
A.11.Circuito de Potencia para los Motorreductores Faulhaber . . . . .	93
A.12.Circuito de Acople para los Encoders . . . . .	94
A.13.Esquema de Conexión de las Baterías . . . . .	94
A.14.Circuito de Carga y Testeo . . . . .	95

A.15.Circuito A . . . . .	96
A.16.Circuito B . . . . .	97
A.17.Baquela para Circuito de Carga y Testeo . . . . .	98
A.18.Baquela para Circuito A . . . . .	98
A.19.Baquela para Sensor Infrarrojo . . . . .	98
A.20.Baquela para Circuito B . . . . .	99
A.21.Servicio <b>S3</b> (Detección de Obstáculo) - Primera Parte . . . . .	101
A.22.Servicio <b>S3</b> (Detección de Obstáculo) - Segunda Parte . . . . .	102
A.23.Servicio <b>S4</b> (Cambiar Movimiento) . . . . .	103
A.24.Servicio <b>S5</b> (Comunicación Caída) . . . . .	104
A.25.Servicio <b>S7</b> (Mensaje “Detener” Entrante) . . . . .	105
A.26.Servicio <b>S8</b> (Mensaje “Cambiar” Entrante) . . . . .	106
A.27.Programa Secuencial del Coordinador - Primera Parte . . . . .	107
A.28.Programa Secuencial del Coordinador - Segunda Parte . . . . .	108
A.29.Programa Secuencial del Coordinador - Tercera Parte . . . . .	109
A.30.Interrupción <b>IC</b> del Coordinador (Caída de Comunicación) . . . . .	110
A.31.Acción Cooperativa <b>I1</b> - Primera Parte . . . . .	111
A.32.Acción Cooperativa <b>I1</b> - Segunda Parte . . . . .	112
A.33.Acción Cooperativa <b>I1</b> - Tercera Parte . . . . .	113
A.34.Acción Cooperativa <b>I1</b> - Cuarta Parte . . . . .	114
A.35.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Primera Parte . . . . .	115
A.36.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Segunda Parte . . . . .	116
A.37.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Tercera Parte . . . . .	117
A.38.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Cuarta Parte . . . . .	118
A.39.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Quinta Parte . . . . .	119
A.40.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Sexta Parte . . . . .	120
A.41.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Líder - Séptima Parte . . . . .	121
A.42.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Primera Parte . . . . .	122
A.43.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Segunda Parte . . . . .	123
A.44.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Tercera Parte . . . . .	124
A.45.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Cuarta Parte . . . . .	125
A.46.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Quinta Parte . . . . .	126
A.47.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Sexta Parte . . . . .	127
A.48.Acción Cooperativa <b>I2</b> para Robot Seguidor - Séptima Parte . . . . .	128
A.49.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Primera Parte . . . . .	129

A.50.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Segunda Parte . . . . .	130
A.51.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Tercera Parte . . . . .	131
A.52.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Cuarta Parte . . . . .	132
A.53.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Quinta Parte . . . . .	133
A.54.Acción Cooperativa <b>I3</b> - Sexta Parte . . . . .	134
A.55.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Primera Parte . . . . .	135
A.56.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Segunda Parte . . . . .	136
A.57.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Tercera Parte . . . . .	137
A.58.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Cuarta Parte . . . . .	138
A.59.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Quinta Parte . . . . .	139
A.60.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Sexta Parte . . . . .	140
A.61.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Séptima Parte . . . . .	141
A.62.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Líder - Octava Parte . . . . .	142
A.63.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Primera Parte . . . . .	143
A.64.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Segunda Parte . . . . .	144
A.65.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Tercera Parte . . . . .	145
A.66.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Cuarta Parte . . . . .	146
A.67.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Quinta Parte . . . . .	147
A.68.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Sexta Parte . . . . .	148
A.69.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Séptima Parte . . . . .	149
A.70.Acción Cooperativa <b>I4</b> para Robot Seguidor - Octava Parte . . . . .	150

# Índice de cuadros

2.1. Técnicas de Cooperación en Función de los Tipos de Interacción . . . . .	11
3.1. Parámetros Denavit-Hartenberg del Manipulador . . . . .	25
3.2. Valores de la Dinámica del Manipulador (Calculados mediante CAD) . . . . .	31
3.3. Valores de los Ángulos $\beta$ . . . . .	34
3.4. Valores de la Cinemática del Chasis Móvil . . . . .	34
3.5. Movimientos Comunes del Chasis Móvil . . . . .	35
3.6. Constantes de la Dinámica del Chasis Móvil . . . . .	38
3.7. Parámetros de Selección de la Unidad de Control . . . . .	49
3.8. Consumo Total Máximo del Circuito . . . . .	50
3.9. Indicadores de Carga de Batería . . . . .	52
4.1. Habilidades del Rol <i>Transportador</i> . . . . .	59
4.2. Interacciones entre Agentes . . . . .	59
4.3. Comandos de los Agentes . . . . .	60
4.4. Servicios Disponibles en el SMA . . . . .	60
4.5. Procesos de Comunicación entre Agentes y Coordinador . . . . .	61
4.6. Mensajes de Reporte . . . . .	63
4.7. Mensajes Hacia el Agente Contrario . . . . .	64
4.8. Mensajes de Pregunta . . . . .	64
4.9. Mensajes de Alerta . . . . .	64

## RESUMEN

La Robótica Cooperativa se perfila como una nueva opción para el transporte de objetos de grandes dimensiones, al permitir reemplazar sistemas industriales que requieren una adecuación significativa del espacio de trabajo por agentes robóticos menos intrusivos. Dicha rama de la Robótica e Inteligencia Artificial se beneficia de técnicas y metodologías desarrolladas en el marco de los Sistemas Multi-Agente (SMA) y la Programación Orientada a Agentes (POA).

El análisis y diseño del sistema global conjuga el diseño de dos robots transportadores, compuestos por un chasis móvil omnidireccional y un manipulador de dos grados de libertad, con un modelo de cooperación multinivel fundamentado en una metodología para el diseño de algoritmos orientados a agentes.

Mediante dicho proceso se obtiene el Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC); un conjunto de 3 agentes autómatas (2 transportadores y una unidad coordinadora) dispuestos en una jerarquía centralizada semejante a una organización laboral. Esto permite evaluar el sistema en términos de cada uno de sus niveles constituyentes, los cuales poseen distintas variables y parámetros de desempeño asociados.

El funcionamiento del sistema y los diversos algoritmos que lo componen se evaluó mediante un ambiente virtual. Los resultados son satisfactorios para la aplicación, aunque pueden mejorar con robots más robustos y técnicas/algoritmos más avanzados.

## **ABSTRACT**

Cooperative Robotics shapes up as a new option for large-dimensions object transport, allowing less intrusive robotic agents to replace industrial systems that require significant workspace adaptation. This branch of Robotics and Artificial Intelligence benefits itself with techniques and methodologies developed in the context of Multi-Agent Systems (MAS) and Agent-Oriented Programming (AOP).

The global system's analysis and design combines the design of two transporter robots, composed by an omnidirectional chassis and a two degree of freedom manipulator, with a multilevel cooperation model based on an agent-oriented algorithm design methodology.

By means of this process the Cooperative Robotic Transport System (CRTS) is obtained; a set of 3 automated agents (2 transporters and a coordinator unit) arranged in a centralized hierarchy similar to a labor organization. This allows system evaluation in terms of each of its constituting levels, which possess different associated variables and performance parameters.

System operation and its composing algorithms were evaluated using a virtual environment. Results for the application are satisfactory, although they can improve with more robust robots and more advanced techniques/algorithms.

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El presente capítulo enuncia brevemente la aplicación tratada en el trabajo de grado, así como el área de conocimiento principal en Ingeniería en Mecatrónica que se aplicó en su consecución.

El transporte de objetos de grandes dimensiones es un área que ha recibido considerable atención de la industria de producción masiva. Una aplicación en auge es el diseño y concepción de nuevos sistemas autónomos orientados al transporte de este tipo de objetos en industrias y empresas con menores recursos y volúmenes de producción relativamente reducidos.

La Robótica Cooperativa, como área de la Robótica e Inteligencia Artificial, presenta una serie de ventajas para esta clase de aplicaciones. Se destacan la capacidad de llevar a cabo el mismo volumen de trabajo en un menor tiempo disponiendo de múltiples agentes trabajando de forma simultánea; así como la reducción de costo gracias a un diseño de agentes sencillos en comparación a las soluciones altamente especializadas que se usan en la actualidad.

Adicionalmente, una ventaja implícita de este tipo de sistemas es la capacidad de concebir todos los agentes como una sociedad, en la cual cada uno puede tener su propio conjunto de habilidades, tareas y recursos. Esto facilita el análisis de la eficiencia de los agentes en sus labores como parte de la organización donde se implementan.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un almacén de cadena, en la sección de productos de construcción, se realiza el transporte de canaletas desde el área de bodega hacia el área de estantería, para su posterior venta a la clientela. Dichas canaletas poseen una longitud de 3 m y un peso de 2,16 kg, lo cual impide que sean transportadas por una sola persona.

Dicho inconveniente a la vez se extiende al considerar otros métodos de transporte, puesto que la longitud de las canaletas impide el uso de mecanismos tales como bandas transportadoras e implica el uso de sistemas de alto costo como son los montacargas, los cuales son inconvenientes en sitios de alta concurrencia de personas por motivos de seguridad.

El uso de un único sistema autónomo como un robot mantiene un costo prohibitivo, dados los componentes requeridos para el transporte de este tipo de cargas. Es aquí donde la Robótica Cooperativa se convierte en una ventaja, al reemplazar un único robot por un conjunto de 2 robots homogéneos con un diseño de mayor simplicidad y componentes de menor costo.

Al usar metodologías bajo esta área del conocimiento, los algoritmos obtenidos garantizan la coordinación y comunicación entre ambos robots; los mismos procesos que realizan los trabajadores humanos al transportar estos objetos.

En esencia, la Robótica Cooperativa permite a los agentes emular la forma en la cual la tarea es realizada por los trabajadores humanos, factor que se refleja a lo largo de las etapas de análisis, diseño y simulación.

El resultado final es un sistema cuyo comportamiento y desempeño puede analizarse tanto desde el punto de vista de la ingeniería como de la producción y organización laboral-social.

Esto facilita a los trabajadores una mayor comprensión del sistema final con el cual interactúan sin requerir amplios conocimientos en ingeniería. Por extensión, la productividad aumenta al permitir asignar los trabajadores a tareas de mayor importancia y crecimiento personal.

## **1.2. OBJETIVOS**

Los objetivos de este trabajo fueron propuestos en pos de la identificación y separación de cada una de las etapas principales involucradas en su desarrollo, por lo tanto comprenden las fases de análisis, modelado, diseño, simulación y evaluación de los resultados.

### **1.2.1. Objetivo General**

Diseñar y simular un sistema de transporte y manipulación de canaletas basado en agentes (robots) móviles cooperativos para las instalaciones de un almacén de cadena.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Obtener el modelo cinemático-dinámico y diseñar un robot compuesto por un manipulador de 2 grados de libertad (DOF) y un chasis móvil con 3 grados de maniobrabilidad.
- Desarrollar un ambiente virtual para poner a prueba el funcionamiento de los robots cooperativos.
- Diseñar el algoritmo de inteligencia cooperativa para controlar el desempeño de los robots en el ambiente virtual.
- Diseñar el algoritmo para el seguimiento de la ubicación de los robots en el espacio de trabajo.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La Robótica Cooperativa es un área de la Robótica relativamente nueva en el contexto latinoamericano, dentro del cual se han realizado varios desarrollos enfocados a los aspectos individuales que la componen, tales como los mecanismos de cooperación, el hardware y las metodologías de programación, así como la simulación de estas facetas por separado.

El aporte del presente trabajo de grado, en concordancia con la naturaleza de la Ingeniería en Mecatrónica, es la integración y correlación de dichos aspectos individuales en una única aplicación, permitiendo evaluar y optimizar el desempeño global del sistema con base a los diversos subsistemas que lo componen.

Su desarrollo profundiza en conceptos avanzados tales como el modelado dinámico de sistemas robóticos por energías y la representación de los mismos mediante la Programación Orientada a Objetos, temas vistos de forma breve a lo largo del pregrado. El presente trabajo se constituye como una plataforma base, un punto de inicio cuyos resultados incentivan la aplicación de conceptos más avanzados en trabajos futuros.

## **1.4. ESTADO DEL ARTE**

El proyecto AGS-AOPOA<sup>1</sup> desarrollado por Ahogado, Reinemer y González en conjunto con ETB es una de las primeras aplicaciones de un Sistema Multi-Agente (SMA) en Colombia. Concebido como un software para gestión de servidores, cada servidor es representado como un agente, con un conjunto de recursos y habilidades a su disposición. Dicha representación facilita a los usuarios comprender el funcionamiento del sistema como una abstracción social y administrarlo como tal. Los resultados del proyecto demostraron la utilidad de un Sistema Multi-Agente y la Programación Orientada a Agentes (POA) en la reducción de costos en los procesos productivos de ETB.

KIVA Systems<sup>2</sup> ha implementado enjambres de robots organizadores de estantería en diversos centros de distribución. El sistema hace uso de una unidad central que coordina el movimiento en una bodega de todos los robots, cada uno de los cuales lleva un estante con diversos productos. El uso de un gran número de robots trabajando en conjunto reduce sustancialmente los tiempos de ejecución de procesos tales como organización y abastecimiento al cambiar de forma dinámica la distribución de los estantes. Adicionalmente, el diseño homogéneo de los robots garantiza un sistema más robusto al reemplazar cualquier agente ineficiente o defectuoso con un nuevo robot sin interrumpir el flujo de trabajo.

---

<sup>1</sup>GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 11-12.

<sup>2</sup>KIVA Mobile-robotic Fulfillment System. KIVA Systems. Disponible en: <http://www.kivasystems.com>

Brown y Jennings<sup>3</sup> desarrollaron un modelo de tipo “Pusher/Steerer” para la manipulación y transporte de objetos de grandes dimensiones. El sistema se compone por dos robots; el primero (“Pusher”) empuja el objeto a transportar sin información adicional y el segundo (“Steerer”) conoce la trayectoria a realizar y se encarga de ajustar la orientación del objeto. Puesto que los robots deben coordinar sus acciones para llevar el objeto a través de trayectorias complejas, partiendo de las propiedades del objeto a transportar (geometría, propiedades de material, masa y distribución de la misma), se demostró la capacidad de establecer un modelo de cooperación fundamentado en la cinemática y dinámica del objeto en conjunto con la cinemática y dinámica de ambos robots.

---

<sup>3</sup>BROWN, Russell G. JENNINGS, James S. A Pusher/Steerer Model for Strongly Cooperative Mobile Robot Manipulation. *En* : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. p. 562. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525941>

# Capítulo 2

## ROBÓTICA COOPERATIVA

Este capítulo realiza un acercamiento a los diversos elementos teóricos relacionados con el sistema en el cual se centra el presente trabajo, así como los conceptos, teorías y principios involucrados en el enfoque que se seleccionaron para brindar solución al problema planteado.

### 2.1. DESARROLLOS PRELIMINARES

La Robótica concierne el estudio de aquellas máquinas que pueden reemplazar a un ser humano en la ejecución de una tarea, tanto en actividades físicas como en la toma de decisiones. Se estudia la conexión inteligente entre percepción y acción. Craig<sup>1</sup> resalta que la robótica en la industria comienza a ser identificable en la década de 1960, como una de las nuevas implementaciones en el campo de automatización industrial.

La connotación de un robot para aplicaciones industriales es la de operación en un ambiente estructurado en el cual la mayoría de las características geométricas o físicas se conocen de antemano. Se introduce el uso de los manipuladores, conformados por una serie de cuerpos rígidos (links) interconectados mediante articulaciones (joints). Un manipulador se caracteriza por un brazo que asegura movilidad, una muñeca que confiere destreza, y un efector final que realiza la tarea requerida.

---

<sup>1</sup>CRAIG, John J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Segunda Edición. Addison - Wesley. EE.UU, 1989. p. 1.

Con las primeras incursiones de la robótica en las aplicaciones de servicio, aparece un requerimiento de capacidades extensas de movimiento autónomo, lo cual lleva al desarrollo de la Robótica Móvil. Su principal característica es la presencia de una base móvil la cual permite al robot moverse libremente en el entorno. Desde un punto de vista mecánico, un robot móvil consiste de uno o más cuerpos rígidos equipados con un sistema de locomoción.

Al explorarse nuevas metodologías para la utilización de robots, aparece la Robótica Cooperativa, en la cual se tiene un grupo de robots capaces de planificar y ejecutar tareas complejas cooperando entre sí. Cada robot en el grupo posee “interrelación” con sus compañeros cuando éstos requieren su apoyo o cuando hace una solicitud de ayuda.

## **2.2. FUNDAMENTOS DE LA COOPERACIÓN**

El comportamiento cooperativo es definido de la siguiente forma por Cao, Fukunaga y Kahng: “Dada una tarea especificada por un diseñador, un sistema de múltiples robots demuestra un comportamiento cooperativo si, debido a algún mecanismo interno, hay un aumento en la utilidad total del sistema”<sup>2</sup>. En dichas aplicaciones, el proceso de distribución se enfoca hacia la coordinación de un grupo que realiza tareas afines, mediante la resolución de subproblemas y la integración de los resultados para obtener una solución global del problema.

Algunas de las tareas principales que se afrontan con este enfoque son el control de tráfico, manipulación cooperativa (se destaca el problema de “empuje de cajas”), búsqueda de objetos esparcidos en el ambiente, sistemas de seguridad, detección y limpieza de minas antipersona, sistemas robóticos de soporte estructural, generación de mapas y ensamblado usando múltiples robots. La realización de un comportamiento cooperativo se basa en una infraestructura llamada la arquitectura de grupo. Es necesario un mecanismo para resolver conflictos de recursos, los cuales se presentan cuando múltiples robots habitan un ambiente compartido, manipulan objetos en dicho ambiente y requieren comunicarse entre sí.

---

<sup>2</sup>CAO, Y. Uny; FUKUNAGA, Alex S. y KAHNG, Andrew B. Cooperative Mobile Robotics; Antecedents and Directions. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. p. 2. Disponible en: <http://www.ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525801>

Por orígenes de la cooperación se denota a las similitudes que se presentan con la cooperación en la Biología. La implementación de aprendizaje se hace vital para generar adaptabilidad y flexibilidad en un grupo de robots que resuelven una tarea. Adicionalmente, se debe tener prevención con los problemas geométricos, en los cuales se contempla la planificación de trayectorias, formaciones y generación de patrones con base en un espacio bidimensional o tridimensional.

## **2.3. SISTEMAS MULTI-AGENTE (SMA)**

La definición de Agente posee diferentes connotaciones según el campo de estudio, sin embargo, una definición destacable en el campo de Inteligencia Artificial fue propuesta por Russell y Norvig<sup>3</sup>, según la cual un agente es una entidad capaz de percibir el ambiente en el que se encuentra mediante sensores y actuar sobre el mediante actuadores. Adicionalmente, afirman que dicho agente es racional si actúa de forma correcta (su desempeño en función de sus objetivos es óptimo).

Con base en lo anterior, Ferber<sup>4</sup> define un Sistema Multi-Agente como unos conjuntos de objetos y agentes (los únicos capaces de actuar) al interior de un ambiente, así como un conjunto de relaciones entre dichas entidades y un conjunto de acciones posibles que pueden generar cambios al ambiente a lo largo del tiempo.

### **2.3.1. Cooperación en un SMA**

Sin entrar a analizar si es una intención explícita o no de los agentes, Ferber<sup>5</sup> enuncia que la cooperación se presenta cuando el estado del sistema mejora gracias a la resolución de conflictos potenciales entre agentes; esto es posible mediante distribución de tareas, funciones especializadas y/o negociación, todas las cuales se basan en procesos de comunicación. Por lo tanto, la Robótica Cooperativa clasifica con facilidad como un Sistema Multi-Agente, puesto que se presentan relaciones en la medida que los robots interactúan entre sí para llevar a cabo sus objetivos.

---

<sup>3</sup>RUSSELL, Stuart y NORVIG, Peter. Artificial Intelligence; A Modern Approach. Tercera Edición. Pearson Education. EE.UU., 2010. p. 34-37.

<sup>4</sup>FERBER, Jacques. Les Systèmes Multi-Agents; Vers une Intelligence Collective. Inter Editions, 1995. p. 14. Disponible en: [http://www.lirmm.fr/~ferber/publications/LesSMA\\_Ferber.pdf](http://www.lirmm.fr/~ferber/publications/LesSMA_Ferber.pdf)

<sup>5</sup>Ibid., p. 56.

Aunque cada robot de manera individual es un agente racional, una característica distintiva de la Robótica Cooperativa es que el desempeño de los robots en la realización de sus tareas mejora al introducir la cooperación entre todos, ya sea de forma directa o indirecta.

### 2.3.2. Interacciones al interior de un SMA

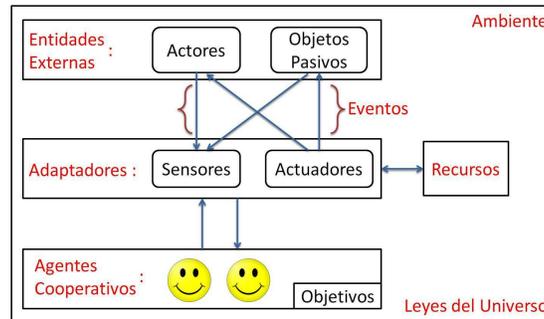


Figura 2.1: Interacciones Agentes - Ambiente de Trabajo

Fuente: Adaptada de GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 24.

Al analizar las formas en las cuales los agentes interactúan con su ambiente de trabajo, Pérez y Cruz<sup>6</sup> realizan la caracterización de la Figura 2.1, en la cual se denotan los diferentes elementos que conforman el sistema. Los elementos nuevos se definen como sigue:

- **Actores:** También denominados objetos activos, son entidades distintas a los agentes cooperativos capaces de cambiar su estado o el estado del ambiente. Un ejemplo común son personas que pueden aparecer esporádicamente en el ambiente de trabajo.
- **Objetos Pasivos:** Contrario a los actores, ésta clase de objetos solo pueden cambiar su estado o el estado del ambiente al ser actuados por un agente.
- **Eventos:** Cualquier clase de cambio en el estado del ambiente. La comunicación entre agentes clasifica como evento dado que se presenta una adquisición de información.

<sup>6</sup>PÉREZ, Adith y CRUZ, Juan David. Agentes Racionales. En : GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 22-24.

Evaluando la arquitectura interna del agente, Russell y Norvig<sup>7</sup> describen agentes de reflejo simple (actuar bajo la percepción actual), agentes basados en modelos (actuar según un historial de percepciones), agentes basados en metas (planificar un curso de acción según objetivos deseables) y agentes basados en utilidad (actuar para maximizar una función de utilidad o desempeño).

Cuando los objetivos de los agentes son compatibles entre sí, la disponibilidad de recursos y habilidades desemboca en cuatro tipos de interacciones según Ferber<sup>8</sup>: Independencia (recursos y habilidades suficientes), Colaboración Simple (recursos suficientes, habilidades insuficientes), Obstrucción (recursos insuficientes, habilidades suficientes) o Colaboración Coordinada (recursos y habilidades insuficientes).

### **2.3.3. Técnicas de cooperación**

Pérez y Cruz<sup>9</sup> definen la colaboración como la forma en la cual se delegan las tareas necesarias entre los agentes. Para tal efecto se pueden establecer jerarquías análogas a los ambientes laborales del mundo real denominadas distribuciones, las cuales pueden ser estáticas o sujetas a cambio en función del estado del sistema o se pueden implementar mecanismos de asignación basados en las diversas capacidades de los agentes.

Para ciertos sistemas pueden existir acciones las cuales requieran coordinación entre los agentes debido a su complejidad o al flujo de trabajo del sistema. Ferber<sup>10</sup> propone cuatro mecanismos que permiten a los agentes entablar coordinación: Sincronización, Planeación, Reglamentación y Coordinación Reactiva.

De forma análoga al mundo real, un sistema en el cual los recursos son limitados lleva al surgimiento de conflictos entre agentes. Según Pérez y Cruz<sup>11</sup>, su resolución puede llevarse a cabo mediante técnicas como Arbitramiento, Negociación, Uso de Regulaciones, Priorización de Objetivos y Jerarquización de Agentes.

---

<sup>7</sup>RUSSELL y NORVIG. Op. cit., p. 47-54.

<sup>8</sup>FERBER. Op. cit., p. 70.

<sup>9</sup>PÉREZ y CRUZ. Op. cit., p. 35-36.

<sup>10</sup>FERBER. Op. cit., p. 423-425.

<sup>11</sup>PÉREZ y CRUZ. Op. cit., p. 39.

Un elemento frecuentemente relacionado con los Sistemas Multi-Agentes es la concurrencia. Cleaveland y Smolka<sup>12</sup> dicen que cuando múltiples agentes interactúan entre sí, la concurrencia surge a fin de analizar reacciones o interacciones indeseadas o no planificadas. Es importante notar que un programa compuesto por un grupo de subprogramas secuenciales que se ejecutan al mismo tiempo puede ser considerado un programa concurrente.

### 2.3.4. Selección de técnicas según las interacciones

Tipo de Interacción	Técnica		
	Colaboración	Coordinación	Resolución de Conflictos
Independencia	No aplica	No aplica	No aplica
Colaboración Simple	Centralizada jerárquica Centralizada por intermediario Red de agentes conocidos <i>Contract Net</i>	Sincronización Planeación	No aplica
Obstrucción	No aplica	Planeación Regulación	Arbitramiento Uso de regulaciones Priorización de objetivos Jerarquización de agentes
Colaboración Coordinada	Centralizada por intermediario Red de agentes conocidos <i>Contract Net</i>	Sincronización Planeación	Arbitramiento Uso de regulaciones Priorización de objetivos Jerarquización de agentes Negociación

Cuadro 2.1: Técnicas de Cooperación en Función de los Tipos de Interacción

Fuente: Adaptada de GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 43.

Reuniendo todas las facetas enunciadas para la cooperación, Pérez y Cruz<sup>13</sup> plantean la clasificación del Cuadro 2.1 como una guía de selección de técnicas para colaboración,

<sup>12</sup>CLEAVELAND, Rance y SMOLKA, Scott A. Concurrency Working Group Report. En : ACM Workshop on Strategic Directions in Computing Research. EE.UU., 1996. Disponible en: <http://www.cs.sunysb.edu/~sas/sdcr/report/final/final.html>

<sup>13</sup>PÉREZ y CRUZ. Op. cit., p. 42-43.

coordinación y resolución de conflictos según el tipo de interacción al diseñar un Sistema Multi-Agente. Finalmente, Pérez y Cruz<sup>14</sup> proponen un modelo de cooperación multinivel relacionado a los grados de abstracción de sus elementos constituyentes.

El SMA corresponde al nivel superior, en el cual se toman decisiones de comportamiento cooperativo con base al objetivo global. La microsociedad es el nivel intermedio, en la cual se forman subconjuntos de agentes con objetivos comunes y se implementan las técnicas enunciadas en el Cuadro 2.1. Finalmente, el rol corresponde al nivel inferior, donde se definen las características específicas de cada agente en función de sus capacidades de percepción, actuación y razonamiento.

## **2.4. PROGRAMACIÓN ORIENTADA A AGENTES (POA)**

Puesto que la totalidad de las nociones que aparecen en un Sistema Multi-Agente (SMA) se fundamentan en el concepto de agente, el desarrollo de mecanismos computacionales para el análisis y diseño de SMA con los agentes como su unidad base fue un paso primordial en la evolución de esta área de la Inteligencia Artificial.

### **2.4.1. Planteamiento del paradigma POA**

Yoav Shoham<sup>15</sup> propuso en 1989 el paradigma de la Programación Orientada a Agentes (POA), la cual describe como un marco especializado de la Programación Orientada a Objetos (POO) al representar el “estado mental” de un agente en términos de creencias, capacidades, elecciones y compromisos.

Aunque no posee el amplio reconocimiento de la Programación Orientada a Objetos, Torres y Cantor<sup>16</sup> enuncian que la Programación Orientada a Agentes posee elementos atractivos para aplicaciones de software complejas en términos del uso de recursos, concurrencia y autonomía.

---

<sup>14</sup>Ibid., p. 45.

<sup>15</sup>SHOHAM, Yoav. An Overview of Agent-Oriented Programming. En : BRADSHAW, Jeffrey. Software Agents. The MIT Press. EE.UU., 1997. p. 273. Disponible en: <http://www.infor.uva.es/~cllamas/MAS/AOP-Shoham.pdf>

<sup>16</sup>TORRES, Miguel Eduardo y CANTOR, Oskar Javier. Metodologías POA. En : GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 51.

## 2.4.2. Metodologías POA

Se han planteado diversas metodologías para el desarrollo de software basado en el paradigma POA, cada una con sus propias ventajas y debilidades en correlación al número de elementos adoptados del marco original. Alonso *et al*<sup>17</sup> clasifican las metodologías POA bajo 3 categorías principales:

- Tecnológicamente basadas en agentes (abstracciones sociales)
- Basadas en técnicas de Programación Orientada a Objetos
- Basadas en el paradigma de la Ingeniería del Conocimiento

A continuación se analizan brevemente algunas de las principales exponentes en cada una de estas categorías.

### 2.4.2.1. Gaia

La metodología Gaia propuesta por Zambonelli, Jennings y Woolridge<sup>18</sup> analiza sistemas visualizándolos como una organización o sociedad computacional y se centra en producir un conjunto de modelos e interrelaciones que representan factores vitales para esta “sociedad” tales como roles, reglas y metas.

Al combinar estos modelos e interrelaciones con la estructura organizacional que el diseñador escoja, surgen una serie de clases predeterminadas que definen plenamente a los agentes; así como una serie de variables y funciones asociadas a los servicios que pueden brindar. El proceso de diseño según Gaia se ilustra en la Figura 2.2.

### 2.4.2.2. MaSE

DeLoach y Wood<sup>19</sup> proponen MaSE como una metodología en la cual los agentes se reducen a objetos especializados. Dicha distinción permite implementar esta

---

<sup>17</sup>ALONSO, Fernando *et al.* SONIA: A Methodology for Natural Agent Development. ESAW'04 - Fifth International Workshop on Engineering Societies in the Agents World, 2004. p. 4-5. Disponible en: [http://www.irit.fr/ESAW04/PAPERS/ESAW04\\_Paper9.pdf](http://www.irit.fr/ESAW04/PAPERS/ESAW04_Paper9.pdf)

<sup>18</sup>ZAMBONELLI, Franco; JENNINGS, Nicholas R. y WOOLDRIDGE, Michael. Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology. *En* : ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. Vol. 12. No. 3 (Jul. 2003); p. 335-337.

<sup>19</sup>DELOACH, Scott A. y WOOD, Mark F. Multiagent Systems Engineering: the Analysis Phase. Technical Report. Air Force Institute of Technology, 2000. p. 2. Disponible en: <http://people.cis.ksu.edu/~sdeloach/publications/TechReports/AFIT%20EN-TR-00-02.pdf>

metodología en una amplia variedad de lenguajes de programación, arquitecturas y plataformas de comunicación. A partir de las especificaciones iniciales del sistema se producen una serie de modelos en formato gráfico, los cuales permiten al usuario realizar las etapas de análisis, diseño e implementación y se caracterizan por la facilidad de seguimiento de cambios.

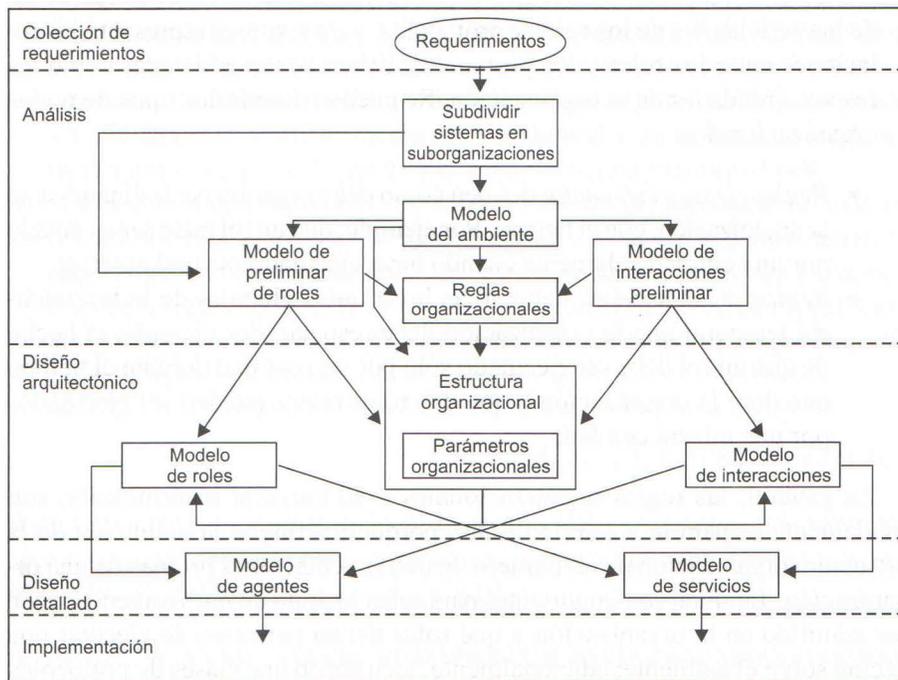


Figura 2.2: Metodología Gaia

Fuente: Tomada de GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007. p. 73.

El esquema del proceso según MaSE se presenta en la Figura 2.3, cuyas 7 fases son:

1. Captura de Metas
2. Aplicación de Casos de Uso
3. Refinamiento de Roles
4. Creación de Clases de Agentes
5. Construcción de Conversaciones
6. Ensamblaje de Clases de Agentes

## 7. Diseño del Sistema

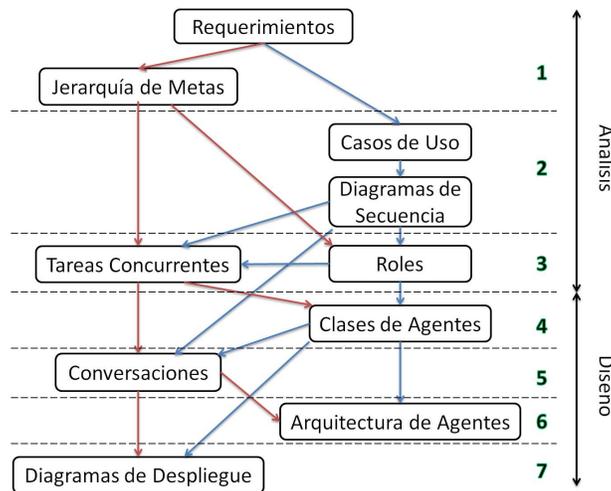


Figura 2.3: Metodología MaSE

Fuente: Adaptada de DELOACH, Scott A. y WOOD, Mark F. Multiagent Systems Engineering: the Analysis Phase. Technical Report. Air Force Institute of Technology, 2000. p. 3.

### 2.4.2.3. MAS-CommonKADS

Finalmente, Iglesias *et al*<sup>20</sup> crearon la metodología MAS-CommonKADS para extender el alcance de la metodología CommonKADS propuesta por Guus Schreiber a los Sistemas Multi-Agente. Schreiber<sup>21</sup> afirma que un sistema descrito en términos del conocimiento posee una estructura interna estable, por lo cual CommonKADS busca modelarlo en términos de la organización, las tareas y los agentes.

A medida que se progresa en la metodología, estos 3 aspectos se convierten en modelos de conocimiento y comunicación, que eventualmente se unifican en un modelo de diseño. Como se observa en la Figura 2.4, MAS-CommonKADS amplía el marco previo al agregar un séptimo modelo correspondiente al aspecto de coordinación<sup>22</sup>.

<sup>20</sup>IGLESIAS, Carlos A. *et al*. Analysis and Design of Multiagent Systems Using MAS-CommonKADS. En : WOOLRIDGE, Michael J; RAO, Anand y SINGH, Munindar Paul. Intelligent Agent IV: Agent Theories, Architectures and Languages. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. Alemania, 1998. p. 2. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.104.717>

<sup>21</sup>SCHREIBER, Guus. Knowledge Engineering and Management: the CommonKADS Methodology. MIT Press. EE.UU., 2000. p. 18. Disponible en: [http://books.google.com.co/books/about/Knowledge\\_engineering\\_and\\_management.html?id=HIXOW\\_1fsIEC&redir\\_esc=y](http://books.google.com.co/books/about/Knowledge_engineering_and_management.html?id=HIXOW_1fsIEC&redir_esc=y)

<sup>22</sup>IGLESIAS *et al*. Op. cit., p. 6.

Al denotar las interacciones, protocolos y capacidades que los agentes comunican entre sí al realizar tareas de índole coordinada, el modelo de coordinación permite una representación más exacta del Sistema Multi-Agente, lo cual a su vez resulta en técnicas de cooperación más robustas al obtener el modelo unificado de diseño.

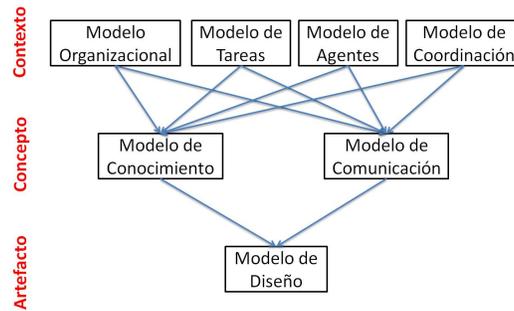


Figura 2.4: Metodología MAS-CommonKADS

Fuente: Adaptada de SCHREIBER, Guus. Knowledge Engineering and Management: the CommonKADS Methodology. MIT Press. EE.UU., 2000. p. 18.

# Capítulo 3

## DISEÑO DEL SISTEMA

Este capítulo abarca las diferentes etapas desarrolladas durante el diseño del Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC) y los componentes adicionales que se requerirían para su puesta en funcionamiento.

El SRTC está compuesto por una serie de subsistemas de diversa naturaleza (mecánicos, electrónicos, etc...); por ende el capítulo se divide en secciones que recopilan los subsistemas orientados a una función común (estructura física, percepción, actuación, etc...). Adicionalmente, se destina una sección para los modelos cinemáticos y dinámicos, dado que su proceso de análisis y validación es extenso.

### 3.1. DISEÑO MECÁNICO

Los dos (2) robots cooperativos del SRTC poseen un diseño análogo, en el cual la única diferencia entre ambos agentes es el lado al cual se ubica el cierre del gripper (efector final) en cada manipulador, basado en la posición de cada agente respecto a la canaleta durante el transporte.

El manipulador y el chasis móvil son los dos únicos subsistemas de naturaleza parcialmente mecánica. El diseño de cada uno se detalla por aparte, con base en los parámetros y variables físicas relacionados a sus correspondientes funciones.

### 3.1.1. Diseño del Manipulador

El diseño del manipulador sigue los pasos que se presentan en el diagrama de flujo de la Figura 3.7.

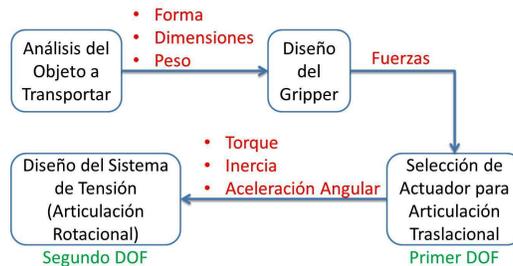


Figura 3.1: Diagrama de Flujo - Diseño del Manipulador

En primer lugar, las canaletas que se desea transportar corresponden al modelo “Canaleta Raingo PAVCO”<sup>1</sup> y su material es PVC rígido. Como parámetros, se tienen la longitud de la canaleta, con un valor de 3 m; así como la forma y dimensiones del perfil, ilustradas en la Figura 3.2.

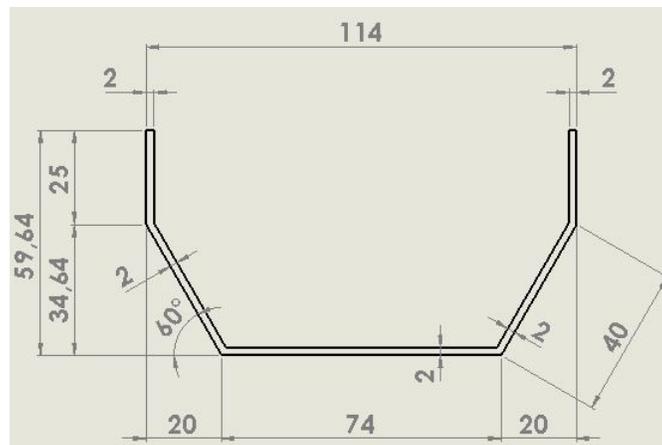


Figura 3.2: Dimensiones del Perfil de la Canaleta

Se opta por un diseño simple para los grippers en el cual una placa de dimensiones mayores actúa como base fija (principio similar a los montacargas) y una placa de dimensiones menores acoplada a un eje actúa como un pulgar o cierre, sujetando la canaleta en su cara interna. Se transmite movimiento al eje mediante un par de engranes

<sup>1</sup>Tubosistemas de Construcción. Manual Técnico. PAVCO. p. 50. Disponible en: [http://pavco.com.co/files/data/20120116150710\\_s.pdf](http://pavco.com.co/files/data/20120116150710_s.pdf)

y un micromotor DC, como se demuestra en la Figura 3.3. Se puede apreciar la diferencia en la ubicación del cierre de cada gripper. La imagen izquierda corresponde al gripper del robot líder o delantero del convoy y la imagen derecha corresponde al gripper del robot seguidor o trasero.

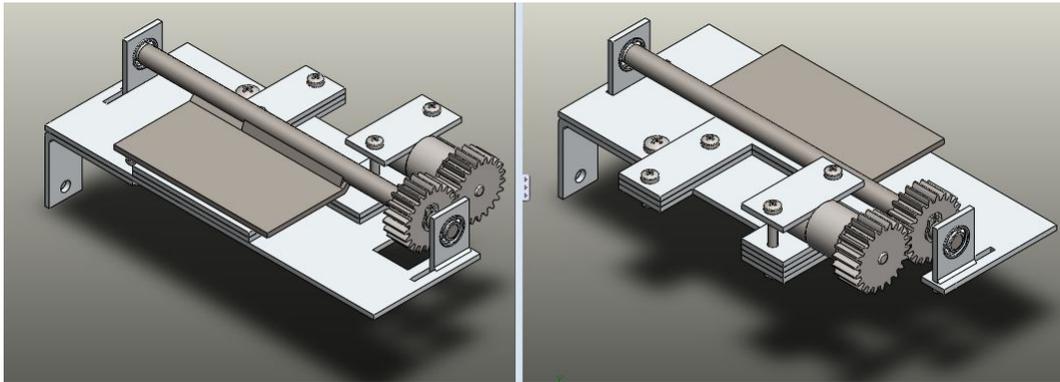


Figura 3.3: Diseño de los Grippers

El manipulador requiere 2 grados de libertad, de los cuales uno está destinado a la realización de movimientos verticales y el otro brinda al manipulador la capacidad de rotar levemente sobre su eje (dicha rotación únicamente se permite mientras se realizan las trayectorias entre los puntos inicial y final). Lo anterior se hace con el fin de brindar a los agentes un mayor rango de movilidad sin doblar o dañar la canaleta, como se ilustra en la Figura 3.4.

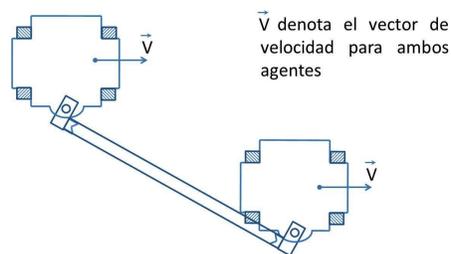


Figura 3.4: Libertad de Rotación del Manipulador

El primer paso consiste en hallar el peso que el manipulador debe levantar en forma vertical. La canaleta posee una masa de 2,16 kg, la cual se asumirá se distribuye de manera uniforme respecto a un centro de masa. La Figura 3.5 presenta el diagrama de cuerpo libre indicando la ubicación de las fuerzas que actúan sobre la canaleta (el peso  $mg$  y las fuerzas ejercidas por ambos agentes  $Ft_1$  y  $Ft_2$ ), las cuales se calculan en la Ecuación 3.1.

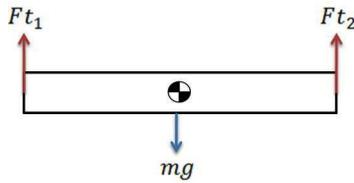


Figura 3.5: Diagrama de Cuerpo Libre de la Canaleta

$$\sum F = F_{T1} + F_{T2} - mg = 0$$

$$mg = (2,16 \text{ kg}) (9,81 \text{ m/s}^2) = 21,1896 \text{ N} \quad (3.1)$$

$$F_{T1} = F_{T2} = \frac{mg}{2} = 10,5948 \text{ N}$$

Por lo tanto, los actuadores en los brazos deben ejercer una fuerza de 10,5948 N para sostener la canaleta, y una fuerza superior para elevarla verticalmente. Retrocediendo a unidades de masa, esto equivale a 1,08 kg. Se propone usar como articulación traslacional el deslizador “eTrack Linear Stage”<sup>2</sup> de Newmark Systems, el cual posee un rango de movimiento de 300 mm y una masa de 1,6 kg. Dicho actuador se complementa con una base de acople al eje de la articulación rotacional libre.

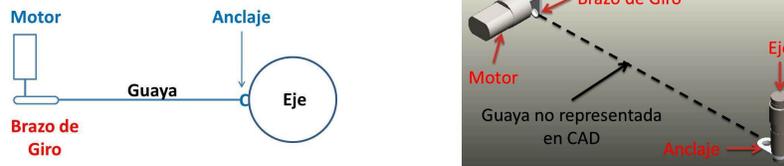


Figura 3.6: Sistema de Tensión del Manipulador

El sistema de la Figura 3.6 mantiene el manipulador en su orientación central durante las etapas de actuación (recolección/descarga de canaletas). El eje de la articulación rotacional posee un anclaje a su costado; al usar un motor acoplado a un brazo de giro, se tensa la guaya unida a dicho anclaje y por consiguiente se bloquea la rotación. Dado que el eje y la base de acople del deslizador son apoyados por un conjunto de rodamientos, el único requisito del actuador de tensión es vencer la inercia del manipulador a fin de generar el momento de torsión. La sumatoria de torques está dada por  $\tau_A - I_{total}\alpha = 0$ , donde  $\tau_A$  es el torque requerido en el actuador,  $I_{total}$  es la inercia del manipulador y  $\alpha$  es su aceleración angular.

<sup>2</sup>eTrack Low Cost Linear Stage. Newmark Systems. Disponible en: <http://www.newmarksystems.com/linear-positioners/etrack/>

No se requiere una aceleración elevada al mover el eje, por lo tanto se tomará  $2\pi \text{ rad/s}^2$ . Tomando en cuenta la masa conocida de la canaleta y la articulación traslacional, y sumando la masa aún no conocida del eje y acople, se supone una inercia total elevada de  $0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Por lo tanto, el actuador de tensión debe ser un motor capaz de ejercer un torque continuo de  $63 \text{ mN} \cdot \text{m}$  como mínimo.

### 3.1.2. Diseño del Chasis Móvil

Para el diseño del chasis móvil se siguen los pasos indicados en el diagrama de flujo de la Figura 3.7.



Figura 3.7: Diagrama de Flujo - Diseño del Chasis Móvil

Dado que se desea que el sistema tenga 3 grados de maniobrabilidad, un método efectivo es el uso de ruedas omnidireccionales. Por consideraciones de masa y precio, se seleccionan ruedas suecas “FingerTech Mecanum Wheels”<sup>3</sup>, las cuales poseen las siguientes características:

- **Diámetro:**  $2,125'' = 53,975 \text{ mm}$
- **Material:** Delrin (acople), Aluminio (rin), EPDM (rodillos)
- **Masa:** 52 g por rueda
- **Capacidad:** Hasta 13 kg de masa total del robot
- **Coefficiente de Fricción:**  $0,6 = \mu_e(\text{estático})$

<sup>3</sup>FingerTech Mecanum Wheels (set of 4) – Competition Grade. FingerTech Robotics. Disponible en: <http://www.fingertechrobotics.com/proddetail.php?prod=ft-mecanum-set-cg>

- **Diámetro para Eje:** 3 mm (taladrable hasta  $1/4'' = 6,35$  mm)

Para hallar el torque requerido, se formula el diagrama de cuerpo libre de la Figura 3.8. La sumatoria de torques correspondiente se describe mediante la Ecuación 3.2, donde  $\tau_m$  es el torque del motor,  $\tau_{fr}$  es el torque causado por la fuerza de fricción  $F_r$ ,  $I$  es la inercia de la rueda y  $\alpha$  es su aceleración angular.

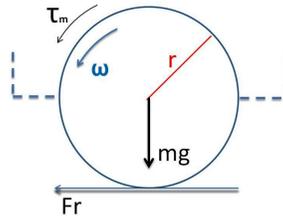


Figura 3.8: Diagrama de Cuerpo Libre para Rueda Sueca

$$\sum \tau = I\alpha = \tau_m - \tau_{fr} = \tau_m - (r * \mu_e * mg) \quad (3.2)$$

Para imprimir movimiento al sistema ( $I\alpha > 0$ ), se obtiene que  $\tau_m$  debe ser mayor a  $\tau_{fr}$ . En este caso, la fuerza normal es igual al peso que recae sobre la rueda, es decir, el peso de la rueda más la cuarta parte del peso total del robot. Se asume que una vez completo, el robot tiene una masa de 10 kg (incluyendo la masa de la canaleta, la cual se reparte entre los dos robots durante el transporte), por lo cual  $m = 10/4$  kg = 2,5 kg. Se procede a despejar  $\tau_{fr}$  en la Ecuación 3.3. El valor obtenido es el  $\tau_m$  mínimo requerido, por lo tanto se toma  $\tau_m = 425$  mN \* m [mili-Newton por metro].

$$\tau_{fr} = (0,02698775 \text{ m}) (0,6) (2,5 \text{ kg}) (9,81 \text{ m/s}^2) = 0,397 \text{ N} * \text{m} = 397 \text{ mN} * \text{m} \quad (3.3)$$

Dado que la tarea de transporte transcurre al interior de un ambiente laboral, se requiere proteger los elementos de los circuitos, comunicación y batería, así como los demás componentes que se encuentran sobre el chasis. Se sugiere la fabricación de un armazón de encierre usando láminas de aluminio con 2 mm de grosor, como se muestra en la Figura 3.9.

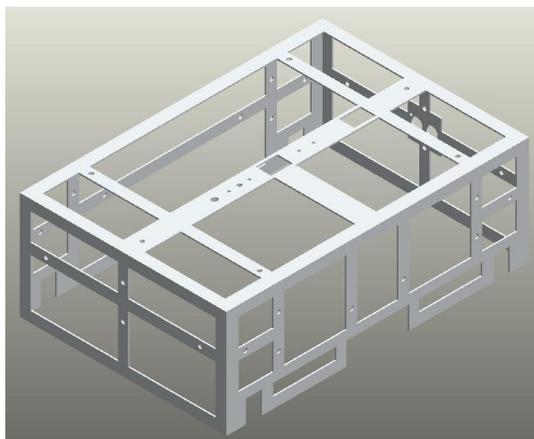


Figura 3.9: Armazón de Protección

Las caras verticales del armazón se sujetan mediante pies de amigo de aluminio, lo cual permite desarmar la estructura si se requiere acceso a los componentes protegidos. Adicionalmente, sus dimensiones permiten resguardar componentes que inevitablemente se ubican bajo el chasis (motores, sensores) al “barrer” del camino objetos que pueden dañarlos. Todas las caras se recubren mediante láminas de acrílico blanco de 2 mm para aumentar la visibilidad de los robots, y poseen orificios para garantizar el flujo de aire a los circuitos internos.



Figura 3.10: Vista Isométrica del Robot

Para mayor estabilidad, las placas para sujeción de elementos tales como los motorreductores o los rodamientos de ejes deben unirse al chasis mediante soldadura

adecuada para aluminio. El diseño final del robot se puede apreciar en la Figura 3.10; las siguientes secciones entran en más detalle respecto a cómo los diversos subsistemas son acoplados al chasis.

## 3.2. MODELOS CINEMÁTICOS Y DINÁMICOS

Como se demostró en la sección previa, el Manipulador y el Chasis Móvil son los dos subsistemas de mayor complejidad presentes en el Sistema Robótico de Transporte Cooperativo. Para caracterizar a plenitud su comportamiento, se requiere desarrollar los modelos asociados a la cinemática directa e inversa (para el caso del manipulador, también es necesaria la cinemática diferencial); así como la dinámica de cada uno de ellos.

### 3.2.1. Manipulador

El procedimiento para hallar los modelos cinemáticos y la dinámica del manipulador se presenta en la Figura 3.11.

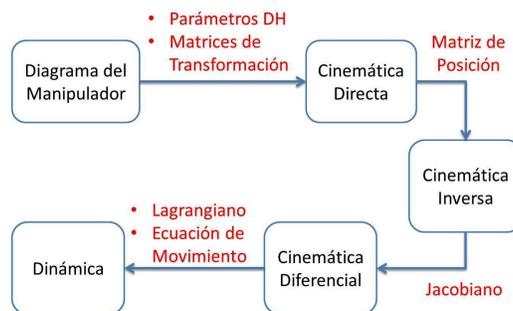


Figura 3.11: Diagrama de Flujo - Modelos del Manipulador

#### 3.2.1.1. Cinemática directa e inversa

A fin de obtener la cinemática directa del manipulador, se plantea el diagrama equivalente de la Figura 3.12 para obtener los parámetros Denavit-Hartenberg (DH), los cuales se presentan en el Cuadro 3.1. Acto seguido, se escriben las matrices de transformación en la Ecuación 3.4.

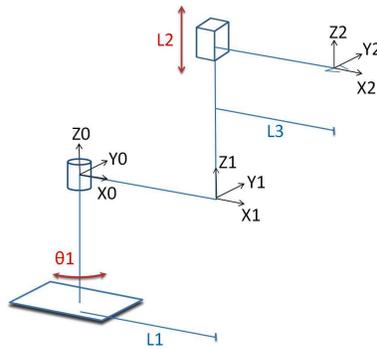


Figura 3.12: Diagrama Equivalente del Manipulador

Eslabón	$\vartheta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	0	$l_1$	0
2	0	$l_2$	$l_3$	0

Cuadro 3.1: Parámetros Denavit-Hartenberg del Manipulador

$$\mathbf{A}_1^0(\theta_1) = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{A}_2^1(l_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

La cinemática directa es igual al producto de estas dos matrices, ilustrado en la Ecuación 3.5. Con base en las características del deslizador eTrack y la base diseñada, se tiene  $l_1 = 49,26 \text{ mm}$  y  $l_3 = 80,72 \text{ mm}$ . El rango real de  $l_2$  tiene un offset debido a la altura agregada por la base y el chasis móvil, pero éste se compensa con el diseño de los componentes externos con los cuales el manipulador interactúa.

$$\mathbf{T}_2^0 = \mathbf{A}_1^0 \mathbf{A}_2^1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & c_1(l_1 + l_3) \\ s_1 & c_1 & 0 & s_1(l_1 + l_3) \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 129,98c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & 129,98s_1 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Es importante recordar que cuando el manipulador está actuando,  $\theta_1$  está bloqueado a  $0^\circ$  y  $l_2$  varía entre 0 y 300 mm; es decir, los movimientos se reducen a traslaciones en el eje Z en los cuales no existen obstáculos entre los puntos inicial y final. Por tal motivo, se omite la planeación de trayectorias y la planificación de movimientos.

Para calcular la cinemática inversa, se procede a partir de la matriz de posición  $\beta$  inmersa dentro de la matriz  $\mathbf{T}_2^0$ , como indica la Ecuación 3.6.

$$\mathbf{T}_2^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \beta \\ 0 & y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & p_{wx} \\ \mathbf{R} & p_{wy} \\ & p_{wz} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Al comparar las Ecuaciones 3.5 y 3.6, se obtienen las expresiones de posición de la Ecuación 3.7.

$$\begin{aligned} p_{wx} &= c_1 (l_1 + l_3) \\ p_{wy} &= s_1 (l_1 + l_3) \\ p_{wz} &= l_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Denominando  $\vartheta_1$  como el ángulo de la articulación de rotación libre, y  $d_2$  como la altura de la articulación traslacional, el resultado de la cinemática inversa se presenta en la Ecuación 3.8. Es importante notar que se usa la versión  $\arctan 2$  de la función arcotangente, la cual indica el cuadrante correcto del ángulo obtenido.

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \arctan 2 (p_{wy}/p_{wx}) \\ d_2 &= p_{wz} \end{aligned} \quad (3.8)$$

### 3.2.1.2. Cinemática diferencial

La cinemática diferencial está dada por la expresión  $\mathbf{V}_e = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$ , donde  $\mathbf{V}_e$  es el vector de velocidades generalizadas y  $\mathbf{J}$  es el Jacobiano. Se procede a plantear el Jacobiano en la Ecuación 3.9, donde los términos  $\mathbf{J}_p$  y  $\mathbf{J}_q$  denotan las velocidades lineales y angulares de los eslabones respectivos.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p1} & \mathbf{J}_{p2} \\ \mathbf{J}_{q1} & \mathbf{J}_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0 \otimes (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0) & \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Los términos necesarios para calcular el Jacobiano se presentan en la Ecuación 3.10. Dichas fórmulas son estándar y obedecen al tipo de articulación (1 es la articulación rotacional, 2 es la articulación prismática).

$$\mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} c_1(l_1 + l_3) \\ s_1(l_1 + l_3) \\ l_2 \end{bmatrix}; \mathbf{z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Al operar los términos y reemplazar las constantes, se obtiene el Jacobiano de la Ecuación 3.11. Sin calcular su determinante, se puede determinar que la configuración del manipulador está exenta de singularidades cinemáticas (no existen puntos para los cuales la cinemática inversa arroje infinitas combinaciones posibles de variables articulares).

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1 + l_3) & 0 \\ c_1(l_1 + l_3) & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -129,98s_1 & 0 \\ 129,98c_1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

El espacio operacional posee 6 DOF ( $m = 6$ ; compuesto por 3 traslaciones y 3 rotaciones). En cambio el manipulador solo posee 2 DOF ( $n = 2$ ). Dado que  $n < m$ , se puede afirmar que el manipulador NO es redundante.

### 3.2.1.3. Dinámica

Antes de proceder a despejar la dinámica del manipulador, es necesario realizar un diagrama más detallado, presentado en la Figura 3.13.

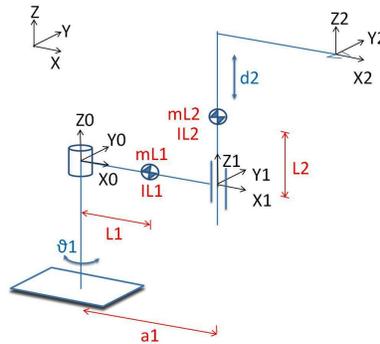


Figura 3.13: Diagrama Detallado del Manipulador

Este nuevo diagrama toma en cuenta la masa, la inercia y la ubicación de centro de masa de cada eslabón. Los eslabones poseen masas  $m_{l1}$  y  $m_{l2}$  e inercias  $I_{l1}$  e  $I_{l2}$  respectivamente. El eje que soporta al manipulador posee una masa  $m_{e1}$  y una inercia  $I_{e1}$ , el motor del deslizador eTrack (segundo eslabón) posee una masa  $m_{m2}$  y una inercia  $I_{m2}$  y el elemento móvil de dicho deslizador posee una masa  $m_3$ .

Se define un vector de coordenadas generalizadas  $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \vartheta_1 & d_2 \end{bmatrix}^T$  como punto de partida para obtener el modelo dinámico del subsistema. Se escoge el método de modelado por energías, el cual hace uso de la formulación de Lagrange ( $\mathbf{L} = \mathbf{T} - \mathbf{u}$ ); donde  $\mathbf{L}$  es el Lagrangiano,  $\mathbf{T}$  es la energía cinética total y  $\mathbf{u}$  es la energía potencial total.

La forma compacta de la ecuación de movimiento corresponde a la Ecuación 3.12, donde  $\mathbf{q}$  es el vector de coordenadas generalizadas y  $\boldsymbol{\varepsilon}$  es el vector de fuerzas generalizadas.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta \mathbf{L}}{\delta \dot{\mathbf{q}}} \right)^T - \left( \frac{\delta \mathbf{L}}{\delta \mathbf{q}} \right) = \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Al resolver la forma compacta en el espacio articular se obtiene la Ecuación 3.13.  $\mathbf{B}(\mathbf{q})$  es la matriz de inercias,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  es la matriz de fuerzas de Coriolis,  $\mathbf{F}_v$  son las fuerzas viscosas,  $\mathbf{F}_s$  son las fuerzas de fricción estática,  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  es la matriz gravitacional y  $\mathbf{h}_e$  son las fuerzas y torques del efector final en contacto con el entorno.

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}_v(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}_s \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{h}_e \quad (3.13)$$

Debido a que su valor no es significativo, se desprecian las fuerzas viscosas y de fricción estática. Adicionalmente, el efector final no actúa en un medio especial, por lo cual  $\mathbf{h}_e = 0$ . En primer lugar, la matriz de inercias se halla mediante un proceso iterativo, con el cual se obtiene el resultado de la Ecuación 3.14.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{q}) = & m_{l1} \left[ \mathbf{J}_p^{(l1)} \right]^T \mathbf{J}_p^{(l1)} + \left[ \mathbf{J}_o^{(l1)} \right]^T \mathbf{R}_1 \mathbf{I}_{l1}^1 \mathbf{R}_1^T \mathbf{J}_o^{(l1)} + m_{e1} \left[ \mathbf{J}_p^{(e1)} \right]^T \mathbf{J}_p^{(e1)} \\ & + \left[ \mathbf{J}_o^{(e1)} \right]^T \mathbf{R}_{e1} \mathbf{I}_{e1}^{e1} \mathbf{R}_{e1}^T \mathbf{J}_o^{(e1)} + m_{l2} \left[ \mathbf{J}_p^{(l2)} \right]^T \mathbf{J}_p^{(l2)} + \left[ \mathbf{J}_o^{(l2)} \right]^T \mathbf{R}_2 \mathbf{I}_{l2}^2 \mathbf{R}_2^T \mathbf{J}_o^{(l2)} \\ & + m_{m2} \left[ \mathbf{J}_p^{(m2)} \right]^T \mathbf{J}_p^{(m2)} + \left[ \mathbf{J}_o^{(m2)} \right]^T \mathbf{R}_{m2} \mathbf{I}_{m2}^{m2} \mathbf{R}_{m2}^T \mathbf{J}_o^{(m2)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Se requiere desglosar más los diversos términos matriciales  $\mathbf{J}_p$  y  $\mathbf{J}_o$ , como se observa en la Ecuación 3.15. Las constantes  $K_{ri}$  indican el factor de acople para el elemento  $i$  que actúa la articulación al cual esté asignado.

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}_p^{(l1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p1}^{(l1)} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0 \otimes (\mathbf{p}_{l1} - \mathbf{p}_0) & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_o^{(l1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{o1}^{(l1)} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_p^{(l2)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p1}^{(l2)} & \mathbf{J}_{p2}^{(l2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0 \otimes (\mathbf{p}_{l2} - \mathbf{p}_0) & \mathbf{z}_1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_o^{(l2)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{o1}^{(l2)} & \mathbf{J}_{o2}^{(l2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_p^{(e1)} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_o^{(e1)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{o1}^{(e1)} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{r1}\mathbf{z}_{e1} & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_p^{(m2)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{p1}^{(m2)} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_0 \otimes (\mathbf{p}_{m2} - \mathbf{p}_0) & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{J}_o^{(m2)} &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{o1}^{(m2)} & \mathbf{J}_{o2}^{(m2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{o1}^{(l2)} & K_{r2}\mathbf{z}_{m2} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

La Ecuación 3.16 indica los resultados para los términos menores. Los vectores  $\mathbf{z}_i$  indican la orientación del eje  $z$  para el elemento  $i$  con respecto al eje de coordenadas global y los vectores  $\mathbf{p}_i$  expresan las coordenadas del elemento correspondiente.

$$\begin{aligned}
\mathbf{p}_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{p}_{l1} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 \\ l_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{p}_{l2} = \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ l_2 \end{bmatrix}; \mathbf{p}_{m2} = \begin{bmatrix} a_1 c_1 \\ a_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{z}_0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{z}_{e1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{z}_{m2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Al sumar todos los términos se obtiene la matriz de la Ecuación 3.17, donde las constantes  $I_{zzi}$  denotan el tensor de inercia a lo largo del eje  $Z$  para el elemento  $i$ .

$$\mathbf{B}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
B_{11} &= m_{l1} (l_1)^2 + (m_{l2} + m_{m2}) (a_1)^2 + I_{zz l1} + I_{zz e1} + I_{zz l2} + I_{zz m2} \\
B_{12} &= I_{zz m2} K_{r2} \\
B_{21} &= I_{zz m2} K_{r2} \\
B_{22} &= I_{zz m2} K_{r2} + m_{l2}
\end{aligned} \tag{3.17}$$

En este caso, todos los términos dentro de la matriz de inercias han resultado constantes, lo cual permite concluir que no se presentan fuerzas de Coriolis en el manipulador, es decir que  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0$ . Se aplica nuevamente el proceso iterativo para calcular la matriz gravitacional, con lo cual se obtienen las fórmulas de la Ecuación 3.18.

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = - \begin{bmatrix} m_{l1} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p1}^{(l1)}(\mathbf{q}) + m_{e1} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p1}^{(e1)}(\mathbf{q}) + m_{l2} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p1}^{(l2)}(\mathbf{q}) + m_{m2} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p1}^{(m2)}(\mathbf{q}) \\ m_{l1} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p2}^{(l1)}(\mathbf{q}) + m_{e1} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p2}^{(e1)}(\mathbf{q}) + m_3 \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p2}^{(l2)}(\mathbf{q}) + m_{m2} \mathbf{g}_o^T \mathbf{J}_{p2}^{(m2)}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Con base al eje de coordenadas global que se planteó previamente en la Figura 3.13, el vector de gravedad en este caso es  $\mathbf{g}_o^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -g \end{bmatrix}$ . El término  $\mathbf{J}_{p1}^{(e1)}$  aparece debido a la convención del proceso, pero con base en el cálculo de la matriz de inercias se sabe que es igual a 0.

Al reemplazar todos los valores se obtiene el resultado de la Ecuación 3.19. Es importante notar que el término inferior figura con  $m_3$  en vez de  $m_{l2}$ ; puesto que aunque el segundo eslabón está conformado por todo el deslizador eTrack, sólo una de sus piezas se mueve contra la gravedad cuando es actuada.

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ m_3 \end{bmatrix} g \quad (3.19)$$

Reemplazando las matrices obtenidas en la forma compacta, se obtienen las dos expresiones de la Ecuación 3.20.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= [m_{l1}(l_1)^2 + (m_{l2} + m_{m2})(a_1)^2 + I_{zz l1} + I_{zz e1} + I_{zz l2} + I_{zz m2}] \ddot{\vartheta}_1 + I_{zz m2} K_{r2} \ddot{d}_2 \\ \tau_2 &= I_{zz m2} K_{r2} \ddot{\vartheta}_1 + (I_{zz m2} K_{r2} + m_{l2}) \ddot{d}_2 + m_3 g \end{aligned} \quad (3.20)$$

El Cuadro 3.2 contiene los valores de las constantes presentes en la Ecuación 3.20, obtenidos a partir de los componentes reales del manipulador y calculados mediante el modelo CAD desarrollado en SolidWorks. Para el primer eje no hay un motor acoplado, así que se toma  $K_{r1} = 1 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ ; adicionalmente, el fabricante indica que el tornillo sin fin del deslizador eTrack está acoplado directamente al motor actuador correspondiente, por lo cual se concluye que  $K_{r2} = 1 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ .

<i>Término</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Término</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
$l_1$	0,01107	$m$	$m_{l1}$	0,06046	$kg$
$a_1$	0,04926	$m$	$m_{l2}$	1,69527	$kg$
$I_{zz l1}$	$4,8384 * 10^{-5}$	$kg * m^2$	$m_{m2}$	0,16217	$kg$
$I_{zz e1}$	$4,1247 * 10^{-7}$	$kg * m^2$	$m_3$	0,72787	$kg$
$I_{zz l2}$	$3,0616 * 10^{-3}$	$kg * m^2$	$k_{r1}$	1	$m^{-1}$
$I_{zz m2}$	$2,3855 * 10^{-6}$	$kg * m^2$	$k_{r2}$	1	$m^{-1}$

Cuadro 3.2: Valores de la Dinámica del Manipulador (Calculados mediante CAD)

Finalmente, se despeja con los valores del Cuadro 3.2 y se obtienen las fórmulas de la Ecuación 3.21. Aunque ambas se denotan con  $\tau$ , sus unidades dependen del tipo de articulación. Por consiguiente,  $\tau_1$  es el torque en la articulación rotacional [ $N * m$ ] y  $\tau_2$  es la fuerza en la articulación traslacional [ $N$ ].

$$\begin{aligned}\tau_1 &= (7,6273 * 10^{-3}) \ddot{\vartheta}_1 + (2,3855 * 10^{-6}) \ddot{d}_2 \\ \tau_2 &= (2,3855 * 10^{-6}) \ddot{\vartheta}_1 + 1,6953 \ddot{d}_2 + 7,1404\end{aligned}\quad (3.21)$$

#### 3.2.1.4. Validación

Para validar estas expresiones, se parte del modelo CAD del manipulador y se utiliza simMechanics Link (ver Anexo A.1) para exportar dicho modelo a Simulink, donde se pueden aplicar actuadores y sensores a fin de analizar el comportamiento dinámico.

Con base en las características del manipulador, se escogen  $\ddot{\vartheta}_1 = 2\pi = 6,2832 \text{ rad/s}^2$  y  $\ddot{d}_2 = 0,22 \text{ m/s}^2$  como entradas del sistema, con lo cual se obtiene como resultado de la simulación  $\tau_1 = 0,0589 \text{ N} * \text{m}$  y  $\tau_2 = 7,3 \text{ N}$ . Reemplazando con las mismas entradas en las fórmulas de la Ecuación 3.21 se obtiene  $\tau_1 = 0,0479 \text{ N} * \text{m}$  y  $\tau_2 = 7,5134 \text{ N} * \text{m}$ .

Al calcular el valor absoluto de los márgenes de error y expresar dicho resultado en forma porcentual, se encuentra que la diferencia entre el modelo teórico y la simulación es de 18,67 % para  $\tau_1$  y 2,92 % para  $\tau_2$ . El mayor margen de error para la primera articulación se puede asociar a dos factores importantes: la simulación en MATLAB realiza los cálculos intermedios con una mayor cantidad de cifras decimales y posee una mejor precisión de los puntos de unión entre eslabones y articulaciones, los cuales inciden en los cálculos de los tensores de inercia.

### 3.2.2. Chasis Móvil

A fin de hallar los modelos del chasis móvil se siguen los pasos presentados en la Figura 3.14.



Figura 3.14: Diagrama de Flujo - Modelos del Chasis Móvil

#### 3.2.2.1. Cinemática directa e inversa

Como primer paso en el planteamiento de la cinemática, se realiza el diagrama de la Figura 3.15, donde se aprecia la disposición y numeración de las ruedas con respecto al sistema de coordenadas local del robot.

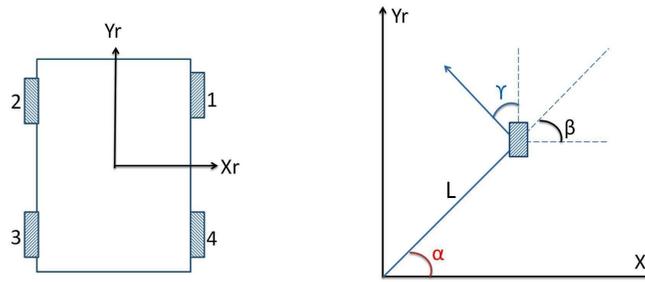


Figura 3.15: Configuración del Chasis Móvil

Todas las ruedas están a la misma distancia  $l$  del sistema de coordenadas, pero sus ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  son distintos en cada caso. Las ruedas 1 y 3 poseen sus rodillos orientados a  $\gamma = \pi/4 \text{ rad}$  y las ruedas 2 y 4 los poseen orientados a  $\gamma = -\pi/4 \text{ rad}$ . El mapeo de las velocidades entre los sistemas de coordenadas global  $(\dot{\xi}_I)$  y local  $(\dot{\xi}_R)$  se hace mediante la matriz ortogonal de rotación  $\mathbf{R}(\theta)$ , es decir,  $\dot{\xi}_R = \mathbf{R}(\theta)\dot{\xi}_I$ . Dicha matriz se presenta en la Ecuación 3.22.

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Se requiere calcular la contribución de cada rueda a la velocidad del chasis en el sistema de coordenadas local, lo cual se hace analizando las restricciones cinemáticas de las ruedas suecas o mecanum<sup>4</sup>. Para cada una de las ruedas ( $0 < i \leq 4$ ), la restricción de rodadura está descrita por la Ecuación 3.23.

$$\mathbf{J}_{1f}^i \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I - \mathbf{J}_2^i \dot{\varphi}_i = 0$$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{1f}^i &= \begin{bmatrix} \sin(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) & -\cos(\alpha_i + \beta_i + \gamma_i) & (-l_i) \cos(\beta_i + \gamma_i) \end{bmatrix} \\ \mathbf{J}_2^i &= r_i \cos \gamma_i \end{aligned} \quad (3.23)$$

Puesto que todas las ruedas son fijas (no direccionables), la expresión que reúne las restricciones de rodadura de todas las ruedas se reduce a la expresión  $\mathbf{J}_{1f} \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I - \mathbf{J}_2 \dot{\varphi} = 0$ .  $\mathbf{J}_{1f}$  y  $\mathbf{J}_2$  reúnen todos los términos  $\mathbf{J}_{1f}^i$  y  $\mathbf{J}_2^i$  respectivamente con ( $0 < i \leq 4$ ).

Dicha expresión se adecúa según el valor deseado: si se desea hallar las velocidades globales con base a las velocidades de las ruedas (cinemática directa) se hace  $\dot{\xi}_I = [\mathbf{R}(\theta)]^{-1} [\mathbf{J}_{1f}]^{-1} \mathbf{J}_2 \dot{\varphi}$ ; para el caso contrario (cinemática inversa) se usa  $[\mathbf{J}_2]^{-1} \mathbf{J}_{1f} \mathbf{R}(\theta) \dot{\xi}_I = \dot{\varphi}$ .

Al analizar la configuración, se puede notar que no existen restricciones de deslizamiento en el plano ortogonal al plano de movimiento de las ruedas suecas (en este caso,  $x_R$ ). Por lo tanto, se afirma que la configuración tiene 3 grados de movilidad. Adicionalmente, no existen ruedas direccionables ( $\delta_m = 3$ ), así que la configuración posee 0 grados de direccionabilidad ( $\delta_s = 0$ ).

Los grados de maniobrabilidad son igual a la suma de los dos anteriores, es decir,  $\delta_M = \delta_m + \delta_s = 3$ . Lo anterior constata que no existe restricción del Centro Instantáneo de Rotación (ICR) y éste puede asignarse a cualquier punto del plano, lo cual reafirma que el chasis móvil cumple el objetivo propuesto.

La medición de los ángulos  $\beta$  depende de la dirección en la cual este girando cada una de las ruedas, ya que se toma en cuenta la Ley de la Mano Derecha para determinar las componentes ortogonales a la velocidad angular, lo cual se ilustra en la Figura 3.16.

<sup>4</sup>SIEGWART, Roland y NOURBAKSH, Illah R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press. EE.UU., 2004. p. 59.

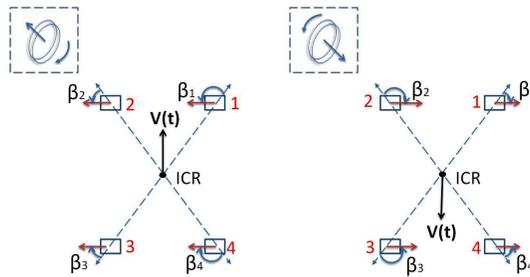


Figura 3.16: Medición de los Ángulos  $\beta$

Los ángulos  $\beta$  para ambos casos se presentan en el Cuadro 3.3 y los demás valores obtenidos a partir del diseño CAD se consignan en el Cuadro 3.4. Debido al tamaño de la matriz que combina todas las restricciones, se hizo uso de MATLAB para digitar los parámetros y efectuar las operaciones matriciales.

*v(t) hacia adelante*  
(Todas las ruedas con  
rotación horaria)

Término	Valor	Unidades
$\beta_1$	2,3312	rad
$\beta_2$	0,8104	rad
$\beta_3$	-0,8104	rad
$\beta_4$	-2,3312	rad

*v(t) hacia atrás*  
(Todas las ruedas con  
rotación antihoraria)

Término	Valor	Unidades
$\beta_1$	-0,8104	rad
$\beta_2$	-2,3312	rad
$\beta_3$	2,3312	rad
$\beta_4$	0,8104	rad

Cuadro 3.3: Valores de los Ángulos  $\beta$

Término	Valor	Unidades
$l_1$	0,2415	m
$\alpha_1$	0,8104	rad
$\alpha_2$	2,3312	rad
$\alpha_3$	-2,3312	rad
$\alpha_4$	-0,8104	rad

Término	Valor	Unidades
$r$	0,0269	m
$\gamma_1$	$\pi/4$	rad
$\gamma_2$	$-\pi/4$	rad
$\gamma_3$	$\pi/4$	rad
$\gamma_4$	$-\pi/4$	rad

Cuadro 3.4: Valores de la Cinemática del Chasis Móvil

### 3.2.2.2. Validación de las cinemáticas

Se tomó como referencia la publicación de Petriu<sup>5</sup> para validar los movimientos producidos por las distintas combinaciones articulares que se documentan en el Cuadro

<sup>5</sup>PETRIU, Emil M. Robotic Systems - Vehicules. University of Ottawa. p. 3. Disponible en: <http://www.site.uottawa.ca/~petriu/CEG4392-IntroRobotics-Vehicules.pdf>

3.5. El símbolo  $+v$  indica rotación horaria, 0 indica una rueda estática (sin rotación) y  $-v$  indica rotación antihoraria. Existen una serie de movimientos más avanzados que requieren variar  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  y  $\dot{\theta}$  en función del tiempo, por lo cual deben obtenerse mediante la cinemática inversa. Los movimientos del Cuadro 3.5 son suficientes para la aplicación de transporte, así que se omiten los movimientos avanzados.

<i>Rueda</i>				<i>Movimiento Resultante</i>
1	2	3	4	
$+v$	$+v$	$+v$	$+v$	<i>Adelante</i>
$-v$	$-v$	$-v$	$-v$	<i>Atrás</i>
$+v$	$-v$	$+v$	$-v$	<i>Izquierda</i>
$-v$	$+v$	$-v$	$+v$	<i>Derecha</i>
$-v$	$+v$	$+v$	$-v$	<i>Rotación horaria sobre centro</i>
$+v$	$-v$	$-v$	$+v$	<i>Rotación antihoraria sobre centro</i>
0	$+v$	0	$+v$	<i>Diagonal superior izquierda</i>
$+v$	0	$+v$	0	<i>Diagonal superior derecha</i>
0	$-v$	0	$-v$	<i>Diagonal inferior izquierda</i>
$-v$	0	$-v$	0	<i>Diagonal inferior derecha</i>
$+v$	0	0	$+v$	<i>Giro hacia izquierda</i>
$-v$	0	0	$-v$	<i>Giro hacia izquierda en reversa</i>
0	$+v$	$+v$	0	<i>Giro hacia derecha</i>
0	$-v$	$-v$	0	<i>Giro hacia derecha en reversa</i>

Cuadro 3.5: Movimientos Comunes del Chasis Móvil

Es importante señalar que la matriz  $\mathbf{J}_{1f}$  no es cuadrada, por lo tanto al realizar la cinemática directa se requiere calcular su pseudoinversa, la cual MATLAB hace mediante un algoritmo sujeto a aproximaciones.

En consecuencia, resultados obtenidos mediante la cinemática inversa pueden llegar a diferir en magnitud de las combinaciones halladas mediante la cinemática directa. Aunque matemáticamente correctas, dichas magnitudes pueden arrojar velocidades para las ruedas superiores al valor máximo que los motores puedan brindar.

A fin de evitar un funcionamiento inadecuado, se recomienda implementar un algoritmo encargado de reducir la velocidad de las ruedas que excedan el límite de los motores y sumar dicho valor a las demás ruedas. De este modo, aunque se obtienen velocidades globales inferiores al valor deseado, se mantiene la dirección correcta del movimiento.

### 3.2.2.3. Dinámica

Para calcular la dinámica, nuevamente se parte de la formulación de Lagrange ( $\mathbf{L} = \mathbf{T} - \mathbf{u}$ ) y de la forma compacta vista previamente en la Ecuación 3.12. Sin embargo, en esta ocasión la energía potencial es igual a cero ( $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ ), ya que el chasis móvil únicamente se mueve en un plano completamente horizontal.

La energía cinética total  $\mathbf{T}$  se descompone en la Ecuación 3.24.  $T_t$  es la energía aportada por la traslación del chasis,  $T_r$  es la energía aportada por la rotación del chasis y  $T_w$  es la energía aportada por las ruedas en conjunto con los rotores de sus respectivos motorreductores.

$$\mathbf{L} = \mathbf{T} = T_t + T_r + T_w \quad (3.24)$$

La formulación completa de estos tres términos se presenta en la Ecuación 3.25.  $I_{ch}$  es la inercia del robot móvil excluyendo las ruedas e  $I_r$  es la inercia combinada de las ruedas y rotores correspondientes.

$$\begin{aligned} T_t &= (1/2) m v_{cm}^2 = (1/2) m (\dot{x}_{cm}^2 + \dot{y}_{cm}^2) \\ T_r &= (1/2) I_{ch} \dot{\theta}_I^2 \\ T_w &= (1/2) I_r (\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_3^2 + \dot{\varphi}_4^2) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Se requiere hallar  $\dot{x}_{cm}$  y  $\dot{y}_{cm}$ ; las componentes de la velocidad referidas al centro de masa del chasis. Puesto que se conocen las velocidades globales del robot  $\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I & \dot{y}_I & \dot{\theta}_I \end{bmatrix}^T$  gracias a la cinemática directa, se plantea el diagrama de la Figura 3.17 para establecer la relación geométrica entre estos valores.

Cuando el robot no está rotando, las velocidades del centro de masa son iguales a las del centro del robot. Cuando hay rotación, el centro de masa rota con una velocidad angular respecto al centro del robot, con lo cual también aparece una velocidad tangencial. Las componentes de dicha velocidad por lo tanto se aportan a las del centro del chasis, como se indica en la Ecuación 3.26.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{cm} &= \dot{x}_I - \left( d \dot{\theta}_I \right) \sin \theta \\ \dot{y}_{cm} &= \dot{y}_I + \left( d \dot{\theta}_I \right) \cos \theta \end{aligned} \quad (3.26)$$

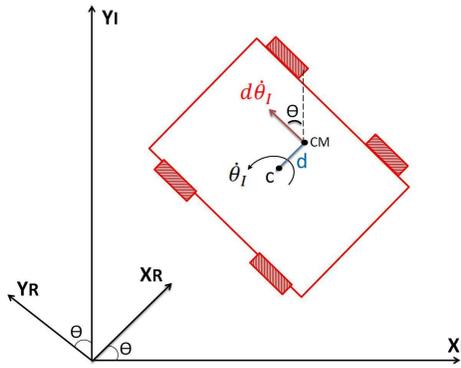


Figura 3.17: Relación Geométrica de Velocidades del Chasis

Haciendo uso de MATLAB, se procede a simplificar la cinemática directa. Se puede reexpresar el vector  $\dot{\xi}_R$  como se indica en la Ecuación 3.27, donde  $A = 0,3536$ ,  $B = 1,0354 \text{ m}^{-1}$  y  $C = 0,0191 \text{ m}$ . Adicionalmente, es posible demostrar que  $\dot{x}_R^2 + \dot{y}_R^2 = \dot{x}_I^2 + \dot{y}_I^2$  y que  $\dot{\theta}_R = \dot{\theta}_I$ .

$$\dot{\xi}_R = \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AC(-\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ AC(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_4) \\ BC(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Con base a los planteamientos previos, se reescribe el Lagrangiano en función de las velocidades de las ruedas (coordenadas generalizadas), como se observa en la Ecuación 3.28. Todos los términos  $F_i$  son constantes del sistema.

$$\mathbf{L} = F_1(\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2 + \dot{\varphi}_3^2 + \dot{\varphi}_4^2) + 2F_2\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_3 + 2F_3\dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_4 - 2F_4(\dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2\dot{\varphi}_3 + \dot{\varphi}_3\dot{\varphi}_4 + \dot{\varphi}_1\dot{\varphi}_4)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= mA^2C^2 + mdABC^2 + \frac{md^2B^2C^2}{2} + \frac{I_{ch}B^2C^2}{2} + \frac{I_r}{2} \\ F_2 &= mA^2C^2 + mdABC^2 + \frac{md^2B^2C^2}{2} + \frac{I_{ch}B^2C^2}{2} \\ F_3 &= mA^2C^2 - mdABC^2 + \frac{md^2B^2C^2}{2} + \frac{I_{ch}B^2C^2}{2} \\ F_4 &= \frac{md^2B^2C^2}{2} + \frac{I_{ch}B^2C^2}{2} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Acto seguido, se calculan las derivadas del Lagrangiano  $\delta\mathbf{L}/\delta\dot{\mathbf{q}}$  y  $\delta\mathbf{L}/\delta\mathbf{q}$  respecto a las coordenadas generalizadas  $\mathbf{q} = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4]^T$ . El Cuadro 3.6 presenta los valores requeridos para calcular las constantes  $F_i$  y los resultados subsecuentes; dichos valores se obtuvieron a partir del modelo CAD.

<i>Término</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Término</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
$m$	8,70589	kg	$F_1$	$4,8579 * 10^{-4}$	kg * m <sup>2</sup>
$d$	0,02428	m	$F_2$	$4,7919 * 10^{-4}$	kg * m <sup>2</sup>
$I_{ch}$	0,2701636	kg * m <sup>2</sup>	$F_3$	$4,227 * 10^{-4}$	kg * m <sup>2</sup>
$I_r$	$1,3242 * 10^{-5}$	kg * m <sup>2</sup>	$F_4$	$5,3834 * 10^{-5}$	kg * m <sup>2</sup>

Cuadro 3.6: Constantes de la Dinámica del Chasis Móvil

Las expresiones finales del modelado dinámico del chasis móvil se presentan en la Ecuación 3.29.

$$\begin{aligned}
 \tau_1 &= 2 (F_1 \ddot{\varphi}_1 - F_4 \ddot{\varphi}_2 + F_2 \ddot{\varphi}_3 - F_4 \ddot{\varphi}_4) \\
 \tau_2 &= 2 (-F_4 \ddot{\varphi}_1 + F_1 \ddot{\varphi}_2 - F_4 \ddot{\varphi}_3 + F_3 \ddot{\varphi}_4) \\
 \tau_3 &= 2 (F_2 \ddot{\varphi}_1 - F_4 \ddot{\varphi}_2 + F_1 \ddot{\varphi}_3 - F_4 \ddot{\varphi}_4) \\
 \tau_4 &= 2 (-F_4 \ddot{\varphi}_1 + F_3 \ddot{\varphi}_2 - F_4 \ddot{\varphi}_3 + F_1 \ddot{\varphi}_4)
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

### 3.2.2.4. Validación de la dinámica

A fin de validar el modelado, se evalúa el comportamiento del sistema en el arranque desde el reposo. Para efectos de simplificación se opta por tomar la misma aceleración en las cuatro ruedas, lo cual corresponde a un movimiento del chasis hacia adelante.

Según el modelo en Simulink del motorreductor (ver Sección 3.4), el pico de aceleración angular al alimentar los motores es  $\ddot{\varphi} = 1800 \text{ rad/s}^2$ . Al reemplazar con dicho valor, se obtiene  $\tau_1 = \tau_1 = 3,0862 \text{ N} * \text{m}$  y  $\tau_2 = \tau_4 = 2,8829 \text{ N} * \text{m}$ . Se verifica el torque de arranque del motor (stall torque) con base en el Product Sheet<sup>6</sup> y el manual de selección<sup>7</sup>, al cual se debe multiplicar la relación de reducción como se muestra en la Ecuación 3.30.

$$\tau_{\text{arranque}} = M_H * n_{\text{reductor}} = (61,479 \text{ mN} * \text{m}) (51) = 3,135 \text{ N} * \text{m} \tag{3.30}$$

Puesto que el torque de arranque del motor es mayor que los torques obtenidos en el modelo, se puede afirmar que los motorreductores poseen la capacidad adecuada para vencer la inercia del chasis móvil.

<sup>6</sup>Series 2342-CR. DC-Micromotors. Graphite Commutation. Faulhaber. Disponible en: [http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN\\_2342\\_CR\\_DFF.pdf](http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN_2342_CR_DFF.pdf)

<sup>7</sup>Technical Information. Faulhaber. p. 8. Disponible en: <http://www.faulhaber.com/servlet/com.itmr.waw.servlet.Anzeige?fremdaufruf=ja&kdid=40929&sprachid=1&htdigurl=/n167866/i86089.html>

Adicionalmente, se observa que si se utiliza una configuración de movimiento en diagonal (solo actúa un par de motores en diagonal), las componentes con signo contrario se anulan, lo cual aumenta el torque requerido para los motores a cargo del movimiento. Por lo tanto, se recomienda que los movimientos en diagonal no se deben usar cuando el chasis se encuentra en reposo, ya que se pueden dañar los motores al vencer la inercia.

### **3.3. PERCEPCIÓN**

El diseño de agentes racionales requiere que el sistema sea capaz de percibir el ambiente en el cual actúa; para una tarea de transporte dicha percepción se relaciona con la trayectoria a seguir y la detección de obstáculos que la bloqueen. Se propone la combinación de dos métodos (un sensor asociado a cada uno) para demarcar la trayectoria que los robots realizan, así como un tercer sensor para la detección de obstáculos. Se procede a analizar los parámetros de realización de la trayectoria para definir el uso adecuado de los sensores.

#### **3.3.1. Aplicación de los sensores en la tarea de transporte**

Con base en los antecedentes del ámbito industrial, se escoge representar la trayectoria mediante líneas demarcadas en el suelo con color distintivo. El seguimiento de las líneas se lleva a cabo mediante un sensor infrarrojo. En los puntos de vital importancia, tales como aquellos donde la orientación de la trayectoria cambia, o donde los robots deben realizar tareas importantes, se instalan en el suelo una serie de láminas metálicas.

Tanto la unidad central del sistema como los agentes monitorean un conteo individual, a fin de determinar si el “marcador” detectado corresponde a un punto de actuación. Se propone un sensor inductivo para la detección de dichos “marcadores”. Debido al rango de detección que esta clase de sensores habitualmente manejan, su cercanía al suelo es clave para un adecuado funcionamiento. En consecuencia, ambos sensores se colocan con la mayor proximidad posible al centro del chasis a fin de facilitar la representación de la ubicación de los robots.

Para brindar la capacidad de detección de obstáculos, los robots usan sensores de ultrasonido. Con base en la forma que se realiza la trayectoria y asumiendo que el punto inicial (estiba) no posee personas ni objetos obstaculizando la trayectoria cuando los robots se encuentran operando, se propone posicionar el sensor en la parte frontal de ambos robots como indica la Figura 3.18, a una altura tal que no sean afectados por las marcas metálicas instaladas en la trayectoria.

Es importante señalar, que previo a tomar la canaleta en el punto inicial y posterior a descargar la canaleta en el punto final, ambos robots efectúan una rotación de  $180^\circ$  sobre su eje para estar correctamente orientados, es decir, con sus sensores de ultrasonido apuntando en la dirección de movimiento.

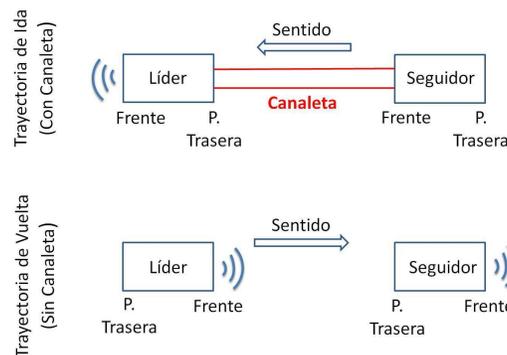


Figura 3.18: Ubicación y Uso de los Sensores de Ultrasonido

Con base a los parámetros anteriores, se escogieron los siguientes sensores que se analizan uno a uno:

- **Inductivo:** PR3015DN (Autonics)
- **Infrarrojo:** TCND5000 (Vishay Semiconductors)
- **Ultrasonido:** SFR05 (Devantech)

### 3.3.2. Sensor Inductivo

El sensor inductivo es de tipo NPN con salida normalmente abierta. Dado que su salida es un voltaje alto al detectar un objeto, se puede utilizar un puerto digital para leer su señal de salida. A fin de ajustar la señal en voltaje y corriente se propone ajustar el

colector mediante una resistencia en paralelo a la resistencia interna (ver Anexo A.2). La señal de salida está dada por  $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ . Se desea  $V_{CE} = 3 \text{ V}$  e  $I_C = 50 \text{ mA}$ , para lo cual se obtiene  $R_C = 420 \Omega$ . Al resolver el paralelo entre la resistencia de  $10 \text{ k}\Omega$  interna del sensor y la resistencia externa de ajuste, el valor resultante es  $R_{Carga} = 438 \Omega$ . Aproximando  $R_{Carga}$  a  $440 \Omega$ , se procede a verificar la corriente de salida y la potencia consumida como se indica en la Ecuación 3.31.

$$\begin{aligned} I_{Carga} &= I_C * \frac{10 \text{ k}\Omega}{R_{Carga} + 10 \text{ k}\Omega} = I_C * \frac{10 \text{ k}\Omega}{440 \Omega + 10 \text{ k}\Omega} = 47,89 \text{ mA} \\ P_{Carga} &= (I_{Carga})^2 R_{Carga} = (0,04789 \text{ A})^2 (440 \Omega) = 1,009 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Por lo anterior, se propone para  $R_{Carga}$  usar dos (2) resistencias en serie de  $220 \Omega$  a  $1 \text{ W}$ . Con el fin de no afectar la medición, es recomendable conectar dichas resistencias a una distancia considerable del sensor. Siguiendo las recomendaciones del fabricante<sup>8</sup>, el sensor está ubicado a  $1 \text{ cm}$  del suelo y las marcas que se instalen en la trayectoria deben tener dimensiones de  $45 \times 45 \times 1 \text{ mm}$  y ser fabricadas en hierro. El chasis posee un orificio circular en su centro con un diámetro levemente mayor al sensor, el cual se asegura mediante una arandela y una tuerca gracias a su sección roscada.

### 3.3.3. Sensor Infrarrojo

El sensor infrarrojo consiste de una pareja de fotodiodos. Dada su respuesta en corriente, se requiere un amplificador de transimpedancia que realice la conversión a voltaje para interpretarlo posteriormente en el conversor análogo-digital. Según el manual del fabricante<sup>9</sup>, el emisor requiere  $V_e = 1,2 \text{ V}$  e  $I_e = 75 \text{ mA}$  y la corriente máxima generada en el receptor es  $I_R = 12 \mu\text{A}$ . Nuevamente se opta por una salida a  $3 \text{ V}$  (ver Anexo A.2).

Para el sub-circuito del emisor se cuenta en esencia con un divisor de voltaje, descrito por  $R_2(5 - V_e) = R_1 V_e$ . Adicionalmente, se puede establecer  $5 \text{ V} = R_1 I_e$ , ya que debido a la conductividad del fotodiodo la corriente que pasa por  $R_2$  es mínima, con lo cual  $I_{R1} \cong I_e$ . Al combinar las fórmulas anteriores, se obtiene  $R_1 = 66 \Omega$  y  $R_2 = 20,84 \Omega$ . Se seleccionan  $R_1 = 68 \Omega$  y  $R_2 = 22 \Omega$ ; acto seguido se verifican las condiciones del emisor como se muestra en la Ecuación 3.32.

<sup>8</sup>PR3015DN Inductive Proximity Sensor. Cylindrical Type DC 3 Wire. Manual. Autonics. Disponible en: [http://www.es.autonics.com/upload/data/Cyl\\_DC3\\_EN\\_0360J\\_111109.pdf](http://www.es.autonics.com/upload/data/Cyl_DC3_EN_0360J_111109.pdf)

<sup>9</sup>TCND5000 Reflective Optical Sensor with PIN Photodiode Output. Vishay Semiconductors. Disponible en: <http://www.vishay.com/docs/83795/tcnd5000.pdf>

$$\begin{aligned} V_e &= 5 \text{ V} * \frac{22 \Omega}{68 \Omega + 22 \Omega} = 1,2 \text{ V} \\ I_e &= \frac{5 \text{ V}}{R_1} = \frac{5 \text{ V}}{68 \Omega} = 73,5 \text{ mA} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Los valores son inferiores a  $V_{e \max} = 1,5 \text{ V}$  e  $I_{e \max} = 0,1 \text{ A}$ , así que se cumplen los criterios de diseño. Se procede a calcular las potencias consumidas en la Ecuación 3.33.

$$\begin{aligned} P_{R1} &= I^2 R = (73,5 \text{ mA})^2 (68 \Omega) = 0,36 \text{ W} \\ P_{R2} &= V^2 / R = (1,2 \text{ V})^2 / (22 \Omega) = 0,65 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.33)$$

En función de los valores calculados, se seleccionan ambas resistencias a 1 W. Para el circuito del receptor, se tiene la relación de la Ecuación 3.34.

$$R = \frac{V_O}{-I_R} = \frac{3 \text{ V}}{-(-12 \mu\text{A})} = 250 \text{ k}\Omega \quad (3.34)$$

Seleccionando  $R = 220 \text{ k}\Omega$ , se obtiene que  $V_O = 2,64 \text{ V}$ , valor aceptable en razón al uso de un puerto análogo. Dado que a mayor oscuridad la corriente es menor, los robots “saben” que siguen la línea cuando la conversión ADC arroja valores cercanos al  $V_O$  más alto (la línea de color claro tiene mayor emisividad comparada al suelo oscuro).

Para el amplificador operacional la bibliografía recomienda un FET, por lo que se escoge la referencia TL082. Este sensor posee conectores de soldadura superficial, por ende se diseña una baqueta pequeña de acople con orificios para atornillar el sensor bajo el chasis, usando separadores hexagonales para colocarlo a la altura correcta.

### 3.3.4. Sensor de Ultrasonido

Este sensor no requiere de un circuito especializado de calibración; únicamente se requiere reducir su salida de 5 V a 3 V mediante un divisor de voltaje. Al plantear la relación del divisor se obtiene  $R_1 = (2/3) R_2$ , por lo cual se propone  $R_1 = 220 \Omega$  y  $R_2 = 330 \Omega$  a  $1/4 \text{ W}$ , puesto que la salida no genera corrientes elevadas. La tapa frontal del chasis móvil lleva orificios para el emisor y receptor del ultrasonido; el sensor va al interior del chasis atornillado a dicha tapa. Se requiere determinar un factor de conversión entre el tiempo de retorno del eco y la distancia del obstáculo detectado.

Con base al manual del fabricante<sup>10</sup>, el tiempo mínimo tras el cual se puede detectar el eco es  $T_{min} = 100 \mu s$ . Dado que se desea detectar objetos con adecuada anticipación (a gran distancia), se escogen ciclos con una duración de  $50 * T_{min} = 5 \text{ ms}$ . Se debe contar la cantidad de ciclos en los cuales la respuesta del sensor corresponde a un '1' lógico (se convierte en '0' al detectar el eco) y convertir este valor a un tiempo en microsegundos.

Acto seguido, el manual indica que el valor obtenido se divide por 5800 para obtener la distancia en m. Por lo tanto, el factor de conversión resultante se calcula en la Ecuación 3.35, siendo  $x_U$  la distancia en metros al objeto detectado y  $c_U$  el número de ciclos contabilizados antes de la detección del eco.

$$K_U = \frac{x_U}{c_U} = \frac{(5 \text{ ms/ciclo}) (1000 \mu s/\text{ms})}{(58 \mu s/\text{cm}) (100 \text{ cm/m})} = 0,862 \text{ m/ciclo} \quad (3.35)$$

Dado que los robots poseen una velocidad crucero de  $0,243 \text{ m/s}$ , se propone que los robots frenen al detectar un obstáculo a  $0,862 \text{ m}$  de distancia (1 ciclo), lo cual otorga una ventana de  $3,5 \text{ s}$  para que se detengan por completo, tiempo suficiente para compensar efectos tales como la inercia de los robots y la posibilidad del obstáculo moviéndose hacia el convoy.

### 3.4. ACTUACIÓN

Como se observó en la Sección 3.1, los motores asociados al gripper y al mecanismo de tensión del manipulador no requieren prestaciones significativas en términos de voltaje, corriente o torque. En consecuencia, se selecciona la referencia JL-20A130-250 de Kingly Motor<sup>11</sup>, con una velocidad de  $30 \text{ rpm}$  operando a  $12 \text{ V}$  y  $0,11 \text{ A}$ . Se escoge un integrado L298N para operar ambos motores mediante un puente H correspondiente.

Por el contrario, el motor paso a paso de la articulación traslacional en el manipulador y los motorreductores Faulhaber que comandan las ruedas omnidireccionales requieren mayor potencia, por lo tanto se analizan de forma detallada a continuación.

<sup>10</sup>SFR05 Ultrasonic Range Finder. Technical Specification. Devantech. Disponible en: <http://www.robotstorehk.com/sensors/doc/srf05tech.pdf>

<sup>11</sup>JL-20A130 DC Gear Motor. Kingly Motor. Disponible en: <http://www.kinglymotor.com/upload/2010071414391489.pdf>

### 3.4.1. Motor paso a paso (deslizador eTrack)

El deslizador eTrack del manipulador incorpora un motor paso a paso NEMA17 de National Instruments<sup>12</sup>. Su circuito de acople y secuencia de pasos dependen del tipo de motor y la cantidad de cables que posee, por lo cual primero es necesario analizar las especificaciones que brinda el fabricante.

- **Tipo:** Bipolar - Dos fases, cuatro cables
- **Ángulo del paso:** 1,8 grados
- **Pasos por revolución:** 200 pasos
- **Corriente por fase:** 1 amperio máximo
- **Voltaje:** 5 a 24 voltios

Se propone implementar un puente H alimentado a 24 V para cada fase del motor. En este caso, se complementa el integrado L298N con el integrado L297, el cual se encarga de generar la secuencia de manejo del motor paso a paso bipolar. Dicho circuito solo requiere 3 entradas: un PWM para indicar cada cuánto se desea que el motor dé un paso y dos pines digitales para resetear el control y seleccionar el sentido de giro. El circuito entrega un '1' lógico cada vez que completa un ciclo (secuencia completa de 4 pasos). Se deben obtener los factores de conversión para la posición y velocidad del efector final en función de la señal de entrada.

El sistema eTrack posee el motor NEMA17 acoplado al tornillo sin fin con una relación 1 : 1 ; por lo tanto, una revolución del motor corresponde a una revolución del tornillo y a un desplazamiento lineal del efector final igual al paso del tornillo (12 mm). El motor completa una revolución cada 200 pasos, lo cual es equivalente a 50 ciclos. El factor de conversión se denota en la Ecuación 3.36, donde  $h$  es la altura en mm del efector final y  $c_{pp}$  es la cantidad de ciclos realizados por el motor paso a paso. El recorrido total del manipulador es 300 mm, por lo tanto el dominio de  $c_{pp}$  es (0, 1250) ciclos.

$$K_1 = \frac{h}{c_{pp}} = \frac{(12 \text{ mm/rev})}{(50 \text{ ciclos/rev})} = 0,24 \text{ mm/ciclo} \quad (3.36)$$

<sup>12</sup>NEMA 17 Motor. Stepper Motors and Encoders. National Instruments. Disponible en: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-311/lang/en#header0>

La velocidad del efector final se relaciona al comportamiento del integrado L297 según la señal de entrada. Cuando ingresa el tren de pulsos, cada flanco de bajada (“0” lógico) genera un nuevo paso del motor. Por lo tanto, la cantidad de “0”s por segundo (equivalente a la frecuencia del PWM) es igual a la cantidad de pasos por segundo que el motor gira.

El factor de conversión se indica en la Ecuación 3.37, donde  $v_{ef}$  es la velocidad del efector final en  $\text{mm/s}$  y  $f_{pp}$  es la frecuencia en Hz del PWM saliente. La velocidad máxima del deslizador es  $220 \text{ mm/s}$ , al hallar la equivalencia en frecuencia el dominio de  $f_{pp}$  es  $(0,3666.\bar{6}) \text{ Hz}$ .

$$K_2 = \frac{v_{ef}}{f_{pp}} = \frac{(0,24 \text{ mm/ciclo})}{(4 \text{ pasos/ciclo}) (1 \text{ Hz/paso/s})} = 0,06 \text{ mm/s*Hz} \quad (3.37)$$

Al hacer uso de la salida del L297 como realimentación, se obtienen los dos factores de conversión de la Ecuación 3.38. En este caso,  $h$  es la altura en mm del efector final,  $c_{in}$  es la cantidad de ciclos entrantes,  $v_{ef}$  es la velocidad del efector final en  $\text{mm/s}$  y  $f_{in}$  es la frecuencia en Hz del tren de pulsos entrante.

$$\begin{aligned} K_3 &= \frac{h}{c_{in}} = \frac{(12 \text{ mm/rev})}{(50 \text{ ciclos/rev})} = 0,24 \text{ mm/ciclo} \\ K_4 &= \frac{v_{ef}}{f_{in}} = \frac{(0,24 \text{ mm/ciclo})}{(1 \text{ Hz/ciclo/s})} = 0,24 \text{ mm/s*Hz} \end{aligned} \quad (3.38)$$

El dominio de  $c_{in}$  es el mismo de  $c_{pp}$ . Puesto que la realimentación funciona por ciclos y no por pasos, el dominio de  $f_{in}$  es equivalente a la cuarta parte de  $f_{pp}$ , es decir  $(0,916.\bar{6}) \text{ Hz}$ .

### 3.4.2. Motorreductores Faulhaber (ruedas suecas)

Se requieren motores de mayores prestaciones para las ruedas omnidireccionales debido al torque requerido para vencer la inercia ( $425 \text{ mN} * \text{m}$ , ver Subsección 3.1.2). Dada la dificultad de ejercer dicho torque de forma continua a altas velocidades, se toma  $0,33 \text{ m/s}$  como una primera estimación de diseño para la velocidad lineal del chasis.

Al hallar la velocidad angular con base en el radio de las ruedas ( $26,9875 \text{ mm}$ ), se obtiene  $w_{op} = 117 \text{ rpm}$ .

Se escoge el motorreductor DC marca Faulhaber, referencia 2342 – S – 036 – SR / 22F / IE2 – 16 (motor<sup>13</sup> / reductor<sup>14</sup> / encoder<sup>15</sup>). El eje del reductor se acopla directamente al rin de cada rueda. Dicha referencia posee las siguientes características:

- Tipo: Micromotor DC con reductor y encoder
- Diámetro: 23 mm
- Largo: 42 mm motor + 42,9 mm reductor + 11,7 mm encoder
- Voltaje nominal: 36 V (será operado a 24 V)
- Reductor: Ø22 mm, engranes planetarios, relación 51 : 1
- Canales del encoder: 2 canales, desfase 90°
- Pasos por revolución: 16 pasos

En primer lugar, se evalúa el máximo torque admisible en el reductor. Su magnitud es superior al valor requerido ( $0,9 \text{ N} \cdot \text{m} > 0,425 \text{ N} \cdot \text{m}$ ), lo cual garantiza un óptimo funcionamiento en operación continua. Se obtienen la velocidad y el torque de entrada como parámetros de verificación, tal como se indica en la Ecuación 3.39.

$$\begin{aligned}n_{in} &= (117 \text{ rpm}) (51) = 5967 \text{ rpm} \\M_{in} &= \frac{(425 \text{ mN} \cdot \text{m})(100)}{(51)(70)} = 11,9 \text{ mN} \cdot \text{m}\end{aligned}\tag{3.39}$$

Analizando los criterios de optimización<sup>16</sup> para validar la selección, se comprueba que la potencia requerida es menor a la máxima disponible ( $7,48 \text{ W} < 8,77 \text{ W}$ ), al igual que la mitad de la velocidad sin carga respecto a la velocidad máxima ( $2721 \text{ rpm} < 6000 \text{ rpm}$ ) y el torque de arranque respecto a la mitad del torque máximo ( $11,9 \text{ mN} \cdot \text{m} < 30,74 \text{ mN} \cdot \text{m}$ ).

---

<sup>13</sup>Series 2342-CR. DC-Micromotors. Graphite Commutation. Faulhaber. Disponible en: [http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN\\_2342\\_CR\\_DFF.pdf](http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN_2342_CR_DFF.pdf)

<sup>14</sup>Series 22F. Planetary Gearheads. Faulhaber. Disponible en: [http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN\\_22F\\_DFF.pdf](http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN_22F_DFF.pdf)

<sup>15</sup>Series IE2-16. Magnetic Encoders. Faulhaber. Disponible en: [http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN\\_IE2-16\\_DFF.pdf](http://www.faulhaber.com/uploadpk/EN_IE2-16_DFF.pdf)

<sup>16</sup>Technical Information. Faulhaber. p. 8. Disponible en: <http://www.faulhaber.com/servlet/com.itmr.waw.servlet.Anzeige?fremdaufruf=ja&kdid=40929&sprachid=1&htdigurl=/n167866/i86089.html>

Al calcular los valores efectivos de operación, se obtiene una corriente de arranque  $I_H = 1,509$  A, una corriente de operación  $I = 0,311$  A y una velocidad de operación  $n = 4391$  rpm. Al hallar la velocidad lineal equivalente del chasis móvil, se obtiene  $v_{op} = 0,243$  m/s. Se realiza la comprobación de dichos valores mediante Simulink, donde se evalúa la función de transferencia del motorreductor según las constantes del circuito de armadura y el sistema mecánico. La Figura ?? presenta el diagrama de bloques completo, el cual arroja  $v_{op} = 0,2457$  m/s, valor bastante cercano a los cálculos teóricos.

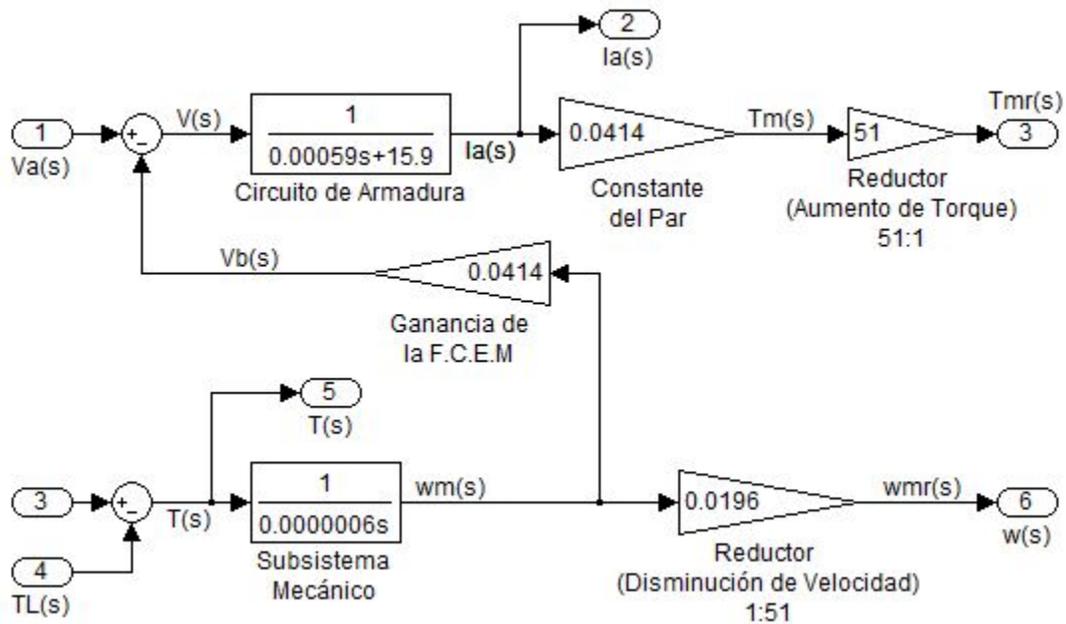


Figura 3.19: Diagrama de Bloques del Motorreductor

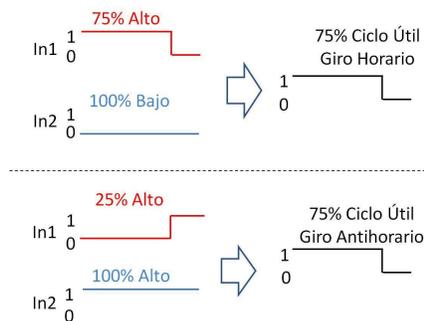


Figura 3.20: Regulación de Velocidad Mediante Ciclo Útil

Fuente: Adaptada de SACCO, Mario. PWM, MOSFET y Motores CC (Parte III).  
 Disponible en: <http://www.neoteo.com/pwm-mosfet-y-motores-cc-parte-iii>

El circuito de operación de los motores nuevamente usa los puentes H del integrado L298N, sin embargo, la velocidad de los motores será regulada mediante el ciclo útil de un PWM, siguiendo la relación entre las señales de entrada que se presenta en la Figura 3.20.

### 3.4.3. Realimentación mediante encoders

Según el funcionamiento del encoder acoplado a los motorreductores Faulhaber, cada paso es equivalente a una rotación de  $22,5^\circ$ , lo cual se convierte en un avance lineal de  $1,6 \text{ cm}$  en el chasis. Los factores de conversión para el desplazamiento se ilustran en la Ecuación 3.40, donde  $c_{en}$  denota los ciclos de encoder contabilizados,  $\theta_R$  denota el desplazamiento angular de la rueda en rad y  $x_{ch}$  denota el desplazamiento lineal del chasis en cm.

$$\begin{aligned} K_5 &= \frac{\theta_R}{c_{en}} = \frac{(2\pi \text{ rad/rev})}{(16 \text{ ciclos/rev})} = 0,3927 \text{ rad/ciclo} \\ K_6 &= \frac{x_{ch}}{c_{en}} = K_5 * (2,69875 \text{ cm}) = 1,0598 \text{ cm/ciclo} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Adicionalmente, los factores de conversión para la velocidad se presentan en la Ecuación 3.41, donde  $f_{en}$  denota la frecuencia en Hz del tren de pulsos generado por el encoder,  $w_R$  denota la velocidad angular de la rueda en  $\text{rad/s}$  y  $v_{ch}$  denota la velocidad lineal del chasis en  $\text{cm/s}$ .

$$\begin{aligned} K_7 &= \frac{w_R}{f_{en}} = \frac{(0,3927 \text{ rad/ciclo})}{(1 \text{ Hz/ciclo/s})} = 0,3927 \text{ rad/s*Hz} \\ K_8 &= \frac{v_{ch}}{f_{en}} = K_7 * (2,69875 \text{ cm}) = 1,0598 \text{ cm/s*Hz} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Dado que el sentido de giro se conoce de antemano como se observó en la Figura 3.20, sólo es necesario monitorear uno de los dos canales disponibles del encoder. A fin de ajustar la salida a  $V_{CE} = 3 \text{ V}$  e  $I_C = 10 \text{ mA}$ , se repite el ajuste del colector usado para los sensores (ver Anexo A.2).

Reemplazando en  $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ , se obtiene  $R_C = 900 \Omega$ . Al resolver el paralelo entre la resistencia de  $6,8 \text{ k}\Omega$  interna del encoder y la resistencia externa de ajuste, el valor resultante es  $R_{PU} = 1037 \Omega$ . Aproximando  $R_{PU}$  a  $1 \text{ k}\Omega$ , se procede a verificar la corriente de salida y la potencia consumida como se indica en la Ecuación 3.42. Por lo tanto, se escoge una resistencia de  $1 \text{ k}\Omega$  a  $1/4 \text{ W}$  para acondicionar la salida del encoder.

$$I_{PU} = I_C * \frac{6,8 \text{ k}\Omega}{R_{PU} + 6,8 \text{ k}\Omega} = I_C * \frac{6,8 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 6,8 \text{ k}\Omega} = 8,72 \text{ mA}$$

$$P = (I_{PU})^2 R_{PU} = (8,72 \text{ mA})^2 (1 \text{ k}\Omega) = 76 \text{ mW}$$
(3.42)

### 3.5. OTROS COMPONENTES

A continuación se detalla el análisis, diseño y selección de componentes adicionales que los agentes requieren para desarrollar la tarea de transporte.

#### 3.5.1. Unidad de control

Se debe seleccionar una unidad de control adecuada para los agentes a partir de los parámetros obtenidos en los diferentes diseños. Como se observa en el Cuadro 3.7, el sistema requiere un total de 32 puertos, así como una serie de funciones adicionales.

5 Puertos de PWM	1 para Velocidad del Manipulador
	4 para Velocidad de los Motorreductores
19 Puertos de Salida	5 para Gripper y Tensión del Manipulador
	4 para Control del Manipulador
	12 para Control de Motorreductores
	3 para Ultrasonido y Alarmas de Obstáculo
6 Puertos de Entrada	4 para Lectura de Encoders
	1 para Lectura de Sensor Inductivo
	1 para Lectura de Ciclos del Manipulador (Realimentación)
2 Conversores ADC	Sensor Infrarrojo; Sensor de Ultrasonido
Módulo Wi-Fi	Comunicación del Agente con la Unidad Central
5 Timers	Configuración PWM del Manipulador
	Conf. PWM Motorreductores; Conteo Ciclos del Manipulador
	Realimentación de los Motorreductores
	Activación de los Sensores
	Medición del Tiempo de Retorno (Ultrasonido)

Cuadro 3.7: Parámetros de Selección de la Unidad de Control

Se selecciona el sistema embebido TS-7800 de la marca Technologic Systems – Embedded ARM, el cual cumple las especificaciones propuestas. Adicionalmente, se incorpora un módulo inalámbrico conectado vía USB, el cual trabaja el Estándar IEEE 802.11n (el computador / unidad central se conecta a un router para entablar la red de comunicación inalámbrica con los agentes).

### 3.5.2. Alimentación de los robots

Se requiere brindar a ambos robots una alimentación de 24 V con mínimo 25 minutos de operación continua antes de recargar. Debido a que no se cuenta con baterías de 24 V, se conectan dos baterías de 12 V en serie. Para seleccionar una capacidad adecuada, es necesario determinar el consumo total del circuito a partir de la suma de las corrientes máximas a través de todos los elementos independientes.

Elemento	Valor en mA
Motor del Gripper	100
Tensión del Manipulador	$100 + (70 + 36)$
Motor NEMA17	$2 * (1000)$
Control del Motor NEMA17	$(80 + 70 + 36)$
Motorreductores	$4 * (311)$
Control de Motorreductores	$60 + 2 * (70 + 36)$
Sensor inductivo	50
Sensor infrarrojo	$(75 + 50)$
Sensor de ultrasonido	50
Sistema embebido	1000
Alarma (LED y buzzer)	50
Total en mA	5283

Cuadro 3.8: Consumo Total Máximo del Circuito

Como se demuestra en el Cuadro 3.8, el consumo total es de 5283 mA o 5,283 C/s. En consecuencia, la carga total consumida en 25 minutos (1500 s) es 7924,5 C. Se selecciona la referencia DHB1240 de Dahua<sup>17</sup>, la cual provee un tiempo de operación aproximado de 25 minutos bajo una corriente de descarga de 6 A. Transcurridos 25 minutos, el voltaje de la batería se reduce a 10 V, valor al cual los sistemas ya no funcionan a su máximo rendimiento. Para la tasa de operación más cercana (1 hora), se tiene una capacidad de 2,3 A \* h o 8280 C. Dicha capacidad es superior a la carga total consumida, con lo cual se valida la selección.

### 3.5.3. Estación de recarga de baterías

Puesto que los operarios del sistema no poseerían conocimientos en electrónica, debe proveerse un método que facilite la recarga de las baterías. En el chasis de los robots se

<sup>17</sup>DHB1240. Sealed Lead-Acid Batteries. Dahua. Disponible en: <http://www.dahua-battery.com/pdf/39.pdf>

propone una conexión mediante un interruptor DPDT que alterne la batería a la cual se conectan los terminales de carga y un interruptor DPST que desconecte la alimentación de los circuitos (ver Anexo A.2).

La estación de recarga posee una etapa de carga y una etapa de testeo independientes, entre las cuales se puede alternar mediante un interruptor DPDT. La primera toma una alimentación de 110 V AC que pasa a través de un transformador, un rectificador y un regulador LM317, resultando en un voltaje DC de baja corriente para cargar las baterías<sup>18</sup>. La segunda permite conectar una batería para evaluar si ya ha finalizado su carga.<sup>19</sup>

Con una corriente de carga constante  $I_C = 1 \text{ A}$  (correspondiente a un proceso de carga rápida), el tiempo aproximado de carga para cada batería es de ocho horas como mínimo. Adicionalmente, siguiendo un criterio de 2,3 V por cada celda de 2 V, se escoge un voltaje de carga  $V_C = 13,8 \text{ V}$ . El proceso consiste en cargar la batería por el tiempo indicado, tras el cual se desconecta la etapa de carga y se verifica que la batería se encuentra a máxima carga mediante la etapa de testeo. Dicho proceso se repite para cada una de las baterías restantes en ambos robots.

### 3.5.3.1. Etapa de carga

Para la etapa de carga, el voltaje del transformador es igual a 18,2 V (sumando voltaje de carga, 3 V de caída en el regulador y 1,4 V de caída en los dos diodos del ciclo), así que se selecciona un transformador con salida de 18 V. Al conectar un transistor al terminal de ajuste del regulador LM317 (ver Anexo A.2), una resistencia en su nodo común permite fijar la corriente de carga máxima. Dado el voltaje de transistor  $V_{Tr} = 0,6 \text{ V}$  e  $I_C = 1 \text{ A}$ , se obtiene una resistencia de  $0,6 \Omega$ .

Tomando  $R_{IC} = 0,58 \Omega$ , se obtiene una corriente de carga  $I_C = 1,07 \text{ A}$  y una potencia consumida  $P = 0,64 \text{ W}$ , por lo tanto se escoge  $R_{IC} = 0,58 \Omega$  a 1 W. Puesto que el transistor entra en conducción a 0,6 V, por debajo de este valor el regulador es ajustado con base a la corriente que circula.

---

<sup>18</sup>DE KORT, Jim. Lead/Acid Battery Charger. Disponible en: <http://www.vt52.com/diy/myprojects/other/charger/charger.htm>

<sup>19</sup>PALAZZESI, Ariel. Construya un Indicador del Estado de Carga de sus Baterías. Disponible en: <http://www.neoteo.com/construya-un-indicador-del-estado-de-carga-de-sus>

Un potenciómetro se ubica después del regulador para ajustar el voltaje de salida a  $V_C = 13,8\text{ V}$  con exactitud. Como medida de seguridad se colocan fusibles de 2 A en el devanado primario del transformador y después de los diodos rectificadores, así como un diodo conectado en realimentación al LM317 para proteger el regulador ante voltajes negativos (batería conectada y alimentación desconectada).

### 3.5.3.2. Etapa de testeo

Para el circuito de testeo, un potenciómetro configurado a 11,5 V permite ajustar el encendido de los indicadores con el fin de obtener las respuestas del Cuadro 3.9. Con base en los 12 V de la batería; dicho circuito requiere un diodo Zener de 7,5 V y dos resistencias de 1 k $\Omega$  para limitar la corriente que circula por los indicadores LED.

Estado de Carga	LED Verde	LED Rojo
Batería Cargada	ON	OFF
Carga Intermedia	ON	ON
Batería Descargada	OFF	ON

Cuadro 3.9: Indicadores de Carga de Batería

### 3.5.4. Estiba y estante

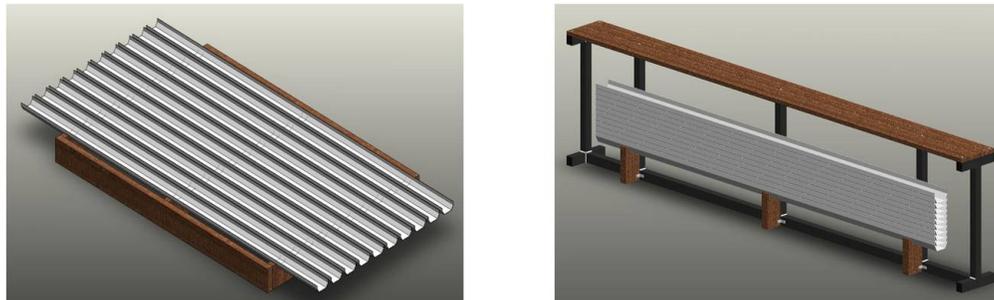


Figura 3.21: Puntos Inicial y Final de la Tarea de Transporte

Los puntos inicial y final de la tarea de transporte corresponden a la estiba y al estante, los cuales poseen ranuras que garantizan una ubicación correcta de las canaletas. Ambos acomodan un máximo de 10 canaletas, distribuidas horizontalmente sobre la estiba y apiladas verticalmente en el estante, como se observa en la Figura 3.21.

En ambos elementos, las canaletas quedan a una altura mínima de 170 mm respecto al suelo, la cual a su vez corresponde a la altura mínima del gripper debido a restricciones mecánicas. Dicha alineación permite tratar la altura mínima como el valor "0" del eje de coordenadas Z en el manipulador, facilitando los cálculos cinemáticos/dinámicos así como el control del subsistema.

Los marcadores de trayectoria se ubican en proximidad a dichos puntos con base en la distancia que deben tener los agentes respecto a las canaletas y respecto a sí mismos dependiendo del punto de actuación. En el caso de recolección, se presenta un acercamiento de 3 m a 3,5 m, por el contrario en la descarga la distancia entre sí aumenta de 3 m a 3,25 m.

## Capítulo 4

# MODELO DE COOPERACIÓN MULTINIVEL

Este capítulo presenta el proceso de análisis y diseño que se llevó a cabo para desarrollar los algoritmos y estrategias que el Sistema Multi-Agente implementa en la realización autónoma de la tarea de transporte cooperativo. El proceso para la obtención de modelo de cooperación multinivel se ilustra en la Figura 4.1.

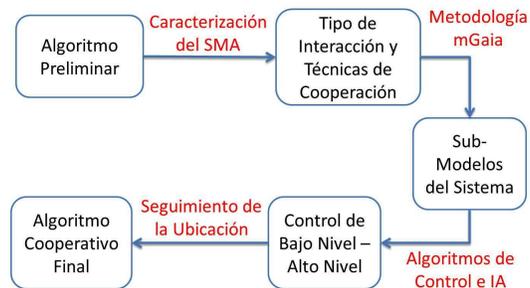


Figura 4.1: Diagrama de Flujo - Modelo de Cooperación Multinivel

En primer lugar, se formula una versión preliminar del algoritmo cooperativo para los agentes que describe sus requisitos básicos. Acto seguido, se realiza una caracterización del Sistema Multi-Agente (SMA) en términos de sus elementos e interacciones para seleccionar las técnicas a usar en el manejo de las tres facetas fundamentales asociadas a la cooperación:

- Colaboración
- Coordinación

- Resolución de conflictos

Con base en una metodología de Programación Orientada a Agentes (POA), se elaboran una serie de sub-modelos que representan abstracciones relacionadas a los agentes que hacen uso de dichas técnicas.

Una vez obtenidos los diversos sub-modelos del sistema, se establecen sus correspondientes algoritmos de control e Inteligencia Artificial, con los cuales se consolida la versión final del algoritmo cooperativo. El control de bajo nivel se reduce a algoritmos simples, los cuales están directamente relacionados a variables presentes en los subsistemas descritos en el tercer capítulo.

Por el contrario, el control de alto nivel se asocia a procesos de mayor complejidad, los cuales hacen uso del control de bajo nivel para realizar funciones más avanzadas y de carácter abstracto, tales como la cooperación entre los agentes y el seguimiento de su ubicación.

## **4.1. ALGORITMO PRELIMINAR DE COOPERACIÓN**

Antes de entrar en detalle con la conformación de un algoritmo que consolide los agentes como robots cooperativos, es posible elaborar un algoritmo preliminar que captura los procesos principales que el agente lleva a cabo antes y después de realizar la tarea de transporte.

Dicho algoritmo se presenta en la Figura 4.2, en la cual se puede observar las condiciones que se deben cumplir para realizar un ciclo de transporte, así como el procedimiento a seguir una vez la tarea se determina concluida debido a batería insuficiente para continuar.

Aunque el algoritmo preliminar se plantea en términos bastante subjetivos, su estructura establece el sustento de los diversos análisis y planteamientos que se desarrollan en las siguientes secciones y que se acoplan en la versión final del algoritmo cooperativo.

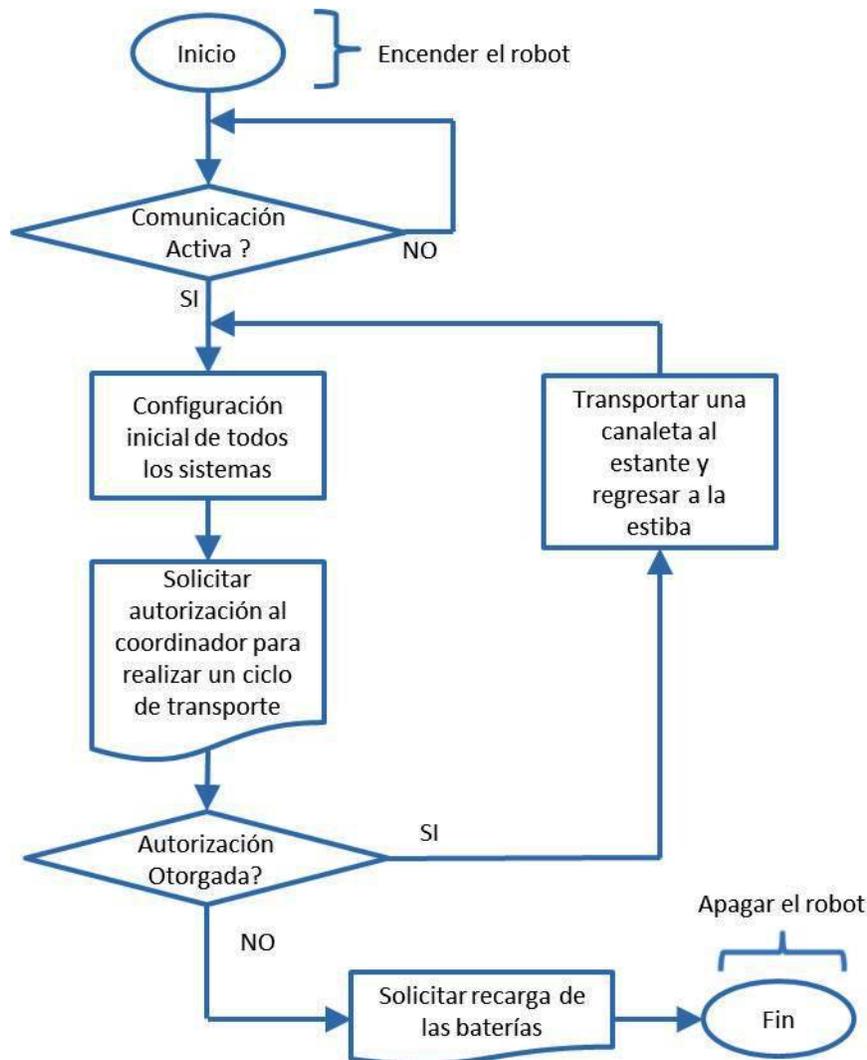


Figura 4.2: Versión Preliminar del Algoritmo de Cooperación

## 4.2. CARACTERIZACIÓN DEL SMA

En primer lugar, se identifican todos los elementos al interior del sistema con base en los conceptos del Sistema Multi-Agente (ver Figura 2.1):

- **Ambiente de Trabajo:** Almacén de cadena; sección de productos de construcción.
- **Agentes Cooperativos:** Dos robots móviles omnidireccionales y un coordinador. El objetivo principal de los agentes es transportar canaletas desde un punto inicial a un punto final y su manejo está a cargo de la unidad central (coordinador).

- **Sensores:** Tres (Ultrasonido, Infrarrojo, Inductivo).
- **Actuadores:** Dos (Conjunto brazo - gripper, Conjunto motores - ruedas).
- **Actor:** Un trabajador humano. Supervisa el monitor de la unidad central y conecta los robots a la estación de recarga.
- **Objetos Pasivos:** Cuatro (Las canaletas, la estiba, el estante y la estación de recarga).
- **Eventos:** Cinco posibles: Se pierde la línea guía, se detecta un marcador, se detecta un obstáculo, la batería llega a nivel bajo o se cae la comunicación.
- **Recursos:** Tres (Carga de batería, línea de trayectoria, marcadores de etapa).

#### 4.2.1. Selección de técnicas de cooperación

Dada la existencia de un coordinador, se afirma que el sistema es centralizado. Al analizar la caracterización de los agentes cooperativos, se encuentra que todos son agentes basados en modelos, ya que se basan en un historial de percepciones (asociadas a los recursos) para tomar decisiones. Adicionalmente, los agentes son homogéneos, puesto que como se describió en la Sección 3.1 ambos robots móviles poseen el mismo diseño y funciones.

Las habilidades y recursos de un solo agente son insuficientes para cumplir el objetivo principal, por lo cual se debe entablar una cooperación de colaboración coordinada. La colaboración se fundamenta en una jerarquía, puesto que el coordinador toma las decisiones de mayor importancia, situándolo como un agente de mayor rango respecto a los robots móviles.

La carga restante en las baterías de los agentes es el recurso de mayor importancia en el sistema, actuando como referencia del tiempo de operación restante para cada robot. Por lo tanto, al escoger el uso de regulaciones para la resolución de conflictos, el coordinador otorga prioridad al robot con menor carga a fin de determinar las acciones a tomar. Reuniendo las técnicas mencionadas y consultando el Cuadro 2.1, se concluye que la situación global del sistema es una colaboración coordinada.

Es importante resaltar que el sistema es concurrente, puesto que los agentes móviles son activos de manera simultánea y se encuentran en interacción constante. Visto de otra forma, el programa concurrente está compuesto por 3 programas secuencias (uno por cada agente) ejecutándose en paralelo.

### 4.3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA POA

Al escoger una metodología de Programación Orientada a Agentes (POA) para el desarrollo del Sistema Multi-Agente (SMA) entre las diferentes alternativas actualmente existentes, un factor clave es la facilidad de representación de la tarea de transporte a ejecutar, es decir, la movilidad de los agentes. Se opta por aplicar un enfoque basado en la metodología mGaia para el Desarrollo de Software Orientado a Agentes (AOSE), cuyas 3 fases se presentan en la Figura 4.3.

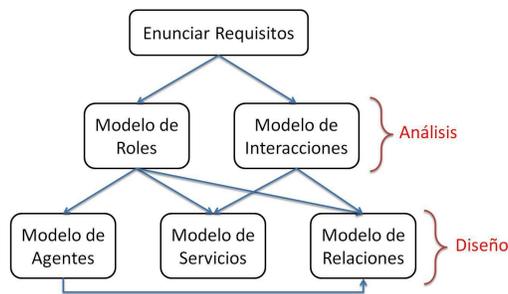


Figura 4.3: Fases de la Metodología mGaia

Fuente: Adaptada de SUTANDIYO, Weanna *et al.* Experiences with Software Engineering of Mobile Agent Applications. Proceedings of the 2004 Australian Software Engineering Conference. p. 5.

Desarrollada por Weanna Sutandiyo *et al*<sup>1</sup>, consiste en una expansión de la metodología Gaia presentada en la Sección 2.2 que agrega características para la representación de agentes móviles. En este caso, el único requisito a enunciar en la fase inicial es el objetivo global que se definió para el coordinador en la Sección 4.1, es decir monitorear el transporte de canaletas desde un punto inicial a un punto final a cargo de los agentes. Acto seguido, se procede a la etapa de análisis, en la cual se elaboran los dos primeros sub-modelos para el Sistema Multi-Agente.

<sup>1</sup>SUTANDIYO, Weanna *et al.* Experiences with Software Engineering of Mobile Agent Applications. Proceedings of the 2004 Australian Software Engineering Conference. p. 4. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1290487>

### 4.3.1. mGaia: Etapa de análisis

La etapa de análisis comprende la elaboración de los sub-modelos de roles e interacciones. Se define un único rol denominado *Transportador*, al cual se asigna el conjunto de habilidades descrito en el Cuadro 4.1.

Habilidad	Descripción
<b>H1</b>	Iniciar/Detener movimiento
<b>H2</b>	Elevar/Bajar brazo
<b>H3</b>	Tensionar/Liberar giro del brazo
<b>H4</b>	Abrir/Cerrar el gripper
<b>H5</b>	Detectar un marcador/obstáculo/línea guía
<b>H6</b>	Enviar mensaje al coordinador
<b>H7</b>	Activar/Desactivar alarma de luz y alarma sonora
<b>H8</b>	Reactivar las comunicaciones

Cuadro 4.1: Habilidades del Rol *Transportador*

Las interacciones hacen referencia a las acciones cooperativas<sup>2</sup>; aquéllas que no pueden ser realizadas por una sola instancia de rol o que pueden generar conflicto entre las instancias. Se identifican 4 interacciones, las cuales se presentan en el Cuadro 4.2. Es importante notar que aunque el retorno en teoría no requiere interacción entre los dos transportadores, la comunicación dada la interacción facilita evitar un choque entre ambos.

Interacción	Descripción
<b>I1</b>	Recolectar una canaleta
<b>I2</b>	Iniciar/Detener el transporte del punto inicial al punto final
<b>I3</b>	Descargar una canaleta
<b>I4</b>	Iniciar/Detener el retorno del punto final al punto inicial

Cuadro 4.2: Interacciones entre Agentes

### 4.3.2. mGaia: Etapa de diseño

Pasando a la etapa de diseño, se requiere elaborar los sub-modelos de agentes, servicios, relaciones y movilidad. El sub-modelo de agentes nos indica el tipo (estacionario o móvil) y cantidad de instancias existentes para cada rol, así como un mapeo de sus habilidades<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>Ibid., p. 4.

<sup>3</sup>Ibid., p. 5.

En este caso, *Transportador* tiene 2 instancias denominadas *Robot Líder* y *Robot Seguidor*, ambas de tipo móvil. Al mapear las habilidades, se encuentran los comandos del Cuadro 4.3.

Comando	Descripción
<b>C1</b>	Activar/Desactivar los motorreductores 1 a 4 en sentido horario o antihorario
<b>C2</b>	Activar/Desactivar el motor paso a paso en sentido horario o antihorario
<b>C3</b>	Activar/Desactivar el motor DC #1
<b>C4</b>	Activar/Desactivar el motor DC #2 en sentido horario o antihorario
<b>C5</b>	Detectar un valor lógico “Alto (H)” en cualquiera de los 3 sensores
<b>C6</b>	Enviar una trama de datos vía Wi-Fi a la unidad central
<b>C7</b>	Activar/Desactivar el LED y el buzzer
<b>C8</b>	Reiniciar el módulo Wi-Fi

Cuadro 4.3: Comandos de los Agentes

El sub-modelo de servicios denota las capacidades de los agentes relativas a actuación y toma de decisiones (entablar negociaciones)<sup>4</sup>. La mayoría de los servicios están correlacionados a los eventos posibles en el SMA. Se establecen los servicios indicados en el Cuadro 4.4. Se debe destacar que los 3 últimos servicios corresponden a eventos internos del sistema, directamente relacionados con los eventos externos descritos por **S3** a **S5**.

Servicio	Descripción
<b>S1</b>	Negociar la realización de un ciclo completo de transporte y retorno según el nivel de batería restante
<b>S2</b>	Reconocer la etapa de interacción en la cual se encuentran los agentes con base en el conteo de marcadores
<b>S3</b>	Generar una alerta si se detecta un obstáculo y detener el movimiento del convoy hasta que sea removido
<b>S4</b>	Cambiar la dirección de movimiento predeterminada si se pierde la línea guía (dicho cambio depende de la subsección de trayectoria)
<b>S5</b>	Detener el movimiento y reiniciar el módulo Wi-Fi si se cae la comunicación, continuar el movimiento una vez se restablezca
<b>S6</b>	Solicitar permiso al coordinador para retornar al movimiento natural del agente
<b>S7</b>	Detener el movimiento si llega un mensaje entrante de “detener”, luego recurrir a <b>S6</b> para continuar el movimiento
<b>S8</b>	Cambiar velocidad y orientación de movimiento con <b>H1</b> si llega un mensaje entrante de “cambiar”, luego recurrir a <b>S6</b> para retomar el movimiento original

Cuadro 4.4: Servicios Disponibles en el SMA

<sup>4</sup>Ibid., p. 5.

Prosiguiendo al sub-modelo de relaciones, éste indica la forma en la cual los agentes se comunican con la unidad central<sup>5</sup>. Se identifican dos procesos de comunicación posibles, los cuales se detallan en el Cuadro 4.5.

Relación	Descripción
<b>R1</b>	Reporte al coordinador. Los agentes envían un único mensaje y no es necesario esperar respuesta
<b>R2</b>	Ciclo de una fase. Se envía un mensaje a la unidad central y se procede según la respuesta recibida

Cuadro 4.5: Procesos de Comunicación entre Agentes y Coordinador

A diferencia de los anteriores, el sub-modelo de movilidad consiste en la elaboración de un esquema de viaje basado en la trayectoria de los agentes móviles<sup>6</sup>. El esquema de los transportadores se aprecia en la Figura 4.4, donde los números normales corresponden al transporte **I2** y los números subrayados corresponden al retorno **I4**.

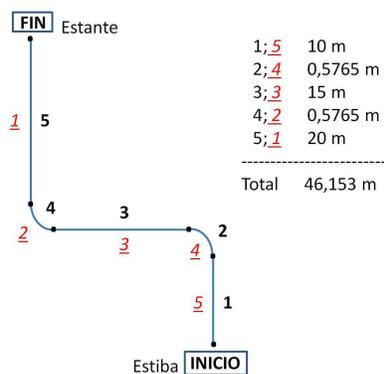


Figura 4.4: Esquema de Viaje de los Agentes (NO a escala)

### 4.3.3. Asociación de sub-modelos obtenidos

La Figura 4.5 muestra la interrelación entre todos los sub-modelos obtenidos según mGaia. Se observa la analogía entre los resultados y los niveles de microsociedad y agentes que conforman el modelo de cooperación multinivel. Por ejemplo, los sub-modelos de roles e interacciones se expresan en términos que se manejan en una sociedad convencional, mientras que los sub-modelos del nivel inferior hacen uso de términos relacionados a los agentes físicos (actuadores, sensores, entre otros).

<sup>5</sup>Ibid., p. 5.

<sup>6</sup>Ibid., p. 6.

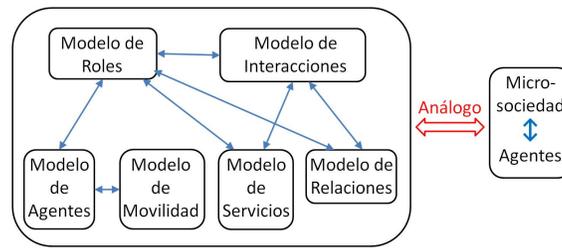


Figura 4.5: Analogía entre Sub-Modelos y Niveles de Cooperación

Una ventaja fundamental al usar esta clase de metodologías radica en la capacidad de comprender el funcionamiento básico del sistema (nivel de microsociedad) sin entrar a analizar su funcionamiento detallado (nivel de agentes). Dicho factor es crucial en aplicaciones en las cuales los usuarios finales del sistema no poseen conocimientos en robótica e ingeniería.

## 4.4. CONTROL DE BAJO NIVEL

Al evaluar los sub-modelos resultantes de la metodología mGaia, se evidencia con facilidad que los elementos contenidos en los comandos de los agentes son los que requieren desarrollar estrategias de control de bajo nivel, a excepción de algunos componentes tales como los motores DC sencillos y las alarmas.

### 4.4.1. Movimiento de los agentes (comando C1)

En primer lugar, los comandos de movimiento **C1** para los agentes deben ser especificados en términos de dirección y velocidad. Los sentidos de giro de los cuatro motorreductores según la dirección del chasis se obtienen a partir del Cuadro 3.5 y la velocidad se define por el porcentaje de ciclo útil en la señal PWM enviada a los circuitos de potencia, donde un 100% equivale a la velocidad máxima de los motorreductores ( $9,02 \text{ rad/s}$ ).

El error de velocidad está dado por la diferencia entre el valor de entrada y el valor de salida realimentado, que se mide mediante el encoder acoplado. El algoritmo debe ajustar los porcentajes de PWM para llevar dicho error a cero. Puesto que el proceso es el mismo para todos los motorreductores, el algoritmo consiste en 4 controladores idénticos operando simultáneamente.

#### 4.4.2. Posicionamiento del gripper (comando C2)

De forma similar, el comando **C2** del motor paso a paso se especifica en una escala de 1 a 10, donde el número asignado corresponde a la altura a la cual se debe posicionar el efector final debido a los apilados de canaletas distintos en la estiba (punto inicial) y el estante (punto final). El objetivo del algoritmo es determinar el sentido de giro comparando la altura actual con la altura deseada, y posteriormente activar el motor por el total de ciclos obtenido.

Al apilar las canaletas una sobre otra, su separación vertical es de 26,5 mm. Tomando en cuenta que cada ciclo de pasos se traduce a un avance lineal de 0,24 mm (ver Sección 3.4), la diferencia entre cada nivel de la escala de altura corresponde aproximadamente a 110 ciclos.

#### 4.4.3. Detección en los sensores (comando C5)

Para el comando **C5** de los sensores, el algoritmo sólo requiere activar una bandera indicando cuál(es) de los sensores han generado una señal alta (es importante recordar que para el sensor infrarrojo dicho valor se debe detectar mediante un conversor ADC, ver Sección 3.3).

#### 4.4.4. Envío de tramas de datos (comando C6)

A fin de crear una estructura única para las tramas de datos que se envían mediante el comando **C6**, se proponen tramas con una cabecera de dos identificadores numéricos, los cuales indican el tipo de mensaje y su contenido, seguidos por el valor correspondiente. El primer tipo de mensajes son los mensajes de reporte que se presentan en el Cuadro 4.6, los cuales usan una relación **R1** puesto que no requieren respuesta.

1	1	Listo	1	7	Curva Izq.	1	13	Grip. Cerrado
1	2	Detener	1	8	Curva Der.	1	14	Etapa
1	3	Adelante	1	9	Nuevo Mov.	1	15	Mcont
1	4	Atrás	1	10	Viejo Mov.	1	16	Giro Hor. 180°
1	5	Izquierda	1	11	Altura Máx.	1	17	Giro Antihor. 180°
1	6	Derecha	1	12	Altura OK			

Cuadro 4.6: Mensajes de Reporte

La segunda categoría son los mensajes hacia el agente contrario, que se observan en el Cuadro 4.7. Usan una relación **R1** ya que el remitente no requiere respuesta; sin embargo, el coordinador debe pasar el mensaje al agente destinatario.

2	18	Cambiar Mov.	2	20	Mover Amigo
2	19	Regresar Mov.	2	21	Detener Amigo

Cuadro 4.7: Mensajes Hacia el Agente Contrario

La tercera categoría son los mensajes de pregunta, denotados en el Cuadro 4.8. El coordinador debe responder al agente con una variable correspondiente al mensaje, por lo cual usan una relación **R2**.

3	22	Confir. Permiso	3	26	Altura de Descarga
3	23	Confir. Normalidad	3	27	Movimiento Actual
3	24	Nivel de Batería	3	28	Velocidad Actual
3	25	Número de Canaleta	3	29	Velocidad Amigo

Cuadro 4.8: Mensajes de Pregunta

La última categoría corresponde a los mensajes de alerta del Cuadro 4.9. Aunque usan una relación **R1**, se diferencian de los mensajes de reporte ya que el coordinador debe desplegar un mensaje en pantalla según la alerta correspondiente. En el caso de las alertas 31 y 32, el supervisor del sistema debe acudir a la ubicación de los agentes para resolver la situación indicada.

4	30	Bloqueo	4	32	Llamar Recarga
4	31	Acudir a Bloqueo	4	33	Online

Cuadro 4.9: Mensajes de Alerta

## 4.5. SEGUIMIENTO DE LA UBICACIÓN

Como paso previo al planteamiento de un método para monitorear la ubicación de los agentes en el entorno, se debe analizar a fondo la trayectoria que realizan. La Figura 4.6 presenta un diagrama más detallado de la ruta que interconecta los puntos inicial y final, incluyendo la totalidad de marcadores y líneas guía. Las siglas L0 y S0 denotan el punto inicial de ambos agentes, mientras que las siglas subsecuentes indican su ubicación al final de cada una de las 4 acciones cooperativas, **I1** a **I4**.

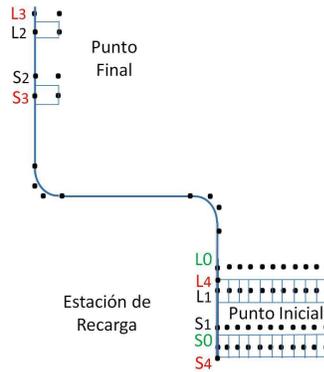


Figura 4.6: Ruta Detallada de los Agentes (NO a escala)

#### 4.5.1. Consideraciones respecto a la trayectoria

Se observa la existencia de varias zonas en las cuales los marcadores no quedan sobre las líneas guía, así como la diferencia de ubicación entre L4-L0 y S4-S0. Esto es causado por la separación geométrica entre los sensores infrarrojo e inductivo, ya que ciertos movimientos resultan en los puntos de detección correspondientes desplazándose a lo largo de ejes distintos.

Bajo esta ruta, los agentes realizan un giro horario de  $180^\circ$  grados antes de emprender el retorno y un giro de  $180^\circ$  al llegar nuevamente al punto inicial a fin de posicionar su sensor de ultrasonido en la dirección correcta (ver Sección 3.3). La diferencia en el sentido de giro permite que el sensor infrarrojo detecte una única línea guía al realizar los giros, que se reducen a mantener  $\dot{\theta}_I$  constante.

Para los tramos rectos, la trayectoria de los agentes se reduce a mantener  $\dot{x}_I$  o  $\dot{y}_I$  constante, dependiendo del caso. Los tramos curvos toman bajo consideración el robot que se encuentre realizando la curva así como la comparación entre su radio de giro y la ubicación de su gripper, para determinar la reducción de velocidad necesaria.

El primer factor se debe a la velocidad tangencial del robot que toma la curva, la cual es inferior a la velocidad máxima del robot en movimiento rectilíneo. Respecto al segundo factor, cuando el radio de giro coincide con la ubicación del gripper, el extremo de la canaleta permanece estático mientras el robot realiza la curva, por lo cual el robot contrario debe detenerse para evitar doblar la canaleta.

Con base a la longitud de la canaleta, el coordinador monitorea la separación entre ambos agentes según un factor de tolerancia. Si la distancia entre ambos cae bajo un umbral mínimo, se ordena reducir la velocidad del robot delantero. Caso contrario, si la distancia entre ambos supera un umbral máximo, se ordena aumentar la velocidad del robot trasero.

#### 4.5.2. Seguimiento mediante odometría

Se propone un seguimiento de la ubicación de los agentes basado en odometría. Los pasos de dicho algoritmo son:

1. Hallar velocidades reales de las ruedas mediante los encoders
2. Mediante cinemática directa, calcular velocidades del robot en el frame global
$$\dot{\xi}_I = \begin{bmatrix} \dot{x}_I & \dot{y}_I & \dot{\theta}_I \end{bmatrix}^T$$
3. Con base en las trayectorias previamente planeadas y el tiempo de ejecución, obtener las posiciones  $x_I, y_I$  y la orientación  $\theta_I$

En los tramos rectos, la ubicación está plenamente expresada por los datos del tercer paso. Para los tramos curvos, se toma en cuenta el radio de curvatura, con lo cual la posición está dada por  $x_I = r \cos \theta_I$  y  $y_I = r \sin \theta_I$ . El sistema tiene la capacidad de pausar el tiempo de ejecución cuando los robots se detengan, ya sea de forma planeada o debido a un obstáculo en la trayectoria. Adicionalmente, las ubicaciones de todos los marcadores son conocidas, por lo cual cada detección sirve como un punto de comparación para verificar y compensar el error de posición.

### 4.6. ALGORITMO FINAL DE COOPERACIÓN

Integrando los resultados del presente capítulo, el algoritmo principal de los agentes cooperativos se presenta en la Figura 4.7. Las cuatro acciones cooperativas se han descrito de forma resumida; sus versiones completas, así como otra serie de algoritmos asociados a interrupciones y al coordinador se presentan en el Anexo A.3. Al comparar el algoritmo preliminar de la Figura 4.2 con el algoritmo final de la Figura 4.7, podemos ver como los procesos ahora son descritos en términos de habilidades y como el ciclo de transporte se define como la secuencia de las 4 acciones cooperativas.

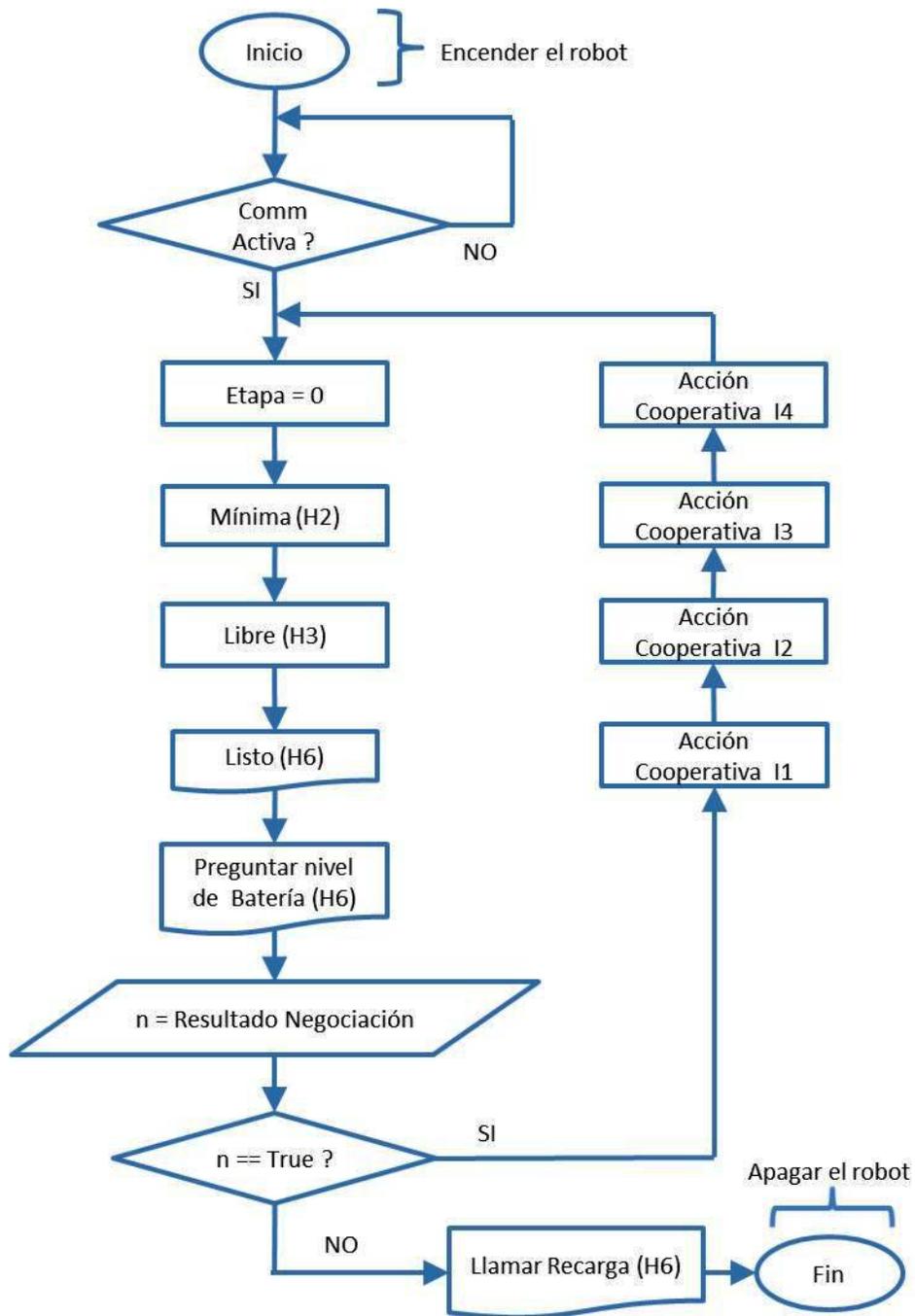


Figura 4.7: Algoritmo Principal de los Agentes Cooperativos

# Capítulo 5

## DISEÑO DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

Este capítulo describe el procedimiento que se llevó a cabo para transferir la caracterización del Sistema Multi-Agente (SMA) y los algoritmos desarrollados al ambiente de programación de MATLAB, haciendo uso de la Programación Orientada a Agentes (POA).

Adicionalmente, se hace énfasis en una serie de modificaciones necesarias en los algoritmos para visualizar el comportamiento del sistema en una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Los resultados de la metodología POA utilizada no incluyen dicha visualización de forma explícita, lo cual otorga al diseñador libertad de elección en términos del lenguaje de programación.

### 5.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DEL ENTORNO

El objetivo principal del entorno es la verificación de todas las facetas del algoritmo de cooperación, en concordancia con las especificaciones planteadas en el diseño de los robots. El supermercado de construcción se desarrolla en el entorno como un mundo bidimensional en concordancia con la trayectoria propuesta, como se observa en la Figura 5.1.



## 5.2. CORRELACIÓN DE LOS SUB-MODELOS DEL SMA

El primer paso en la simulación del Sistema Multi-Agente (SMA) es la correlación práctica de cada uno de los sub-modelos obtenidos mediante la metodología de Programación Orientada a Agentes (POA) seleccionada.

En primer lugar, el sub-modelo del rol (*Transportador*) se convierte en la definición de una clase, de la cual el programa principal emplea dos instancias (*Robot Líder* y *Robot Seguidor*).

La definición de la clase *Transportador* incluye una serie de variables, entre las cuales se destacan la información del agente (su ubicación), sus capacidades de comunicación (su estado actual), sus elementos reales (el gripper, los motores, entre otros) y unos parámetros adicionales que permiten su representación gráfica en el ambiente virtual. Dichas variables de parámetros se agregan a la simulación, puesto que no son generadas explícitamente por la metodología POA.

Al incorporar el sub-modelo de agentes, encontramos que las habilidades se convierten en funciones, las cuales modifican los valores de las variables asociadas a las instancias de *Transportador*. Dichas funciones de habilidades a su vez hacen uso de funciones externas generadas a partir del sub-modelo de relaciones para facilitar la comunicación entre las instancias *Robot Líder* y *Robot Seguidor*.

Los eventos en el sistema se implementan como interrupciones, las cuales son manejadas por rutinas pequeñas formadas con base al sub-modelo de servicios. Las acciones cooperativas se transforman en el cuerpo del programa secuencial de los agentes móviles, como se vio en el diagrama de flujo de la Figura 4.7.

## 5.3. DESARROLLO DE LA GUI

El programa principal de la simulación se divide en 2 partes. La primera sección maneja la representación gráfica de la totalidad del Sistema Multi-Agente, incluyendo el trazado de la trayectoria en el sub-modelo de movilidad. La segunda sección se constituye por el tercer programa secuencial, correspondiente al agente coordinador.

Se destaca que la implementación del algoritmo mantiene la jerarquía que se estableció en la concepción del sistema. El programa del agente coordinador se ubica en la cima de la jerarquía, seguido por los programas de los agentes móviles en un nivel intermedio y las funciones de los sub-modelos en diversos niveles inferiores.

### 5.3.1. Descripción de las áreas de la GUI

A fin de evaluar el desempeño del algoritmo ante una variedad de escenarios, se disponen varios botones en la interfaz gráfica para activar los eventos de pérdida de comunicación y aparición de obstáculos en la trayectoria para cualquiera de los agentes.

El primer evento no posee restricciones, y se levanta automáticamente después de un tiempo predeterminado. Por el contrario, el segundo evento está restringido para evitar apariciones de obstáculos en situaciones físicamente imposibles (por ejemplo, en medio de la canaleta) y su desaparición se controla a voluntad, a fin de evaluar los dos desenlaces distintos según su tiempo de permanencia.

Es importante señalar que debido a restricciones del componente de dibujo en MATLAB, las acciones cooperativas son divididas en subsecciones a fin de garantizar la actualización constante del ambiente virtual.

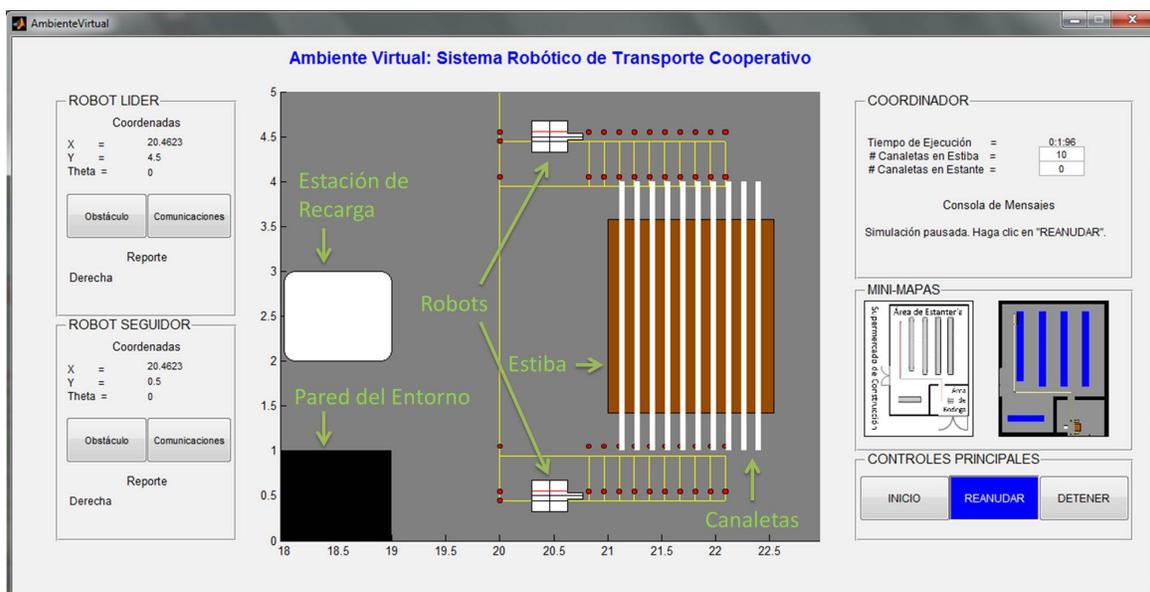


Figura 5.2: Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica de usuario desarrollada se observa en la Figura 5.2; en este caso se presenta una captura correspondiente a la recolección de una canaleta en el punto inicial (estiba). El ambiente virtual se encuentra al centro de la pantalla, rodeado por paneles correspondientes a cada uno de los agentes (los dos transportadores y el coordinador), dos mini-mapas del entorno global y los controles del programa (iniciar, pausar/reanudar o detener la simulación) en la esquina inferior derecha.

En el caso de los robots móviles, sus paneles despliegan la ubicación del agente (posición y orientación), su estado actual y los botones de generación de eventos (pérdida de comunicación y aparición de obstáculo). El panel del coordinador despliega el tiempo de ejecución de la tarea de transporte, el número de canaletas restante en los puntos inicial - final y una consola de mensajes referentes al estado global del sistema.

### 5.3.2. Representación de los elementos del SMA

Dado que la cámara se desplaza con los agentes, los números a los costados del ambiente virtual representan la escala y distancia equivalente en metros de la escena. Al interior del ambiente virtual, los puntos rojos representan los marcadores de la trayectoria (detectados por el sensor inductivo), la cual corresponde a las líneas delgadas amarillas (detectadas por el sensor infrarrojo).

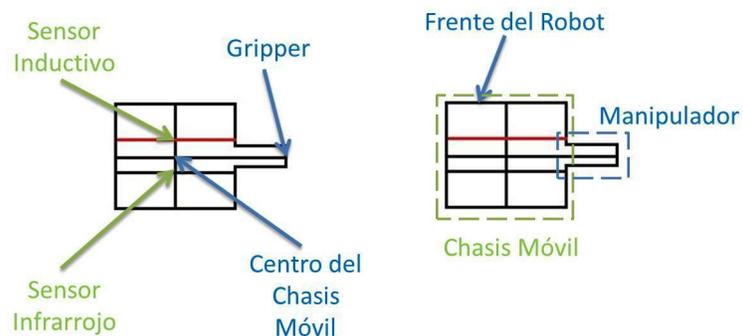


Figura 5.3: Dibujado de los Robots en el Ambiente Virtual

Los robots se ilustran como dos rectángulos acoplados; el de mayor tamaño corresponde al chasis móvil y el de menor tamaño corresponde al manipulador. Como se muestra en la Figura 5.3, las intersecciones entre las líneas denotan puntos de interés, tales como la ubicación de los sensores. Es importante destacar que a lo largo de la trayectoria solo

se ve en pantalla una porción de la totalidad del entorno planteado en la Figura 5.1 e indicado en los mini-mapas de la GUI. Los tipos de objetos restantes que se pueden presentar en el ambiente virtual se observan en la Figura 5.4.

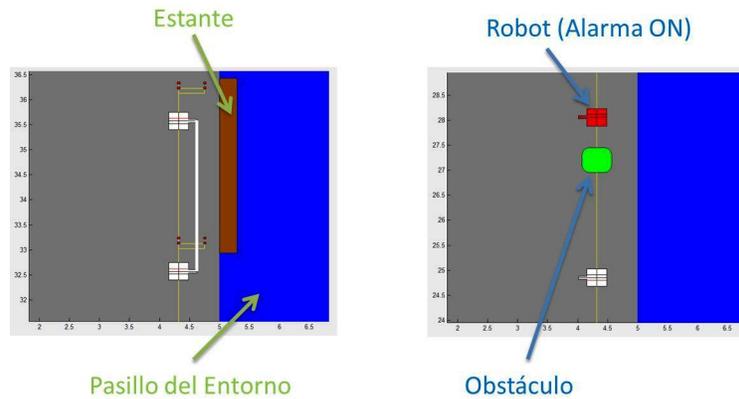


Figura 5.4: Objetos Adicionales en el Ambiente Virtual

La imagen izquierda corresponde a la llegada al punto final de descarga de canaletas, en el cual se denotan el estante y uno de los pasillos del entorno. La imagen derecha corresponde a la aparición de un obstáculo en frente de uno de los agentes, el cual cambia su color en forma intermitente denotando la activación de sus alarmas.

### 5.3.3. Aproximaciones respecto al comportamiento real

Dado el comportamiento ideal de la simulación, existen dos componentes que difieren del desempeño exacto del sistema en el mundo real. El primero hace referencia a los mensajes que circulan entre los agentes durante la realización de la tarea. Dichos mensajes circulan de manera casi instantánea en MATLAB, por lo cual se introducen retardos de tiempo pequeño a fin de ver los cambios cuando se envían varios mensajes de forma consecutiva.

El segundo componente se relaciona al movimiento de los agentes, el cual es determinístico en la simulación. El movimiento real de los agentes es estocástico, debido a márgenes de error asociados a diversos factores tales como las ruedas y los motorreductores. Dichos márgenes solo se pueden estimar mediante mediciones con los componentes reales. Por ende, el funcionamiento de la interrupción creada para desvíos de la trayectoria solo puede ser evaluado una vez construido el sistema real.

# Capítulo 6

## RESULTADOS

Este capítulo contiene un análisis breve de los resultados obtenidos en el entorno de simulación, en términos de los requisitos planteados en cuanto al diseño del Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC) y a los parámetros establecidos para la tarea de transporte de las canaletas.

### 6.1. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN

Al ejecutar una prueba completa del entorno de simulación generando varios obstáculos y pérdidas de comunicación manualmente, tal como se observa en la Figura 6.1, los agentes completaron 3 recorridos de ida y vuelta en un tiempo de 23 min 39 s, lo cual equivale aproximadamente a 7 min 53 s por cada trayecto.

Dicho tiempo es inferior a los 25 min de carga disponible en las baterías, por ende se confirma que la planeación de la tarea y la longitud de trayectoria son adecuadas y brindan un margen de tiempo suficiente para lidiar con múltiples eventos indeseados sin que éstos causen una falla debido a carga insuficiente.

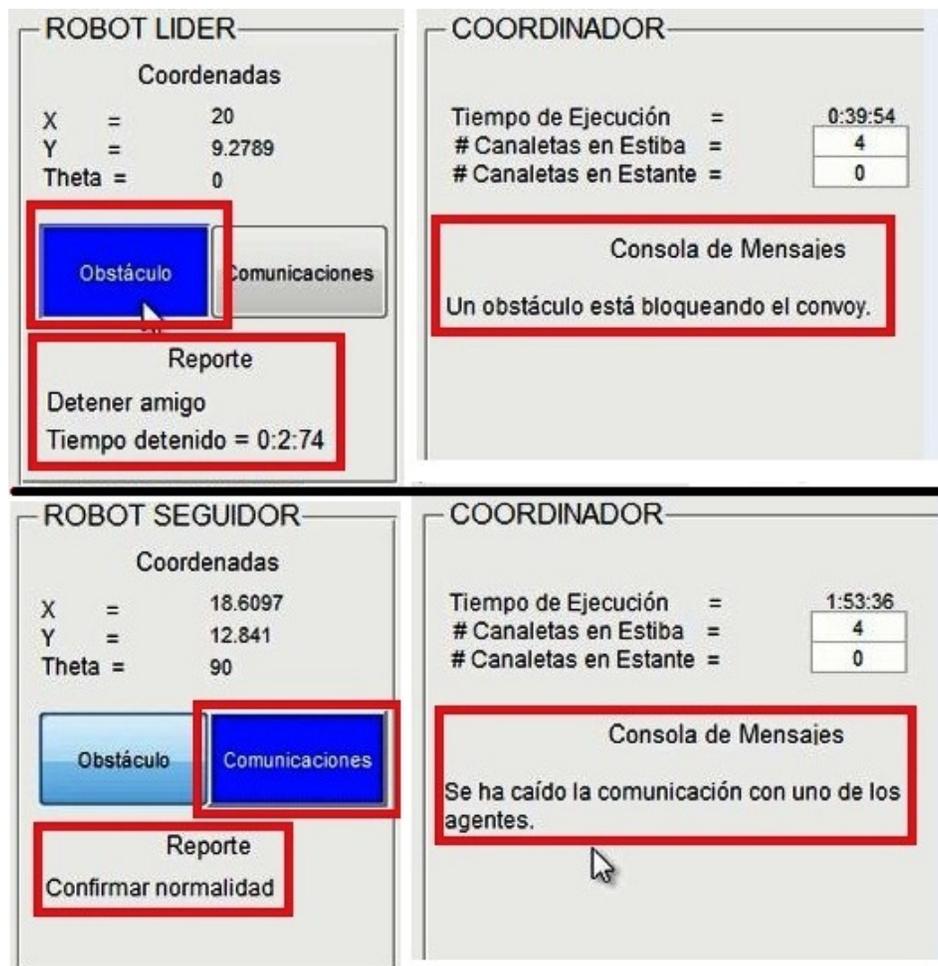


Figura 6.1: Pruebas con Eventos de Interrupción

## 6.2. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN ACCIONES COOPERATIVAS

A fin de analizar dicha prueba en más detalle, se observa el desempeño del algoritmo para cada una de las cuatro acciones cooperativas. Para la recolección de una canaleta en el punto inicial, se observa en la Figura 6.4 que la separación de canaletas en la estiba y el plan de acercamiento de los agentes es suficiente, puesto que no se presenta riesgo de contacto con cualquier objeto distinto a la canaleta actual.

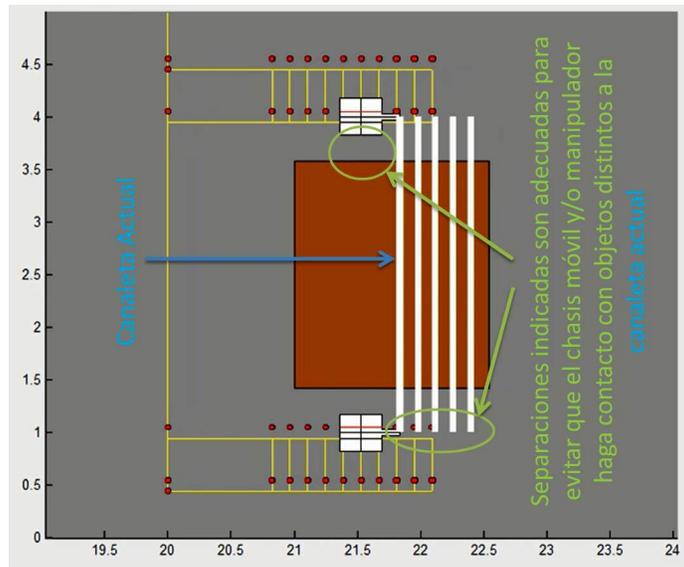


Figura 6.2: Análisis de la Acción Cooperativa I1

En el transporte de canaletas del punto inicial hacia el punto final, se confirmó que la disposición de los marcadores respecto a la trayectoria delineada es adecuada para tomar las curvas. Adicionalmente, la rutina de monitoreo de distancia entre grippers ajustó las velocidades de los robots de forma acorde a dicha curva, tal como se indica en la Figura 6.3.

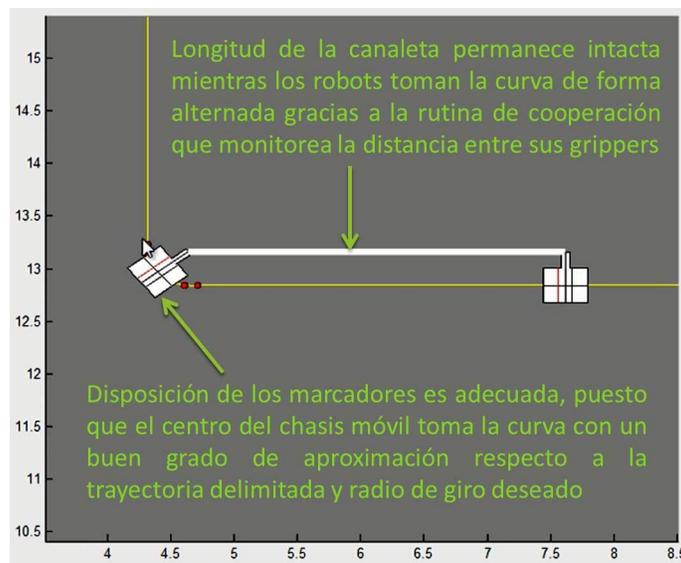


Figura 6.3: Análisis de la Acción Cooperativa I2

En cuanto a la descarga de canaletas en el punto final, la Figura 6.4 muestra que la separación entre el máximo acercamiento de la trayectoria y la ubicación del estante es suficiente para evitar una colisión con los extremos del estante por parte del chasis móvil o del manipulador.

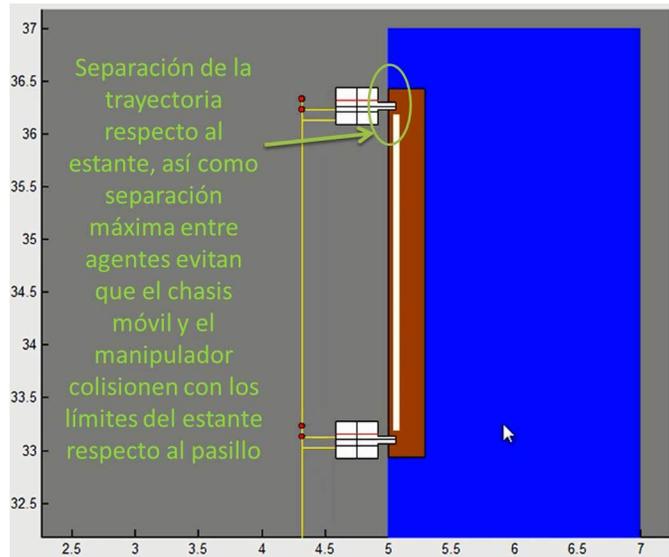


Figura 6.4: Análisis de la Acción Cooperativa **I3**

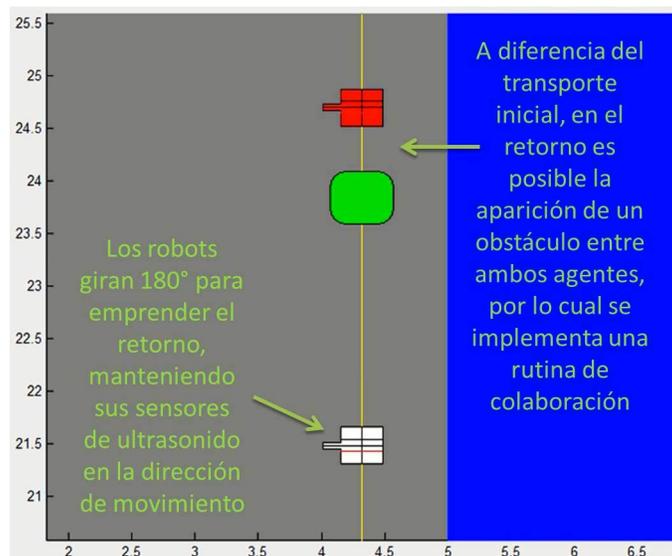


Figura 6.5: Análisis de la Acción Cooperativa **I4**

Finalmente, el retorno del punto final al punto inicial guarda amplias similitudes con el transporte debido al mismo trazado de trayectoria; esto se refleja en cambios respecto a

la cantidad de marcadores contabilizados en cada segmento. La Figura 6.5 confirma un manejo adecuado ante la aparición de un obstáculo entre ambos, una variación de dicho evento que solo es posible en el transcurso de esta acción cooperativa.

### 6.3. ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE COOPERACIÓN

La construcción global del algoritmo presentó una capacidad notoria de robustez al generar vínculos de colaboración implícitos. Como ejemplo se retoma el caso presentado en la Figura 6.5, en el cual el desempeño del agente seguidor no aumenta al seguir su curso ignorando al agente líder (bloqueado por un obstáculo), por lo cual se detiene hasta que dicho evento es resuelto.

Se verificó la efectividad de las rutinas de coordinación a lo largo de la simulación en puntos cooperativos cruciales tales como la navegación alternada de los tramos curvos y la coordinación de acciones para manipular las canaletas de forma simultánea. A modo de ejemplo se tiene la captura de la Figura 6.6, en la cual el robot líder espera a que el seguidor termine su rotación antes de negociar un ciclo nuevo de transporte.

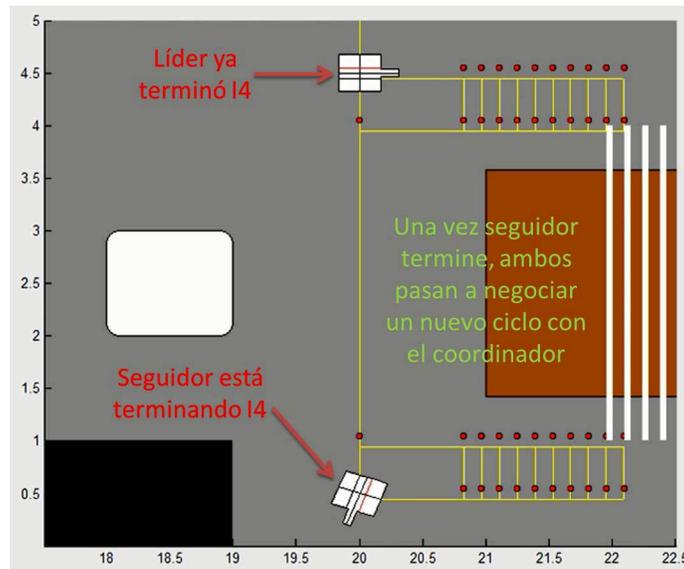


Figura 6.6: Demostración de Coordinación en un Punto Cooperativo Crucial

Ejecuciones sucesivas demostraron una resolución adecuada de los conflictos posibles en el sistema: el vaciado del punto inicial, el llenado del punto final antes de completar los

3 recorridos y una suspensión de la tarea cuando eventos han causado una interrupción de gran duración y por consiguiente, una descarga de las baterías. El reporte del coordinador para estos 3 casos se presenta en la Figura 6.7.

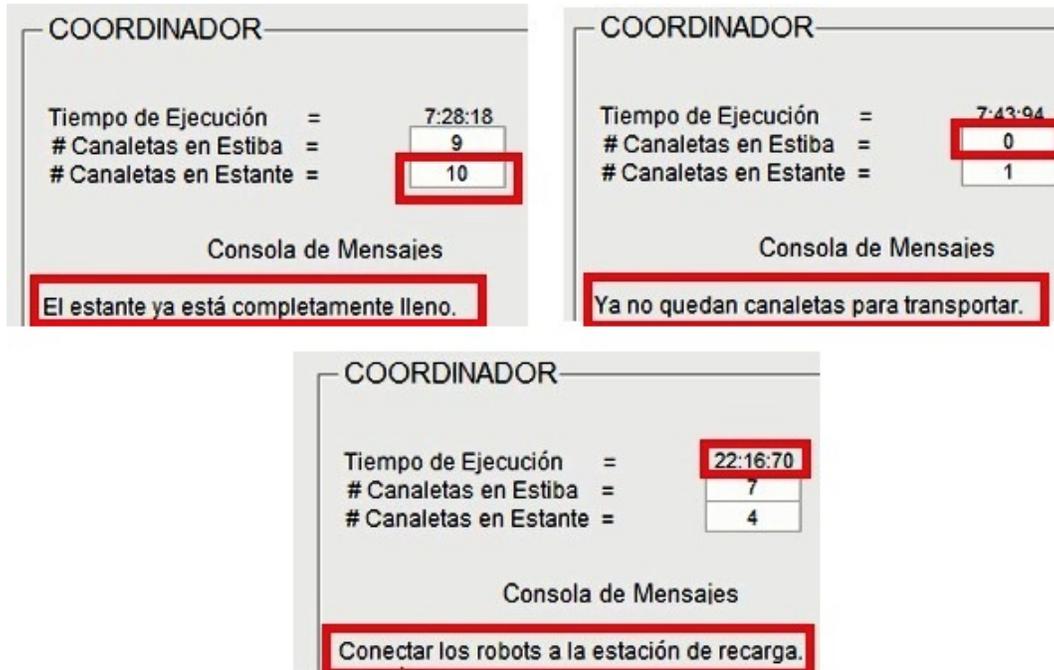


Figura 6.7: Reportes ante Conflictos Potenciales en el Sistema

## 6.4. ANÁLISIS EN TÉRMINOS DEL DISEÑO

El uso de un chasis móvil con 3 grados de maniobrabilidad fue considerablemente versátil para los diversos movimientos que los agentes realizaron al sostener la canaleta simultáneamente, tales como las traslaciones laterales de la Figura 6.4 y las rotaciones sobre el centro del chasis de la Figura 6.6. Igualmente, el manipulador de 2 grados de libertad presentó un desempeño adecuado y preciso en la manipulación de canaletas.

Dada la estructura del deslizador eTrack que conforma el manipulador, el amplio rango de movimiento vertical se obtiene al costo de una baja capacidad de carga y un rango de giro limitado en la articulación rotacional que lo sostiene. Dicho factor reduce parcialmente la maniobrabilidad global del convoy de transporte y puede generar puntos ciegos para el sensor de ultrasonido como el ejemplo de la Figura 6.4, en la cual los robots son incapaces de observar posibles obstáculos en el área de la estiba.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvieron los modelos cinemáticos/dinámicos del robot para el diseño compuesto por un manipulador con 2 grados de libertad (uno de ellos correspondiente a una articulación de rotación libre) y un chasis móvil con 3 grados de maniobrabilidad (obtenidos mediante una distribución de ruedas omnidireccionales). La selección de dichos subsistemas es altamente beneficiosa para robots cooperativos, pero puede convertirse en una limitante debido a un mayor costo de componentes robustos para cargas y velocidades elevadas. En caso de extender el diseño propuesto al transporte de otros objetos, se recomienda limitar los requerimientos a cargas útiles no mayores a 6 kg a fin de evitar el rediseño de los subsistemas de manipulación y locomoción.

Se desarrolló un entorno de simulación compuesto por un ambiente virtual con una “vista aérea” bidimensional y un programa concurrente conformado por secciones secuenciales correspondientes a cada agente. Se aplicaron una serie de restricciones a nivel gráfico para simplificar la representación sin afectar los diversos sistemas y algoritmos analizados; entre ellas se destaca una unión rígida entre chasis móvil y manipulador, dada la dificultad de asignar y transformar coordenadas polares a rectangulares para cada uno de los subsistemas constituyentes del robot. Se recomienda la búsqueda de complementos a MATLAB desarrollados por la comunidad para facilitar la representación de los robots en caso de aumentar la complejidad de su diseño con nuevos componentes y subsistemas.

Se diseñó un algoritmo de inteligencia cooperativa basado en las interacciones de los agentes durante la realización de la tarea de transporte, cuya especificación y subdivisión facilitó el uso de trayectorias preplaneadas. A fin de aumentar la robustez ante eventos

restrictivos tales como la aparición de obstáculos, se recomienda complementar el algoritmo con técnicas avanzadas de planeación tales como Algoritmos de Búsqueda A\* Híbrida y Programación Dinámica de Trayectorias. Dichas técnicas se han implementado exitosamente en sistemas de conducción autónoma de vehículos para ajustar la planeación inicial en tiempo real según cambios que se presentan en un mundo dinámico.

Se diseñó un algoritmo para el seguimiento de la ubicación de los robots basado en odometría, complementado con el uso y conteo de marcadores de trayectoria. Dichos marcadores aumentaron la precisión del transporte al facilitar el seguimiento de puntos en los cuales ocurren eventos importantes del sistema, tales como cambio de movimiento o manipulación sincronizada. A fin de reducir las modificaciones que se requieren sobre el espacio de trabajo para instalar dichos marcadores, se propone la implementación de un sistema de visión de máquina y el uso de técnicas avanzadas de localización tales como Filtros de Partículas.

Se destaca la dificultad de combinar un manipulador capaz de actuar cargas significativas con un robot móvil capaz de velocidades relativamente elevadas, ya que el peso de los componentes robustos requeridos se convierte en la fracción mayoritaria del peso total del robot en comparación a la carga útil del sistema (payload). Esto se refleja a lo largo del proceso de diseño en la estrecha interrelación de variables tales como velocidades, torques, corrientes, carga eléctrica, masas e inercias. Evaluando el Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC) en su totalidad, el desempeño del diseño es satisfactorio para la aplicación propuesta, sin embargo la versatilidad del sistema es limitada ante posibles extensiones de la aplicación al transporte y manipulación de elementos distintos.

En adición a los componentes constituyentes del Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC), la implementación de dicho sistema en un entorno de trabajo real requiere un análisis más profundo del error de trayectoria debido al movimiento estocástico de los agentes y la disposición de la red inalámbrica. Ésta última debe tomar en cuenta factores tales como la propagación de la señal inalámbrica en un ambiente con diversos obstáculos, el cubrimiento de la señal para la totalidad de la trayectoria y la influencia de los retardos de comunicación en el comportamiento del algoritmo cooperativo.

La complejidad de los algoritmos creados en la implementación y/o simulación de un Sistema Multi-Agente aumenta sustancialmente en la medida que las tareas desempeñadas por los agentes requieran un alto grado de coordinación y sincronización. Un factor importante a analizar en trabajos futuros es el planteamiento de pautas para establecer coordinación y sincronización en robots móviles que usen técnicas avanzadas de control, localización y planeación de acciones. En el caso de la manipulación y transporte cooperativo dicho requerimiento no es trivial, puesto que esta clase de técnicas pueden generar acciones conflictivas en los agentes y potencialmente nocivas para el elemento a manipular/transportar.

# Bibliografía

- [1] ADAMS, A. *et al.* Cooperative Material Handling by Human and Robotic Agents: Module Development and System Synthesis. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525797>
- [2] ALONSO, Fernando *et al.* SONIA: A Methodology for Natural Agent Development. ESAW'04 - Fifth International Workshop on Engineering Societies in the Agents World, 2004. Disponible en: [http://www.irit.fr/ESAW04/PAPERS/ESAW04\\_Paper9.pdf](http://www.irit.fr/ESAW04/PAPERS/ESAW04_Paper9.pdf)
- [3] BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos. Octava Edición. Editorial Pearson. México, 2003.
- [4] BROWN, Russell G. JENNINGS, James S. A Pusher/Steerer Model for Strongly Cooperative Mobile Robot Manipulation. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525941>
- [5] CAO, Y. Uny; FUKUNAGA, Alex S. y KAHNG, Andrew B. Cooperative Mobile Robotics; Antecedents and Directions. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. Disponible en: <http://www.ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525801>
- [6] CAUSSE, O. y PAMPAGNIN, L. H. Management of a Multi-Robot System in a Public Environment. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=526168>

- [7] CLEAVELAND, Rance y SMOLKA, Scott A. Concurrency Working Group Report. En : ACM Workshop on Strategic Directions in Computing Research. EE.UU., 1996. Disponible en: <http://www.cs.sunysb.edu/~sas/sdcr/report/final/final.html>
- [8] CRAIG, John J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Segunda Edición. Addison - Wesley. EE.UU., 1989.
- [9] DELOACH, Scott A. y WOOD, Mark F. Multiagent Systems Engineering: the Analysis Phase. Technical Report. Air Force Institute of Technology, 2000. Disponible en: <http://people.cis.ksu.edu/~sdeloach/publications/TechReports/AFIT%20EN-TR-00-02.pdf>
- [10] FERBER, Jacques. Les Systèmes Multi-Agents; Vers une Intelligence Collective. Inter Editions, 1995. Disponible en: [http://www.lirmm.fr/~ferber/publications/Les SMA\\_Ferber.pdf](http://www.lirmm.fr/~ferber/publications/Les_SMA_Ferber.pdf)
- [11] GIAMARCHI, Frédéric. Robots Móviles. Estudio y Construcción. Editorial Paraninfo. Madrid, 2001.
- [12] GONZÁLEZ, Enrique y BUSTACARA, César. Desarrollo de Aplicaciones Basadas en Sistemas Multiagentes. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2007.
- [13] HARA, Fumio; YASUI, Yuji y ARITAKE, Toshiyuki. A Kinematic Analysis of Locomotive Cooperation for Two Mobile Robots along a General Wavy Road. En : Intelligent Robots and Systems '95 : Human Robot Interaction and Cooperative Robots, 1995. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=525443>
- [14] HASHIMOTO, Masafumi; OBA, Fuminori y EGUCHI, Toru. Dynamic Control Approach for Motion Coordination of Multiple Wheeled Mobile Robots Transporting a Single Object. En : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=583900>
- [15] IGLESIAS, Carlos A. *et al.* Analysis and Design of Multiagent Systems Using MAS-CommonKADS. En : WOOLRIDGE, Michael J; RAO, Anand y SINGH, Munindar Paul. Intelligent Agent IV: Agent Theories, Architectures and Languages. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. Alemania, 1998. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.104.717>

- [16] KUO, Benjamin C. Sistemas de Control Automático. Séptima Edición. Editorial Prentice Hall. México, 1996.
- [17] OTA, Jun y ARAI, Tamio. Motion Planning of Multiple Mobile Robots Using Dynamic Groups. En : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1993. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=292119>
- [18] PÉREZ, Miguel A. *et al.* Instrumentación Electrónica. Segunda Edición. Thomson Editores. Madrid, 2005.
- [19] PETRIU, Emil M. Robotic Systems - Vehicles. University of Ottawa. Disponible en: <http://www.site.uottawa.ca/~petriu/CEG4392-IntroRobotics-Vehicles.pdf>
- [20] RUSSELL, Stuart y NORVIG, Peter. Artificial Intelligence; A Modern Approach. Tercera Edición. Pearson Education. EE.UU., 2010.
- [21] SCHREIBER, Guus. Knowledge Engineering and Management: the CommonKADS Methodology. MIT Press. EE.UU., 2000. Disponible en: [http://books.google.com.co/books/about/Knowledge\\_engineering\\_and\\_management.html?id=HIXOW\\_1fsIEC&redir\\_esc=y](http://books.google.com.co/books/about/Knowledge_engineering_and_management.html?id=HIXOW_1fsIEC&redir_esc=y)
- [22] SHOHAM, Yoav. An Overview of Agent-Oriented Programming. En : BRADSHAW, Jeffrey. Software Agents. The MIT Press. EE.UU., 1997. Disponible en: <http://www.infor.uva.es/~cillamas/MAS/AOP-Shoham.pdf>
- [23] SIEGWART, Roland y NOURBAKHS, Illah R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press. EE.UU., 2004.
- [24] SUTANDIYO, Weanna *et al.* Experiences with Software Engineering of Mobile Agent Applications. Proceedings of the 2004 Australian Software Engineering Conference. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1290487>
- [25] ZAMBONELLI, Franco; JENNINGS, Nicholas R. y WOOLDRIDGE, Michael. Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology. En : ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. Vol. 12. No. 3 (Jul. 2003).

# ANEXOS

A continuación se incluyen una serie de desarrollos adicionales que se realizaron durante la consecución del presente trabajo de grado.

## A.1 VALIDACIÓN DEL MODELO MEDIANTE SIMMECHANICS

SimMechanics es una librería de componentes disponible en MATLAB para el modelado, análisis y simulación de sistemas dinámicos. Su combinación con Simulink facilita la aplicación de técnicas y controladores vistos a lo largo del pregrado en Ingeniería en Mecatrónica.

Aunque es posible elaborar la totalidad del modelo al interior de SimMechanics, dicho proceso puede ser extenso y tedioso para sistemas de gran complejidad. Por ende, una alternativa consiste en importar un modelo diseñado en un ambiente CAD tal como SolidWorks, lo cual se puede realizar mediante la herramienta SimMechanics Link, disponible en la página principal de Mathworks<sup>1</sup>.

Al diseñar un modelo complejo tal como el manipulador del Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC) en SolidWorks, es importante tener en cuenta una serie de pautas. En primer lugar, se recomienda realizar subensambles de piezas, cada uno correspondiente a un eslabón (link) o articulación (joint); esto evita que sus piezas constituyentes sean importadas de forma independiente.

---

<sup>1</sup>SimMechanics Link. Product Download. Mathworks. Disponible en: [http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download\\_smlink.html](http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_smlink.html)

Puesto que no es necesario analizar el comportamiento de piezas menores (por ejemplo, tornillos o carcasas), cada subensamble es exportado como un único cuerpo, facilitando el análisis del modelo obtenido y la comparación de los resultados con técnicas convencionales de modelado.

En segundo lugar, se recomienda insertar las propiedades de material adecuadas para todas las piezas en SolidWorks, lo cual permite a SimMechanics Link calcular de forma automática las masas y tensores de inercia para todos los componentes.

En tercer lugar, se recomienda realizar el ensamble principal en concordancia con la orientación deseada, puesto que SimMechanics toma por defecto el sistema de coordenadas por defecto de SolidWorks. En caso de requerir otra asignación, se deben crear sistemas de coordenadas personalizados como indica el tutorial de SimMechanics<sup>2</sup>.

Finalmente, en el caso de un manipulador robótico, el primer subconjunto que conforma el ensamble principal debe ser la base. Esto es debido a que SimMechanics toma dicho elemento como el origen del sistema de coordenadas y como la tierra del sistema. Dicha restricción es una limitante importante de SimMechanics, puesto que se requiere que el sistema tenga como mínimo un punto de tierra constante.

Este factor impide modelar el chasis móvil del Sistema Robótico de Transporte Cooperativo, ya que no existe forma de indicar que el punto de las ruedas omnidireccionales que hace contacto con el suelo está en constante cambio, por lo cual SimMechanics no puede calcular correctamente las fuerzas y torques producidos sobre las ruedas.

Una vez completada la instalación de SimMechanics Link y cumplidos los criterios anteriores, el modelo se puede exportar entrando a Archivo, Guardar Como y seleccionando la extensión SimMechanics Link (\*.xml) antes de guardar. Acto seguido, se usa el comando “mech\_import” en la ventana principal de MATLAB para importar el archivo, con lo cual se obtiene el modelo de la Figura A.1.

---

<sup>2</sup>Configuring SimMechanics Link Settings in SolidWorks. R2012a Documentation - SimMechanics Link. Mathworks. Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/smlink/ref/brnjwi6-1.html>

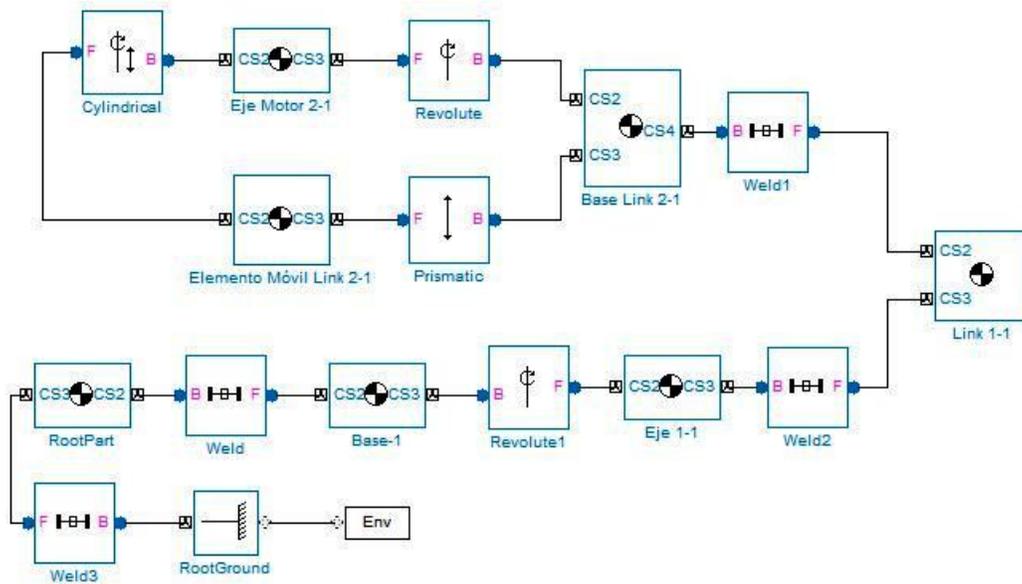


Figura A.1: Modelo Inicial Importado a SimMechanics

Se observa que a fin de distinguir los bloques de los elementos de Simulink, los bloques de SimMechanics se generan en color azul. El modelo inicia con un bloque “Env”, el cual posee las propiedades del ambiente tales como la gravedad, seguido por el bloque de tierra. Los bloques de cada cuerpo del modelo (indicados por un signo de centro de masa) se interconectan con uniones rígidas (Weld) o con articulaciones (Prismatic, Revolute, Cylindrical, etc...).

Las articulaciones se asignan según el total de conexiones que una pieza comparte con piezas colindantes en el ensamble de SolidWorks (por ejemplo, una relación de ejes concéntricos se convierte en una articulación rotacional). En este caso se destaca la articulación de tipo cilíndrico causada por el deslizador: una entrada de rotación (el giro del eje acoplado al motor paso a paso) se convierte en una salida de traslación (el ascenso/descenso del elemento móvil en el deslizador).

Una vez obtenido el modelo, se procede a realizar las conexiones de sensores y actuadores para las articulaciones que son actuadas en el sistema real. Se entra a las propiedades de sus bloques correspondientes vía doble clic y se agregan dos puertos adicionales de conexión, como indica la Figura A.2.

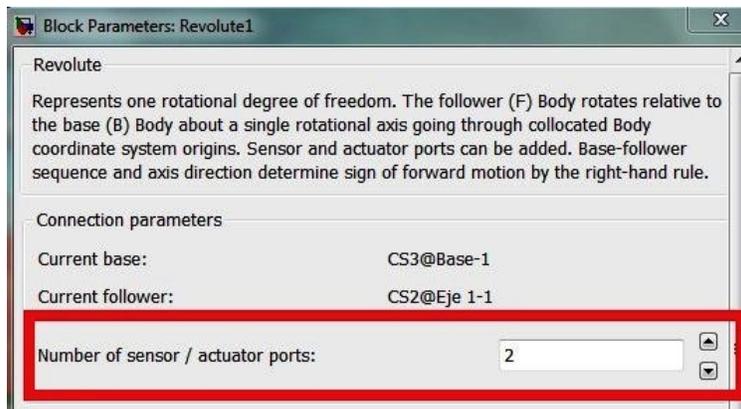


Figura A.2: Añadir Puertos de Sensores-Actuadores

Acto seguido, se escogen los bloques “Joint Sensor” y “Joint Actuator” de la librería de SimMechanics, los cuales se conectan por parejas a los puertos nuevos en las articulaciones modificadas. Para el análisis dinámico del sistema, escogemos actuar con movimiento y medir la fuerza/torque calculado, como se indica en las Figuras A.3 y A.4 respectivamente.

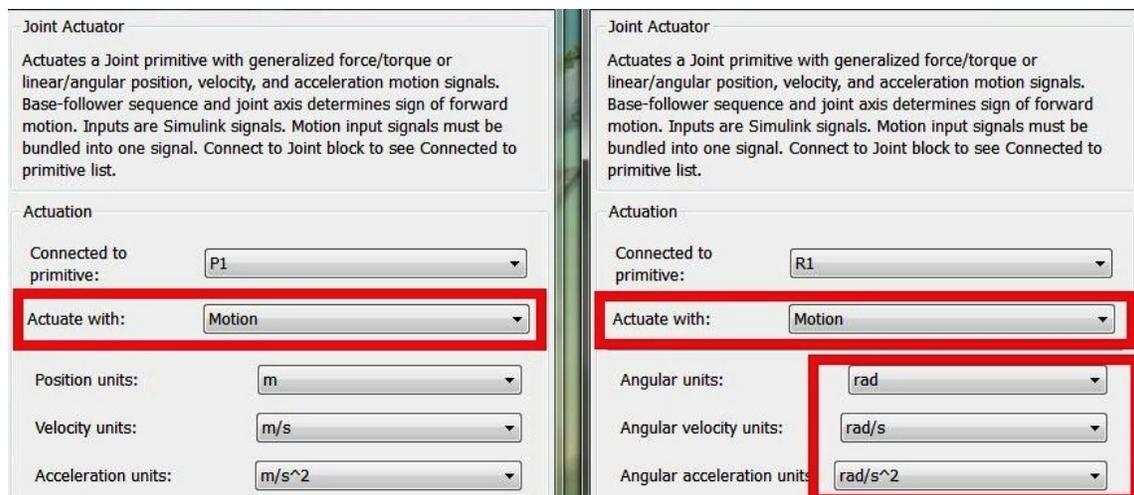


Figura A.3: Configuración de Bloques Tipo Actuador

Es importante notar que se modifican las entradas rotacionales para manejar ángulos en radianes a fin de comparar los resultados de SimMechanics con los del modelado por energías.

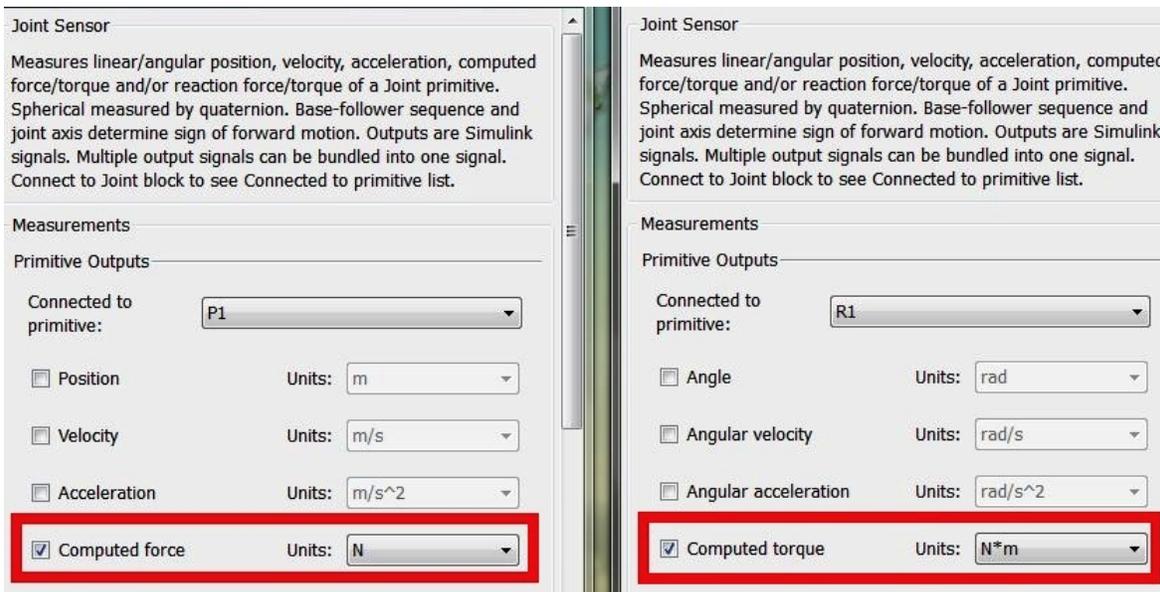


Figura A.4: Configuración de Bloques Tipo Sensor

Las elecciones del tipo de actuación y medición se toman para facilitar la comparación con la formulación de Lagrange, la cual toma como entradas coordenadas generalizadas (posiciones/orientaciones) y entrega fuerzas generalizadas (fuerzas/torques) como salida.

Se puede visualizar la salida de los sensores mediante bloques “Scope”. En el caso de los actuadores, la información de sus bloques indica que al actuar con movimiento se deben ingresar tres entradas simultáneas (correspondientes a posición, velocidad y aceleración). El tutorial de SimMechanics indica que un método sencillo de realizar esto es creando una señal de aceleración e integrar dos veces para obtener la velocidad y posición respectivamente<sup>3</sup>, como se muestra en la Figura A.5.

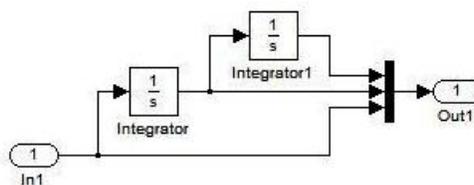


Figura A.5: Doble Integrador para los Actuadores

<sup>3</sup>Actuating a Joint. Applying Motions and Forces. R2012a Documentation - SimMechanics. Mathworks. Disponible en: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/mech/gs/br6twog.html>

La Figura A.6 indica las conexiones completas realizadas sobre las articulaciones, para las cuales las aceleraciones se definieron mediante señales tipo escalón. Una vez configurados los valores de dichas señales, así como el tiempo de simulación, se ejecuta el modelo y se observa el movimiento del sistema tal como se indica en la Figura A.7.

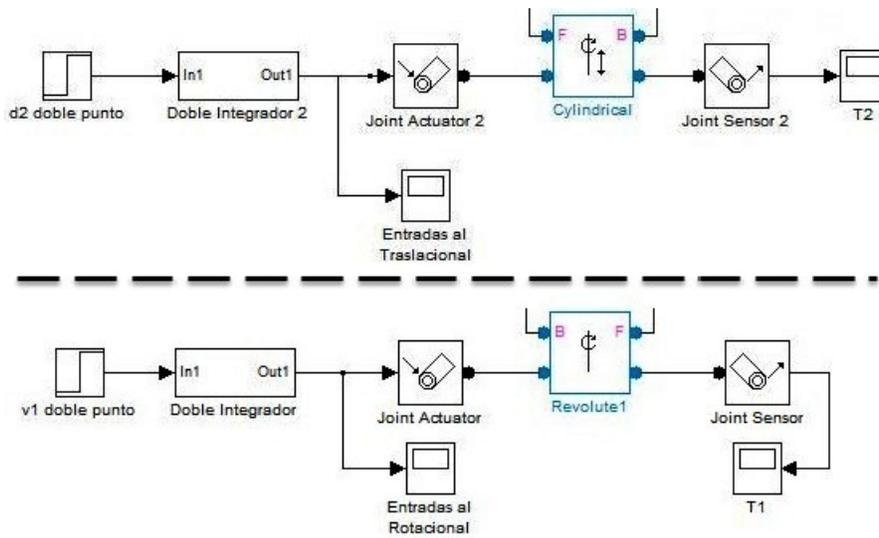


Figura A.6: Conexión Completa a las Articulaciones

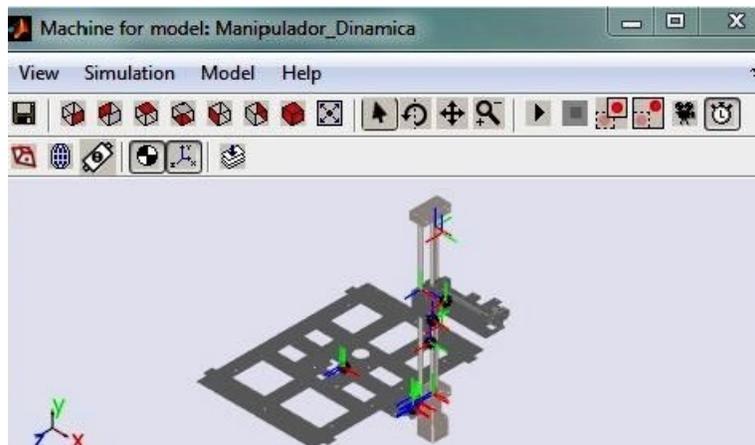


Figura A.7: Visualización del Movimiento del Sistema en 3D

Finalizada la simulación, se analizan los datos entregados por los bloques “Scope” de los sensores. Dichos datos se contrastan con los resultados de la formulación de Lagrange, la cual toma como entradas los mismos valores aplicados en las señales tipo escalón.

## A.2 CIRCUITOS Y PCB

Los siguientes circuitos corresponden a los diferentes diseños que se realizaron para los subsistemas del tercer capítulo. En primer lugar, las Figuras A.8 y A.9 presentan los circuitos de acople para los sensores inductivo e infrarrojo.

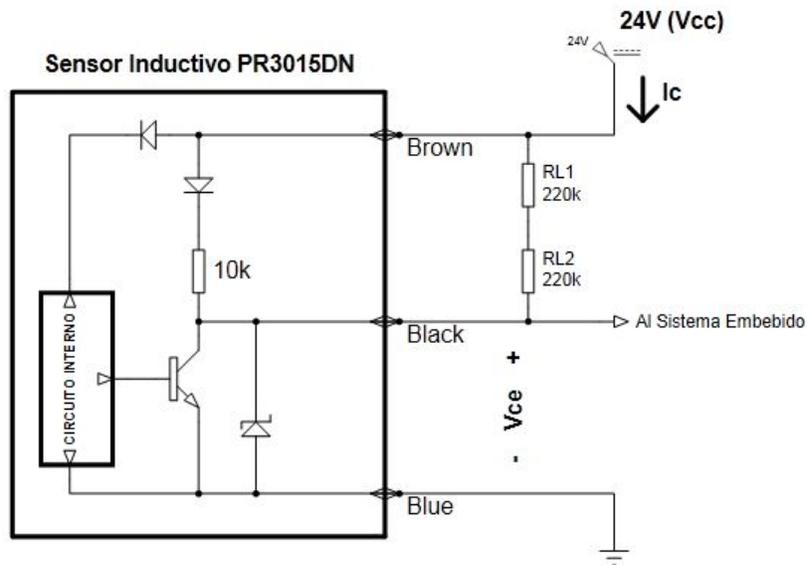


Figura A.8: Circuito de Acople para Sensor Inductivo

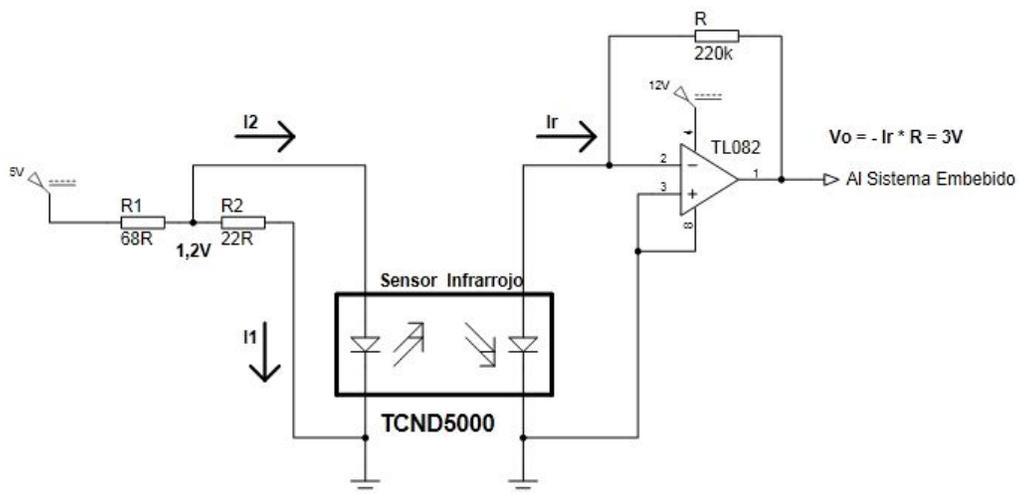


Figura A.9: Circuito de Acople para Sensor Infrarrojo

Las Figuras A.10 y A.11 muestran los circuitos de potencia para el motor paso a paso y los motorreductores Faulhaber. Adicionalmente, la Figura A.12 muestra el circuito de acople para los encoders.

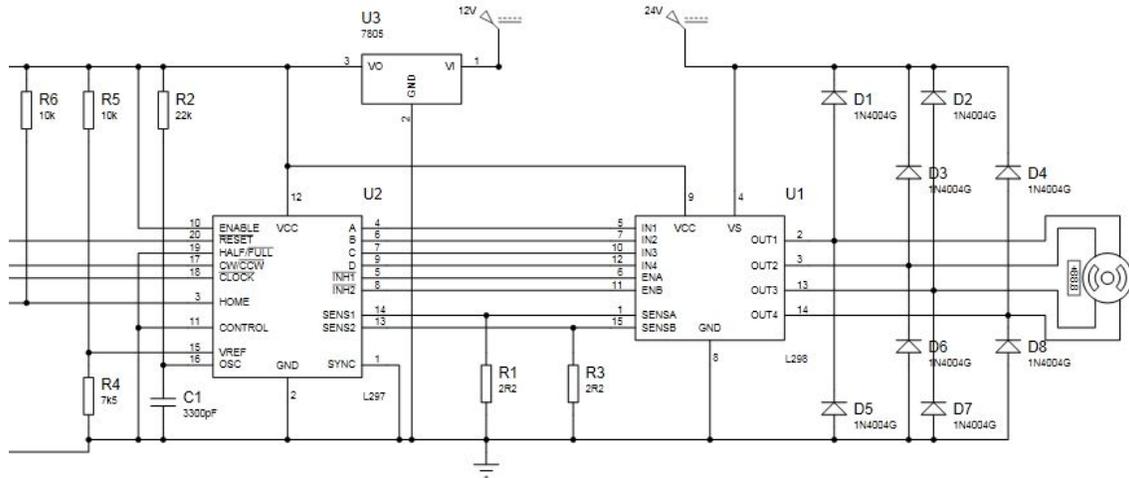


Figura A.10: Circuito de Potencia para el Motor Paso a Paso

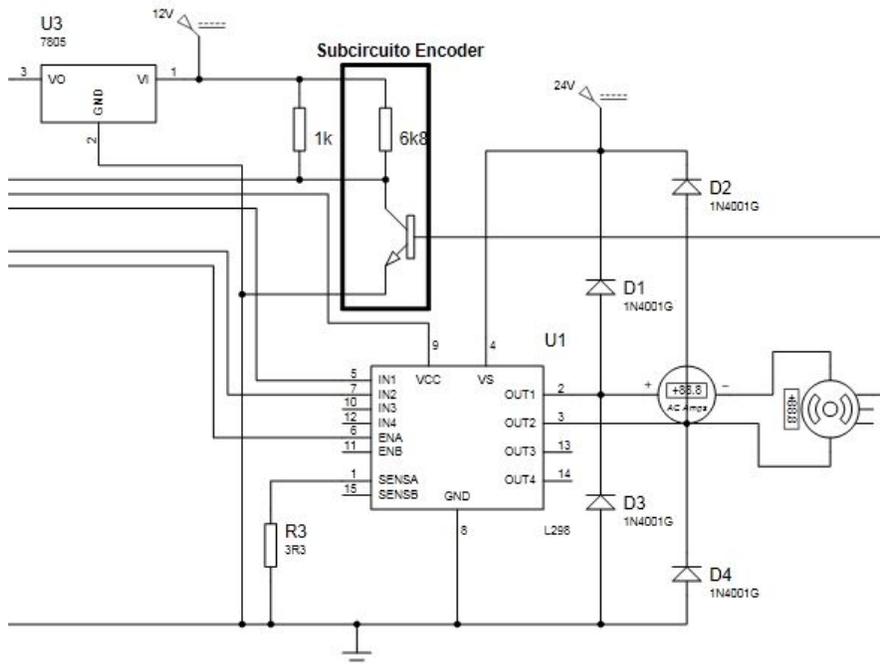


Figura A.11: Circuito de Potencia para los Motorreductores Faulhaber

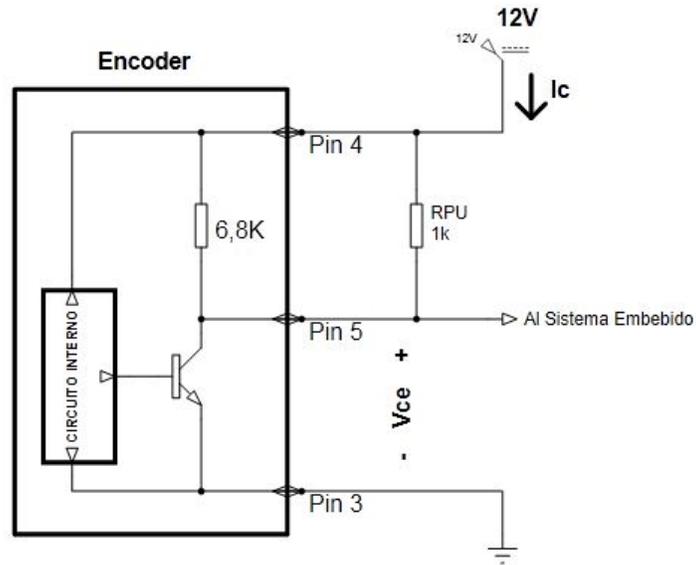


Figura A.12: Circuito de Acople para los Encoders

La Figura A.13 indica el esquema de conexión de las baterías al interior de los robots, ideado a fin de facilitar el intercambio entre modo de recarga y modo de operación.

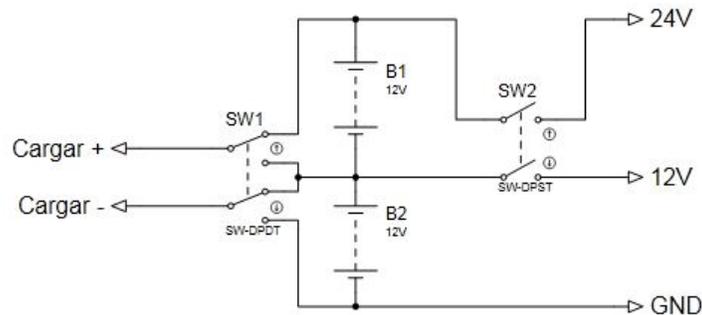


Figura A.13: Esquema de Conexión de las Baterías

Los circuitos finales de las Figuras A.14 a A.16 interconectan los diseños anteriores con base en las fuentes de alimentación y las cantidades necesarias para los elementos repetidos.

Están acompañados por sus correspondientes circuitos impresos (PCB) así como la baqueta requerida para el sensor infrarrojo, presentados en las Figuras A.17 a A.20. Estos PCB se realizaron para dimensionar adecuadamente los robots según todos sus componentes internos.



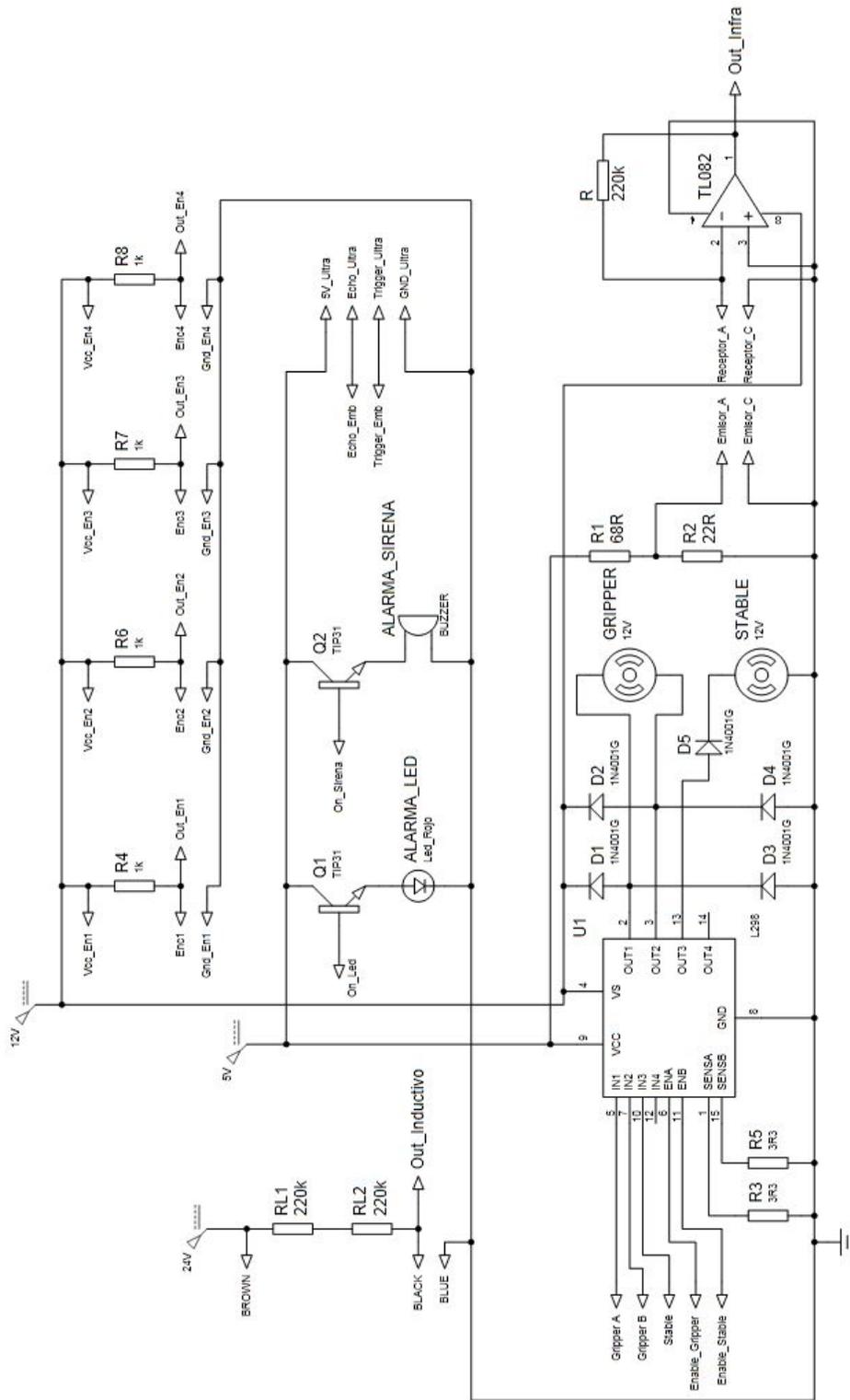


Figura A.15: Circuito A

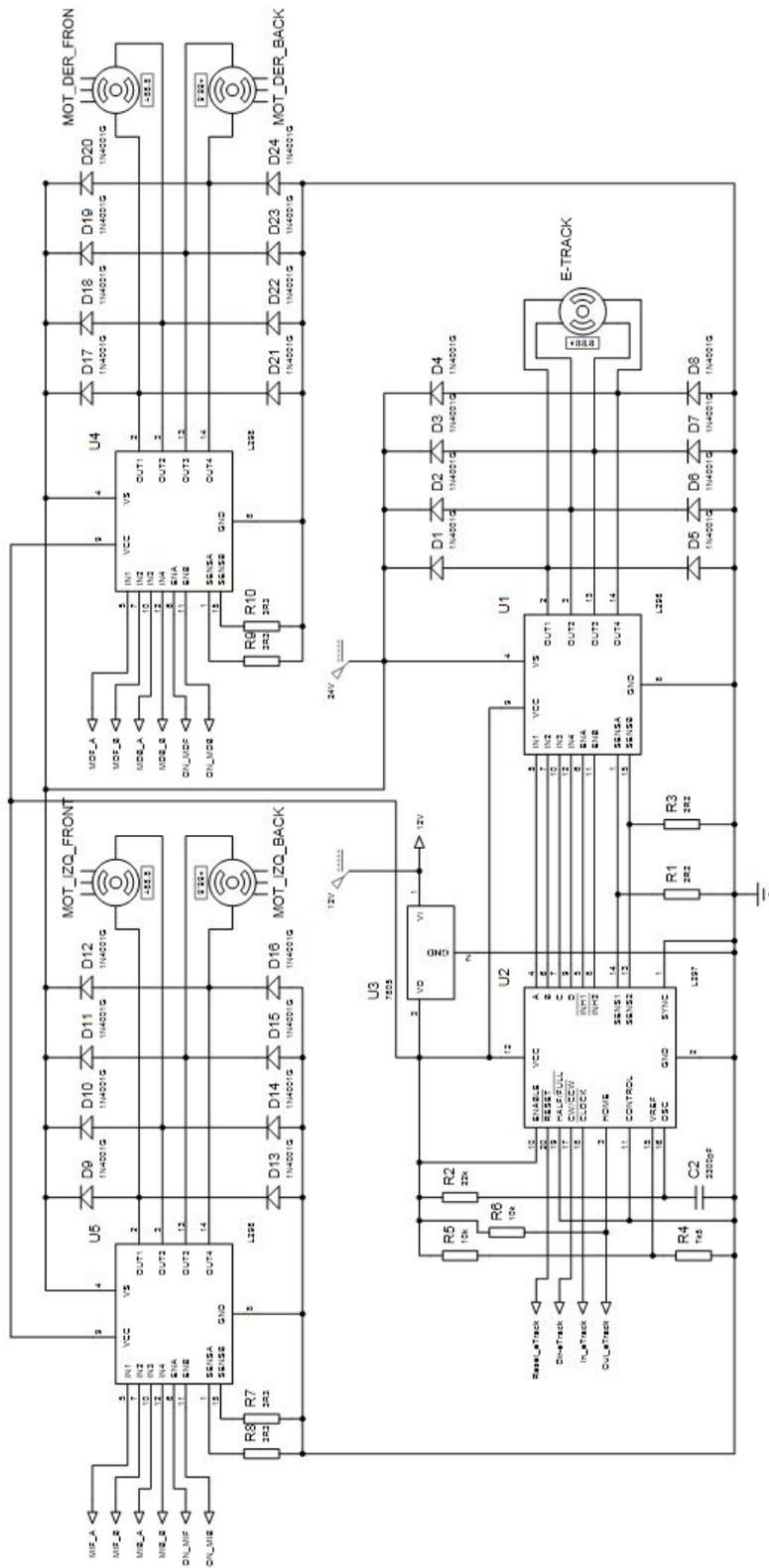


Figura A.16: Circuito B

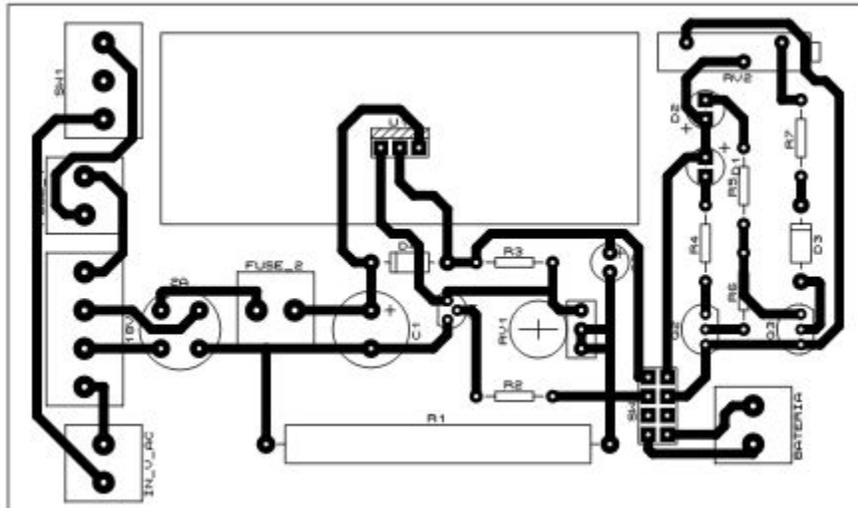


Figura A.17: Baquela para Circuito de Carga y Testeo

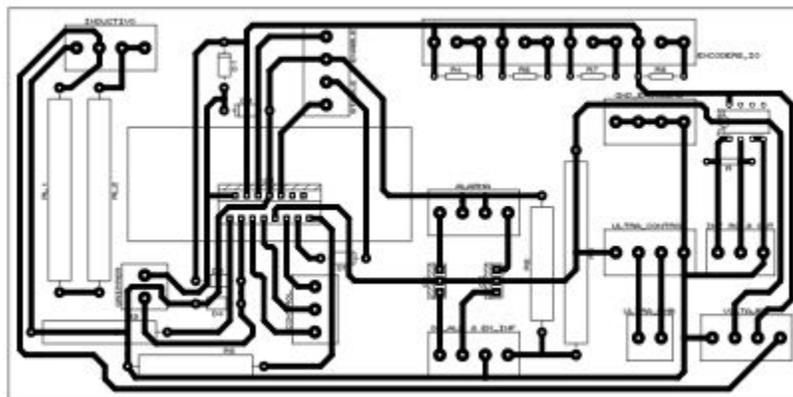


Figura A.18: Baquela para Circuito A

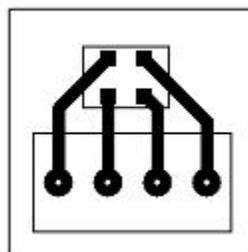


Figura A.19: Baquela para Sensor Infrarrojo

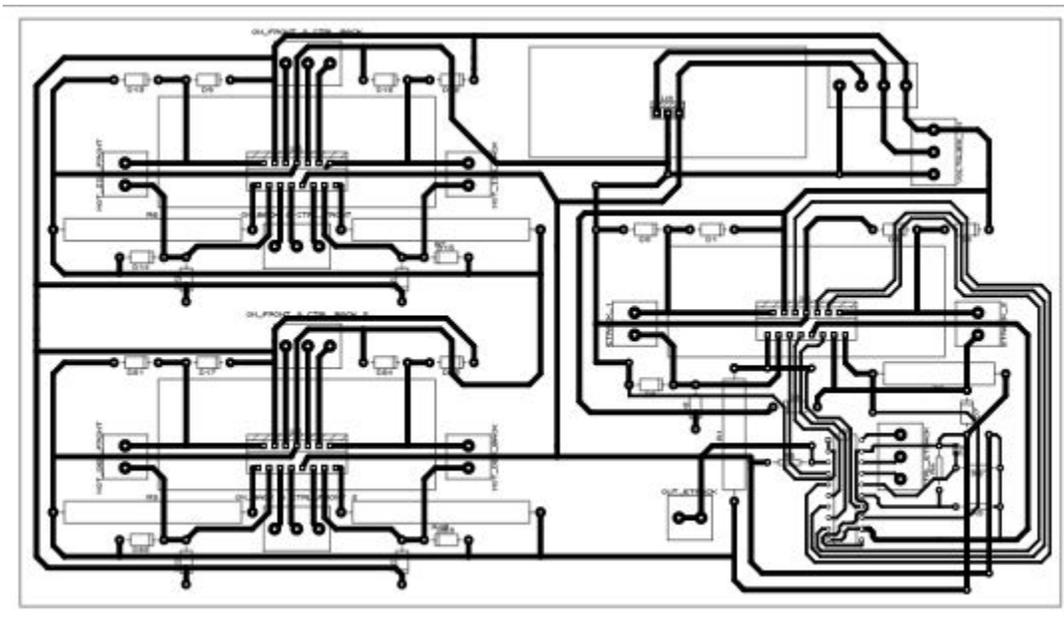


Figura A.20: Baquela para Circuito B

### A.3 DIAGRAMAS DEL ALGORITMO COOPERATIVO

Este año presenta la totalidad de diagramas de flujo correspondientes al algoritmo cooperativo que se obtuvo mediante la metodología mGaia en el cuarto capítulo.

En primer lugar, las Figuras A.21 a A.26 presentan los diagramas para servicios del Sistema Multi-Agente. Se destaca que algunos de estos servicios se encuentran al interior de otros más complejos o al interior de las acciones cooperativas. Adicionalmente, se recuerda que los últimos 3 servicios corresponden a eventos internos del sistema.

- S1.** Negociar la realización de un ciclo completo de transporte y retorno según el nivel de batería restante
- S2.** Reconocer la etapa de interacción en la cual se encuentran los agentes con base en el conteo de marcadores
- S3.** Generar una alerta si se detecta un obstáculo y detener el movimiento del convoy hasta que sea removido

- S4.** Cambiar la dirección de movimiento predeterminada si se pierde la línea guía (dicho cambio depende de la subsección de trayectoria)
- S5.** Detener el movimiento y reiniciar el módulo Wi-Fi si se cae la comunicación, continuar el movimiento una vez se restablezca
- S6.** Solicitar permiso al coordinador para retornar al movimiento natural del agente
- S7.** Detener el movimiento si llega un mensaje entrante de “detener”, luego recurrir a **S6** para continuar el movimiento
- S8.** Cambiar velocidad y orientación de movimiento con **H1** si llega un mensaje entrante de “cambiar”, luego recurrir a **S6** para retomar el movimiento original

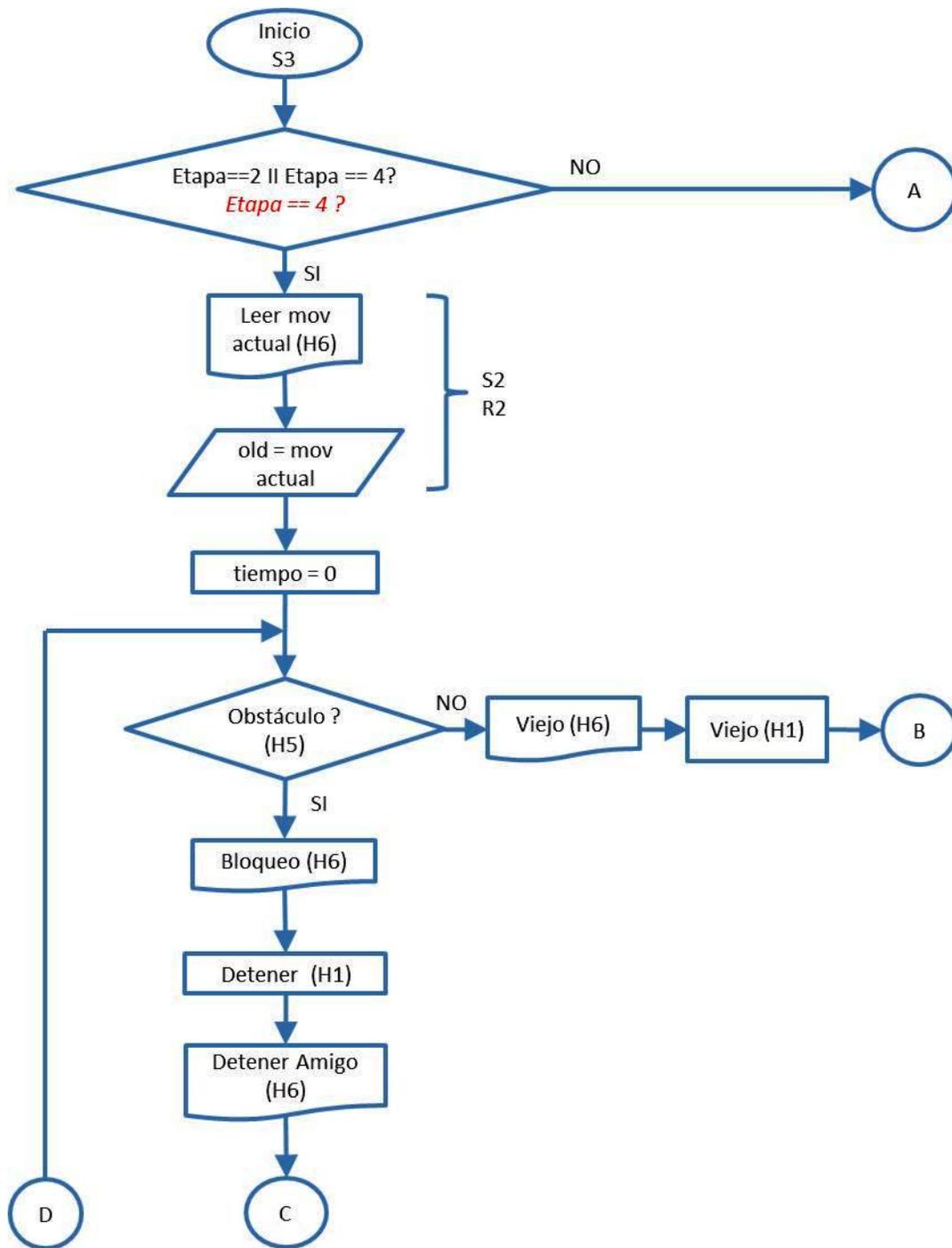


Figura A.21: Servicio **S3** (Detección de Obstáculo) - Primera Parte

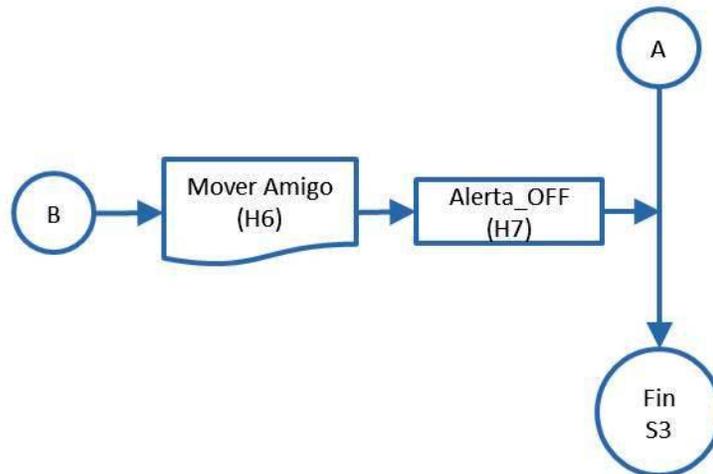
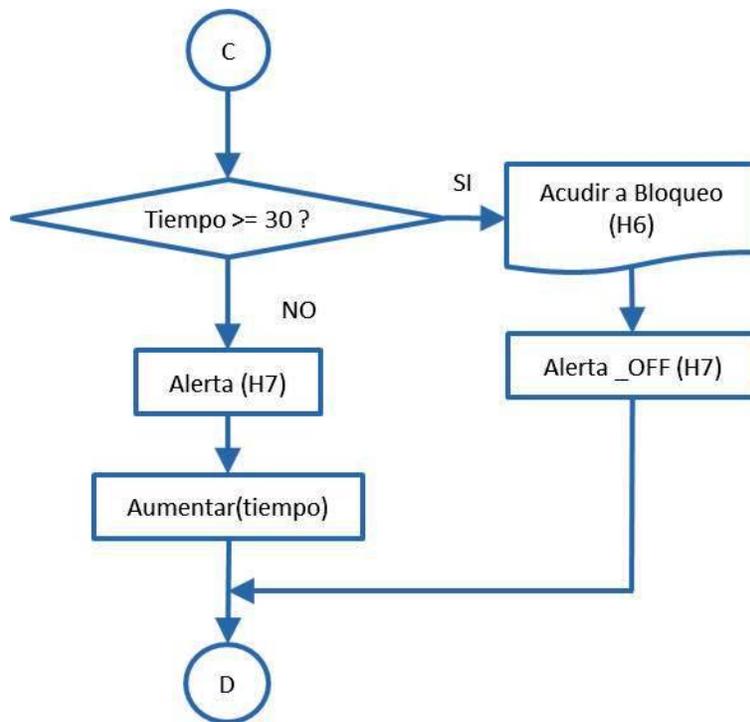


Figura A.22: Servicio **S3** (Detección de Obstáculo) - Segunda Parte

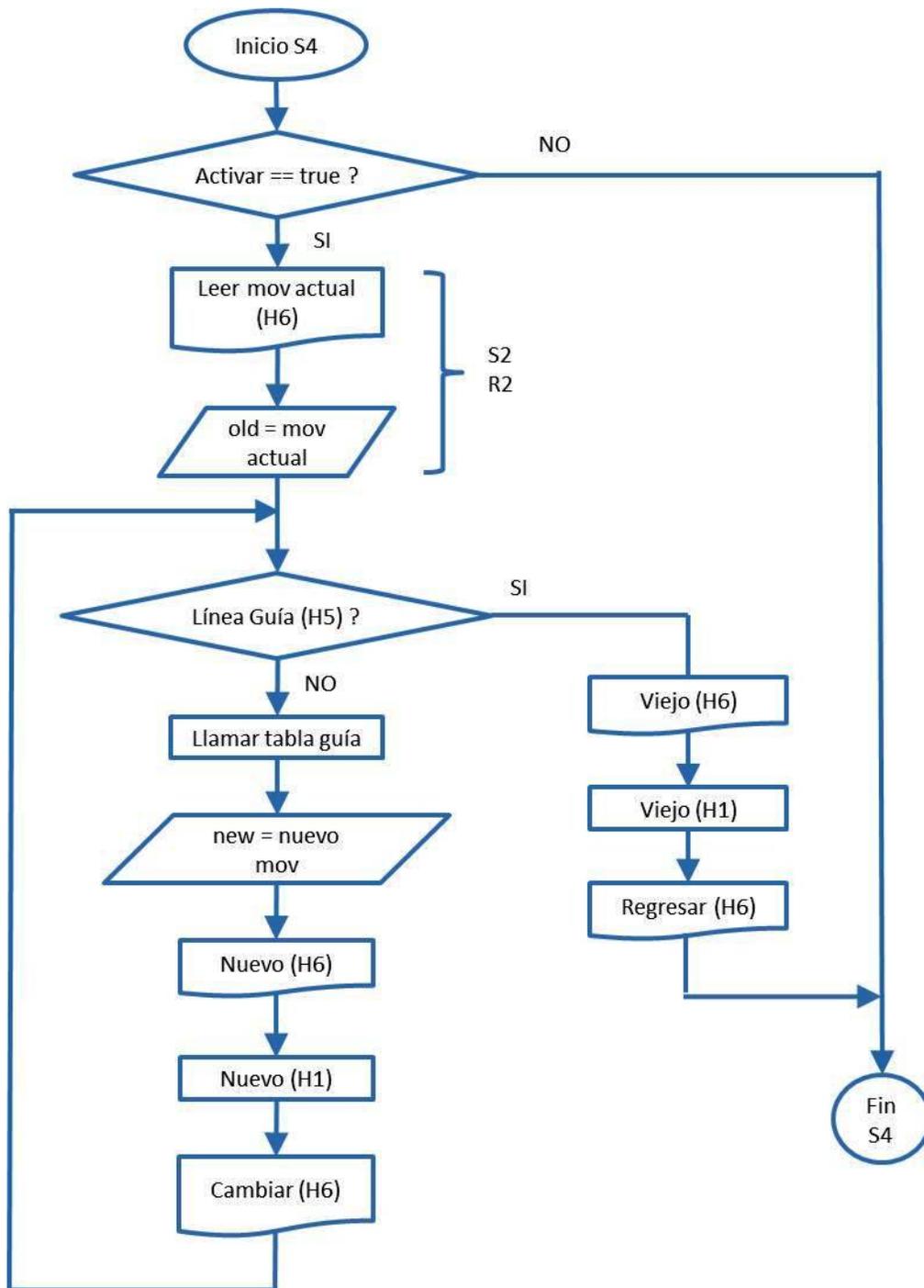


Figura A.23: Servicio **S4** (Cambiar Movimiento)

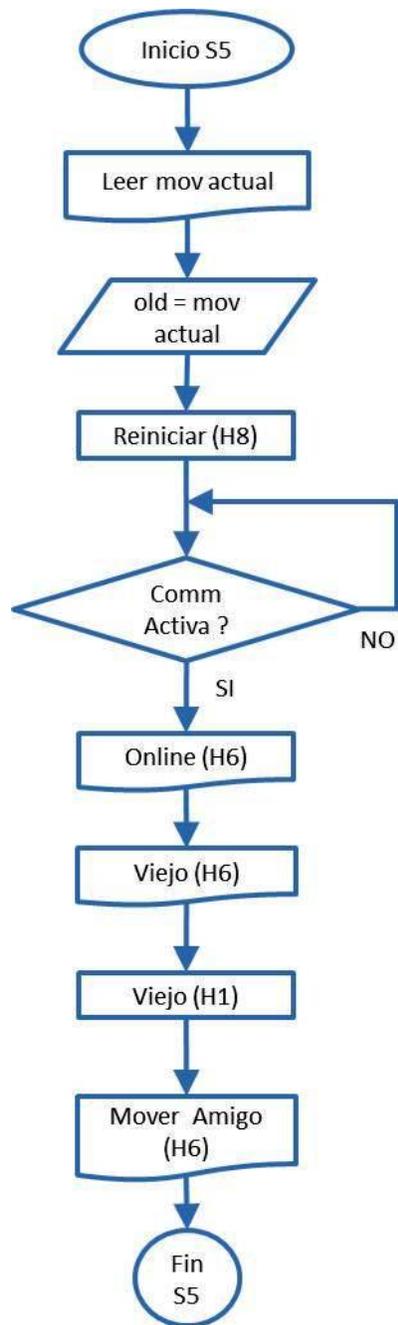


Figura A.24: Servicio **S5** (Comunicación Caída)

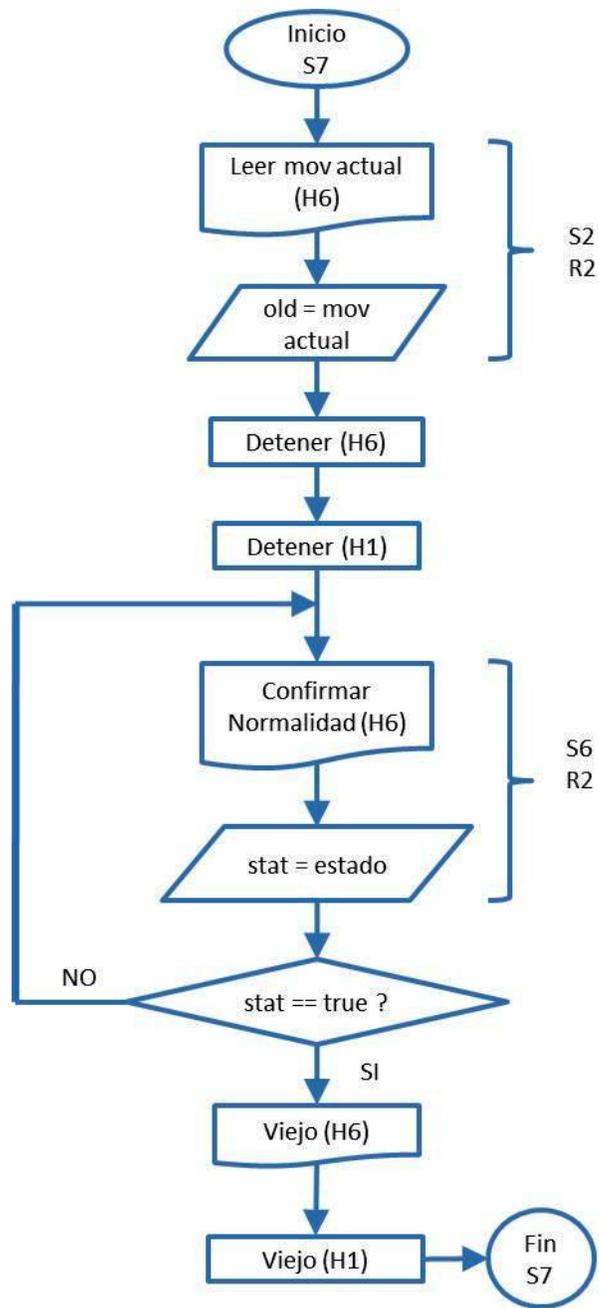


Figura A.25: Servicio **S7** (Mensaje “Detener” Entrante)

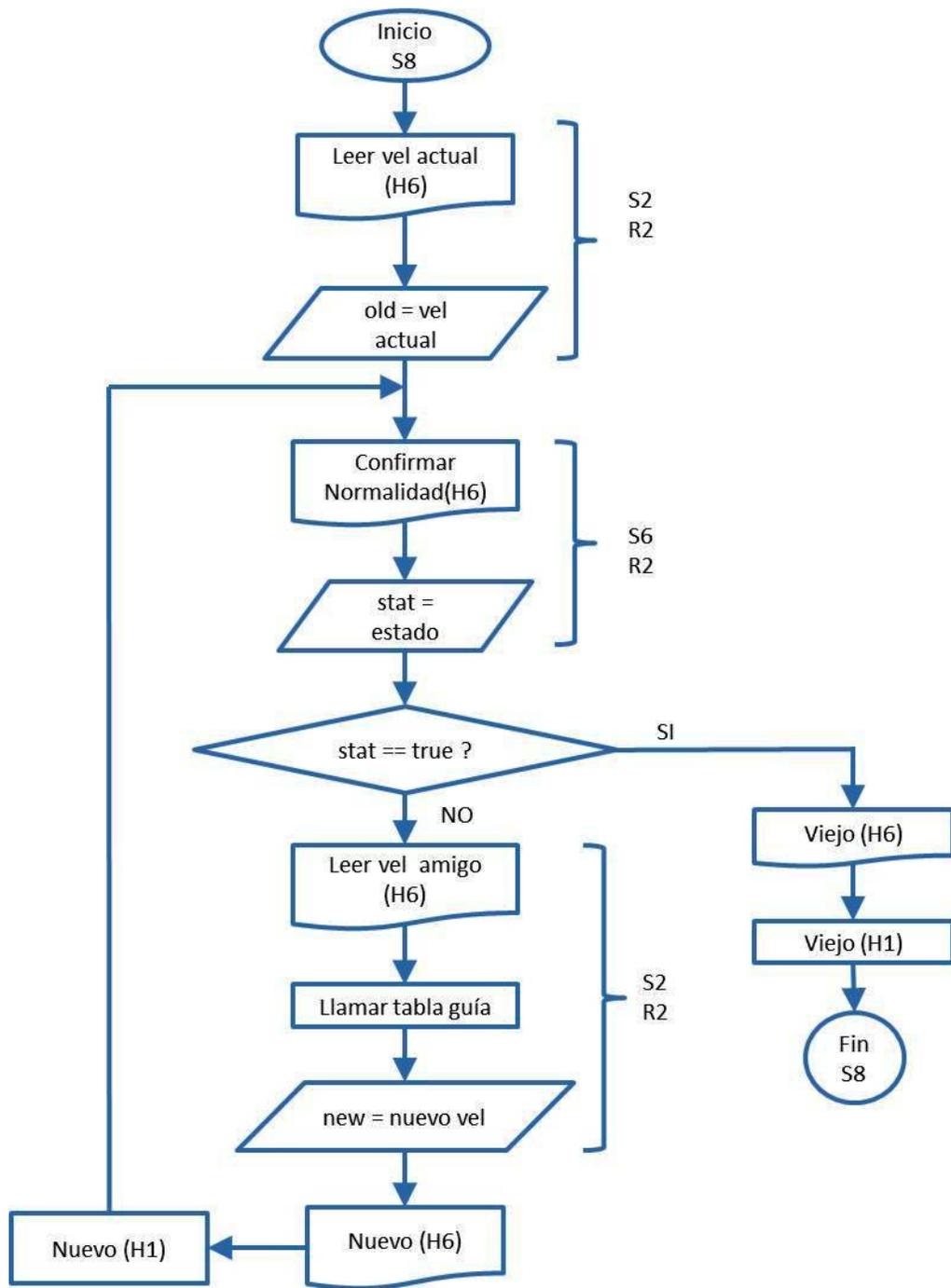


Figura A.26: Servicio **S8** (Mensaje “Cambiar” Entrante)

Acto seguido, las Figuras A.27 a A.29 presentan los diagramas del programa secuencial del agente coordinador y la Figura A.30 muestra el manejo de la única interrupción posible en el agente coordinador (caída de comunicación).

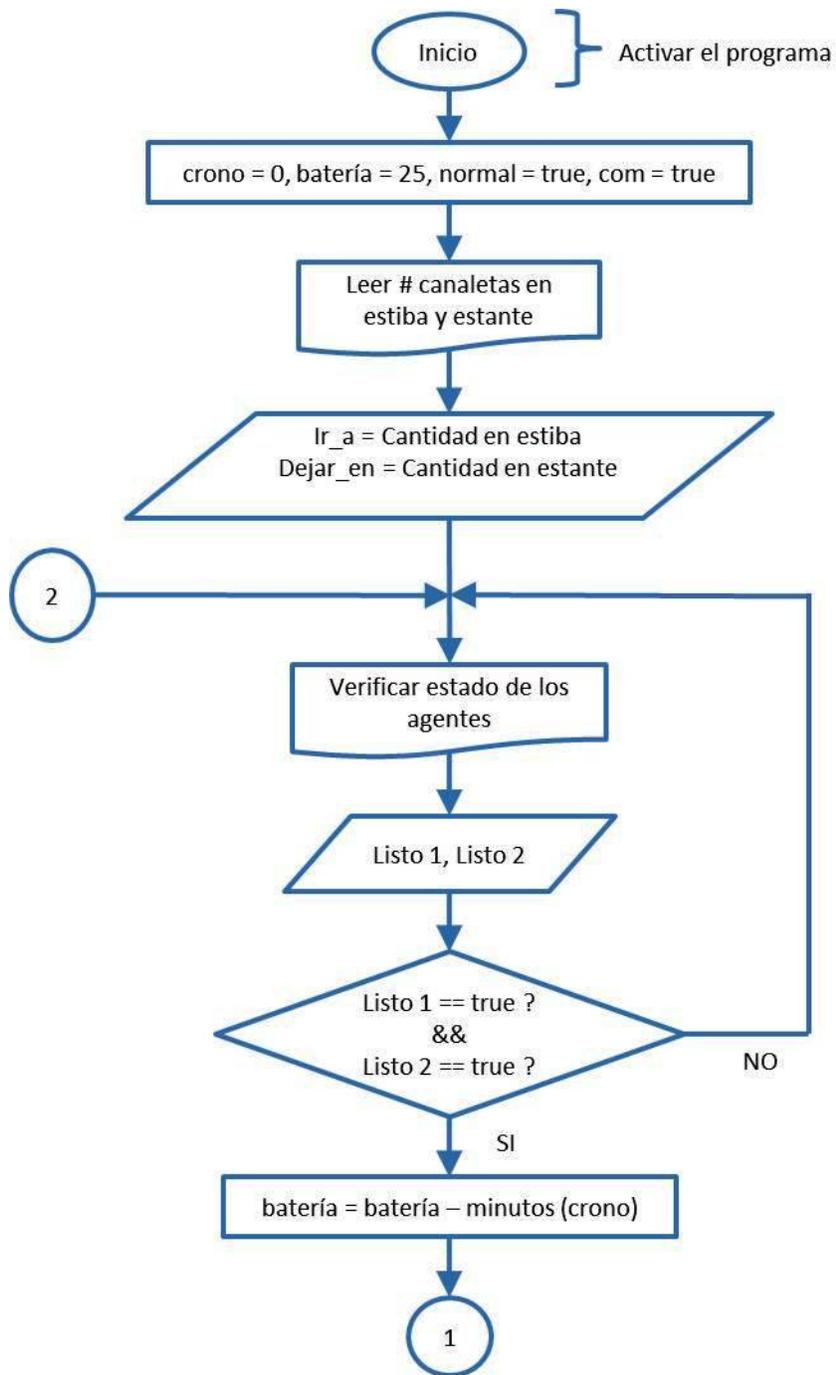


Figura A.27: Programa Secuencial del Coordinador - Primera Parte

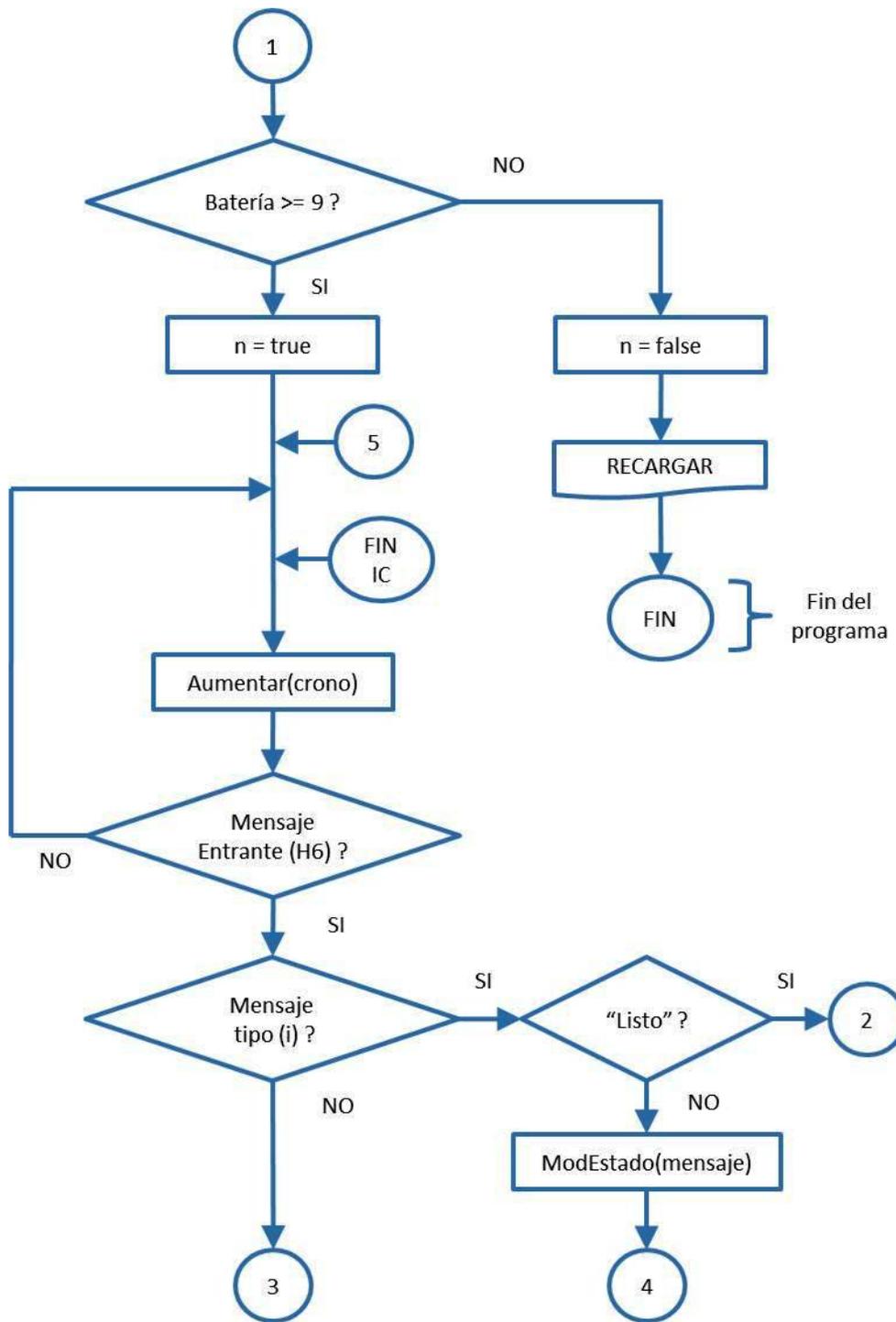


Figura A.28: Programa Secuencial del Coordinador - Segunda Parte

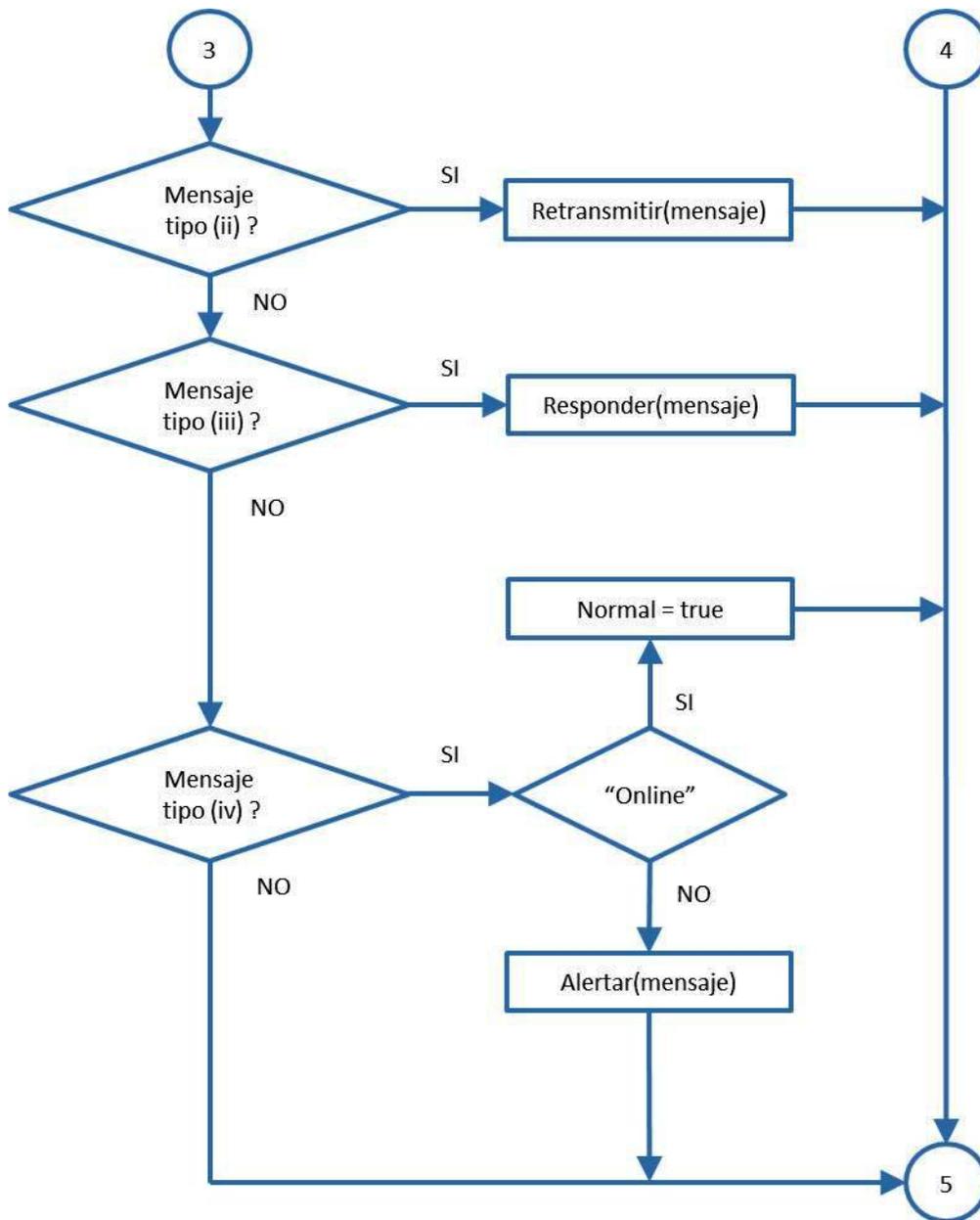


Figura A.29: Programa Secuencial del Coordinador - Tercera Parte

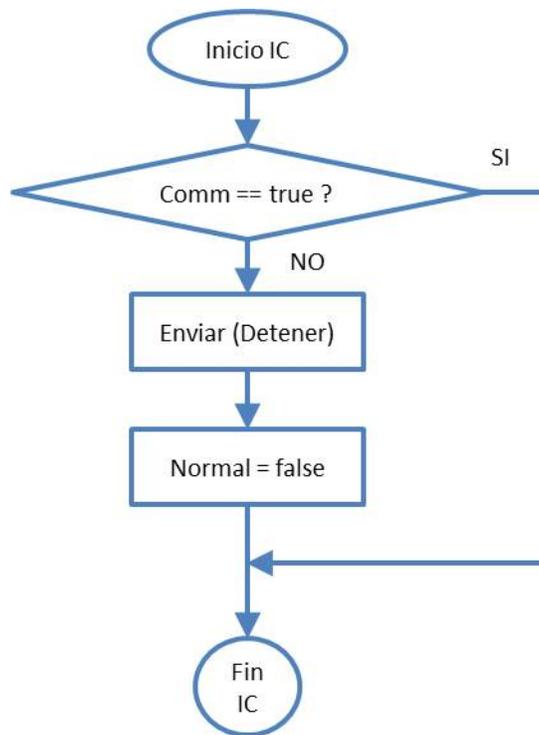


Figura A.30: Interrupción **IC** del Coordinador (Caída de Comunicación)

Las Figuras A.31 a A.34 presentan la secuencia para la acción cooperativa **I1** (Recolectar una canaleta en el punto inicial).

La acción cooperativa **I2** (Transportar una canaleta del punto inicial al punto final) es diferente para ambos agentes; las Figuras A.42 a A.41 presentan la secuencia del Robot Líder y las Figuras A.42 a A.48 presentan la secuencia del Robot Seguidor.

Las Figuras A.49 a A.54 presentan la secuencia para la acción cooperativa **I3** (Descargar una canaleta en el punto final).

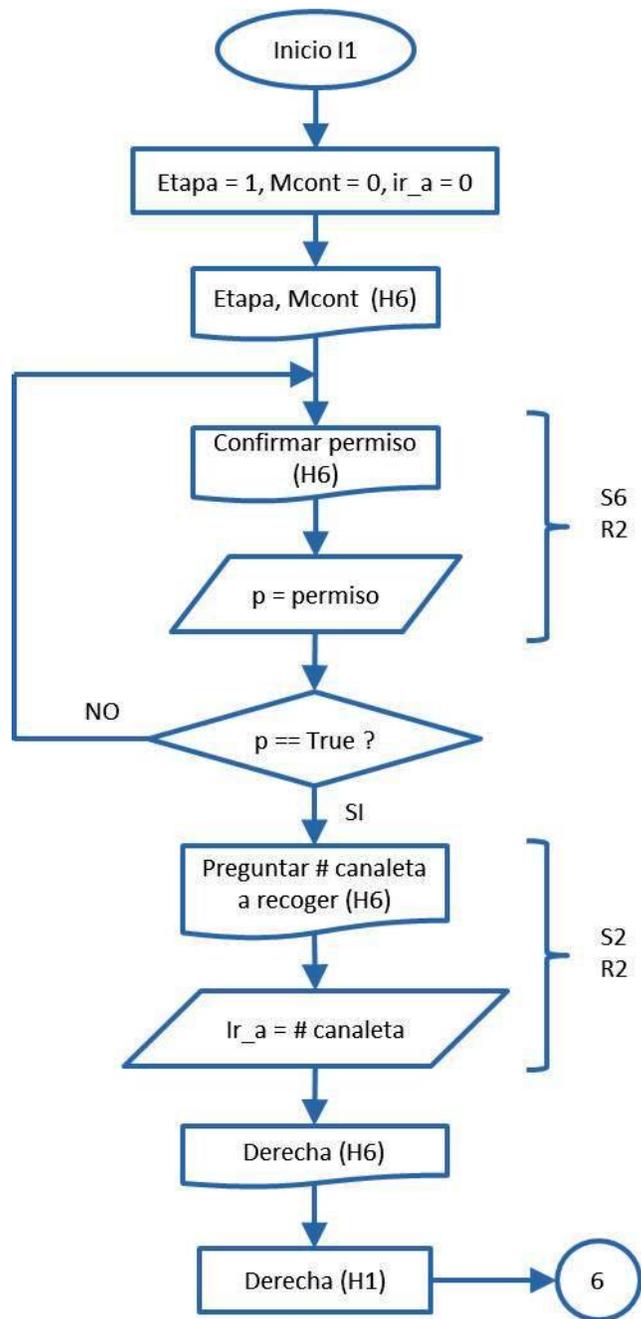


Figura A.31: Acción Cooperativa I1 - Primera Parte

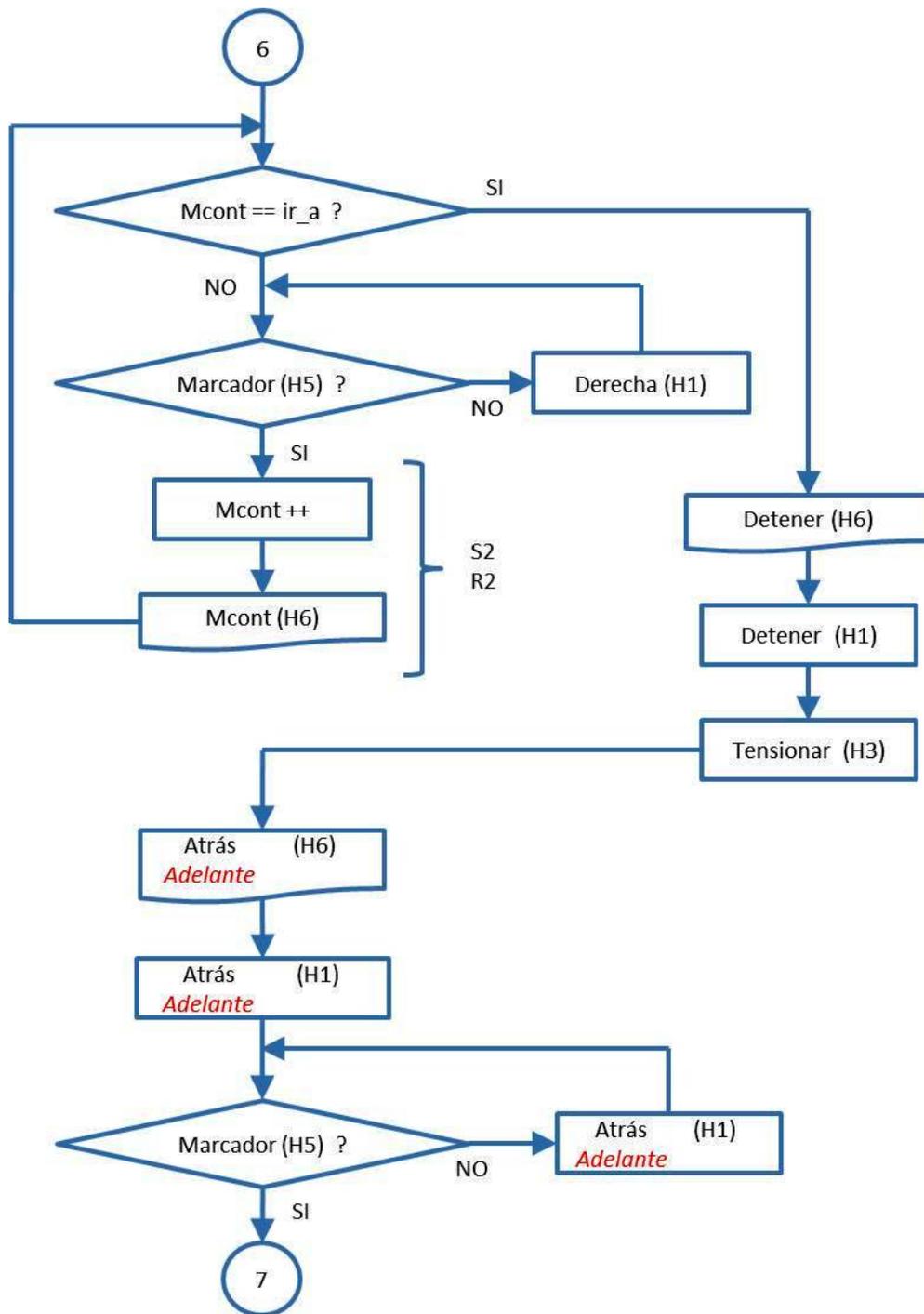


Figura A.32: Acción Cooperativa I1 - Segunda Parte

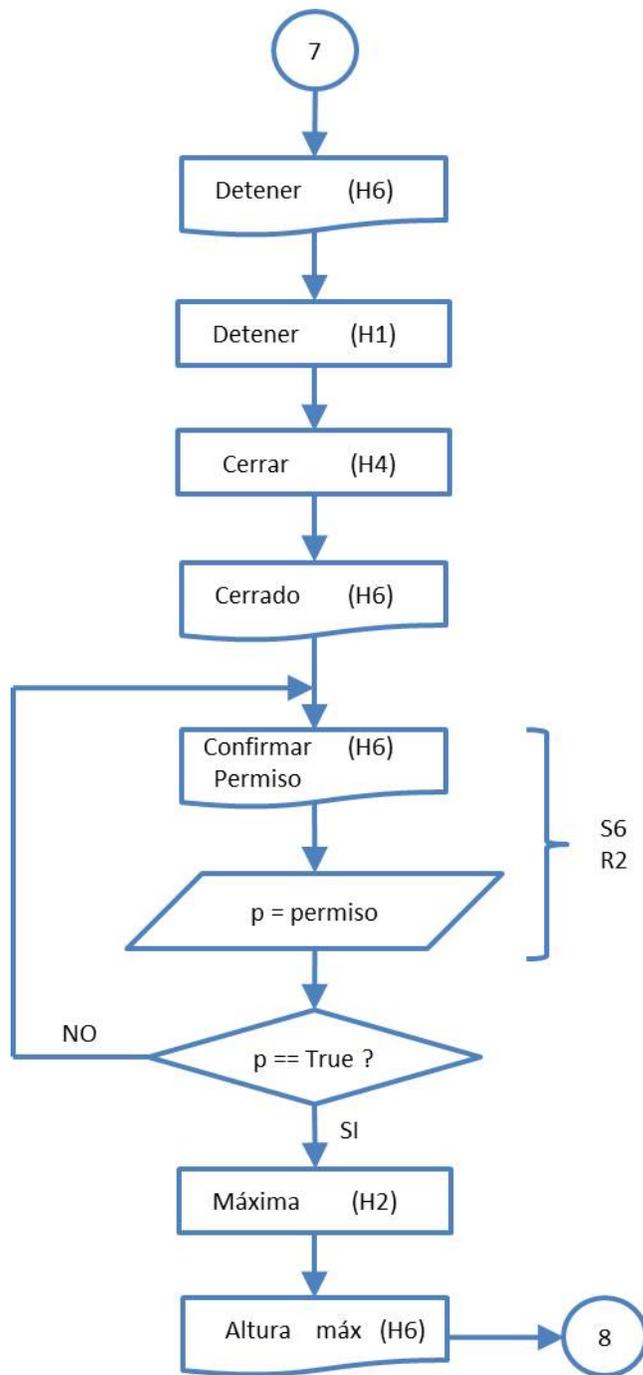


Figura A.33: Acción Cooperativa I1 - Tercera Parte

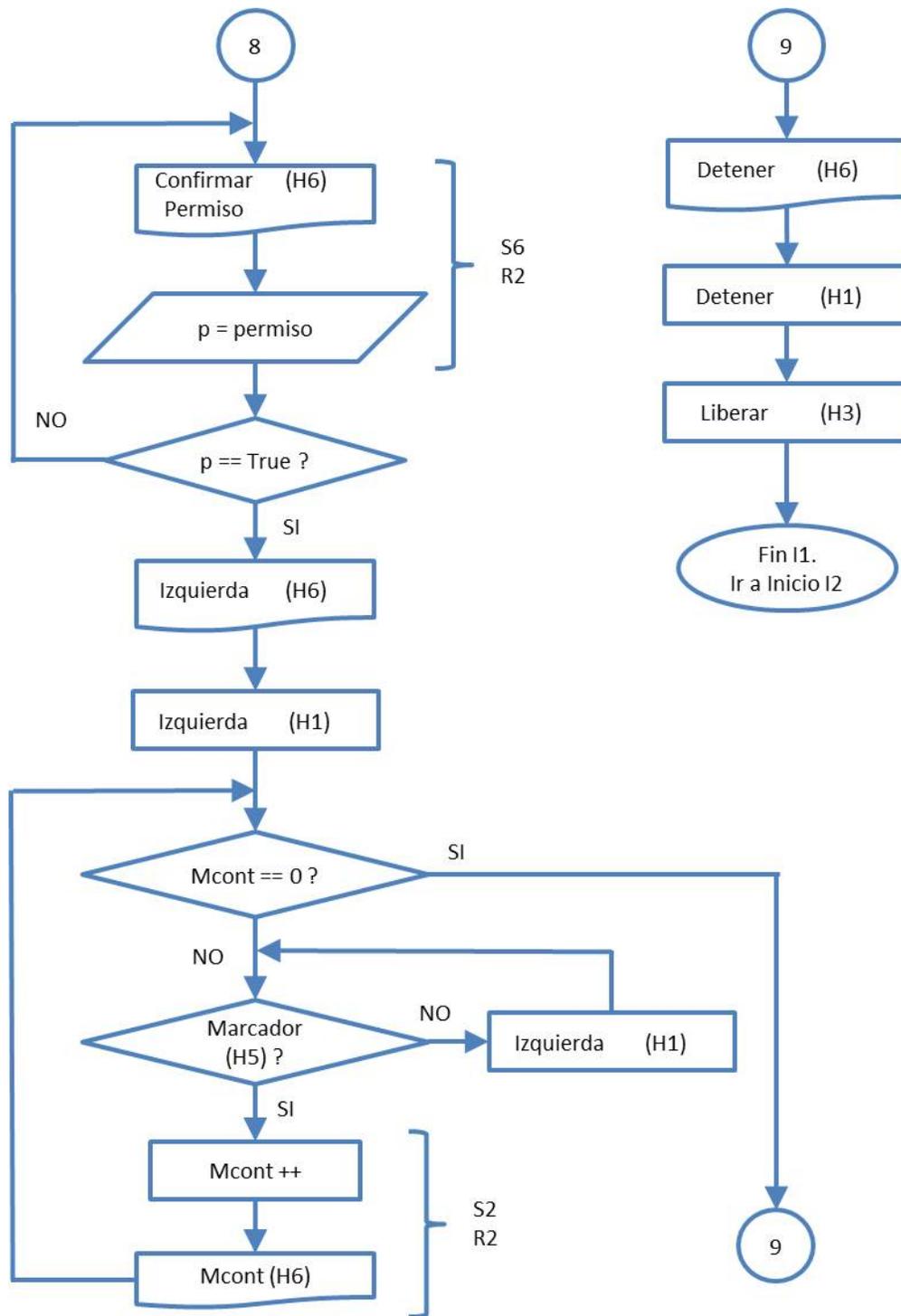


Figura A.34: Acción Cooperativa I1 - Cuarta Parte

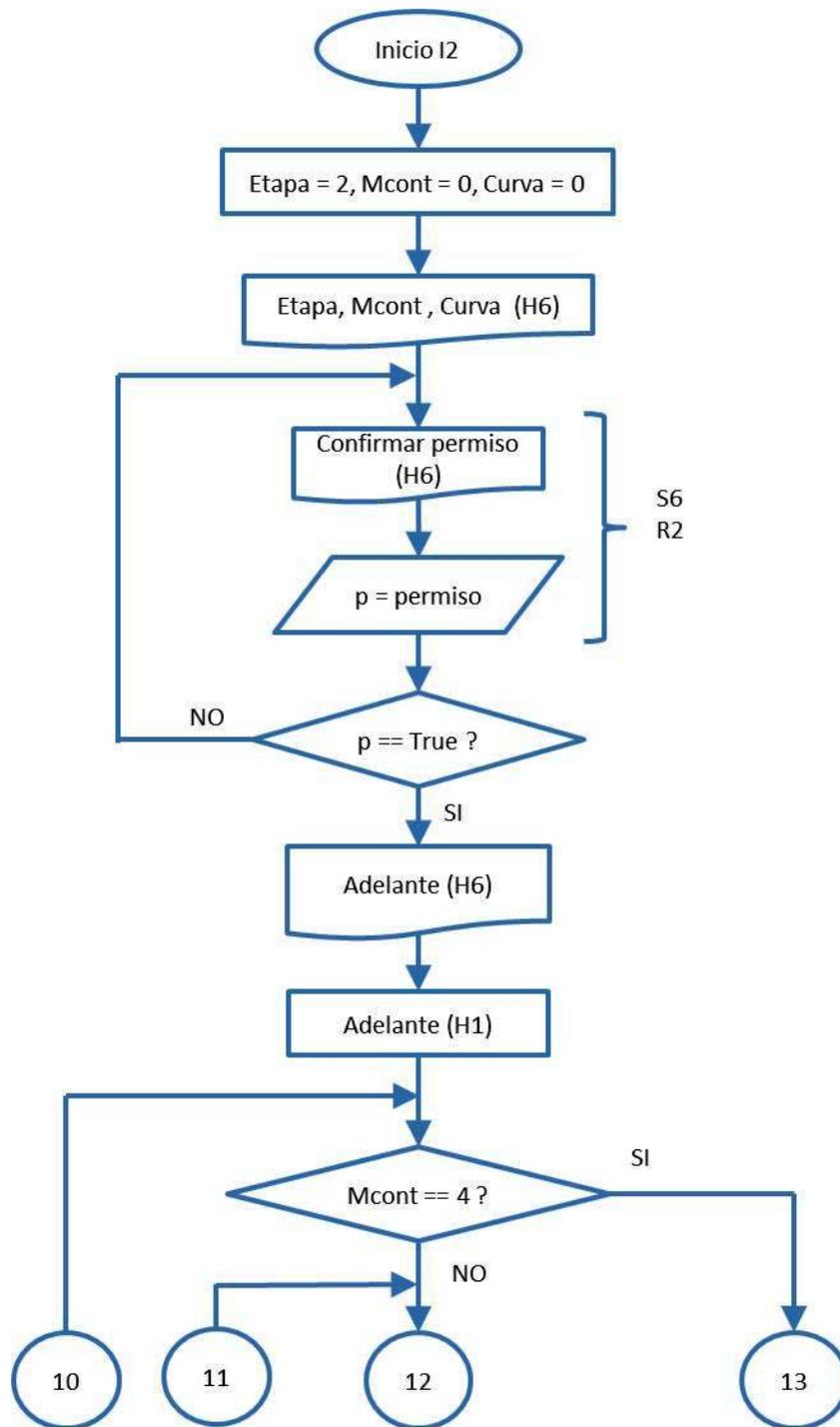


Figura A.35: Acción Cooperativa **I2** para Robot Líder - Primera Parte

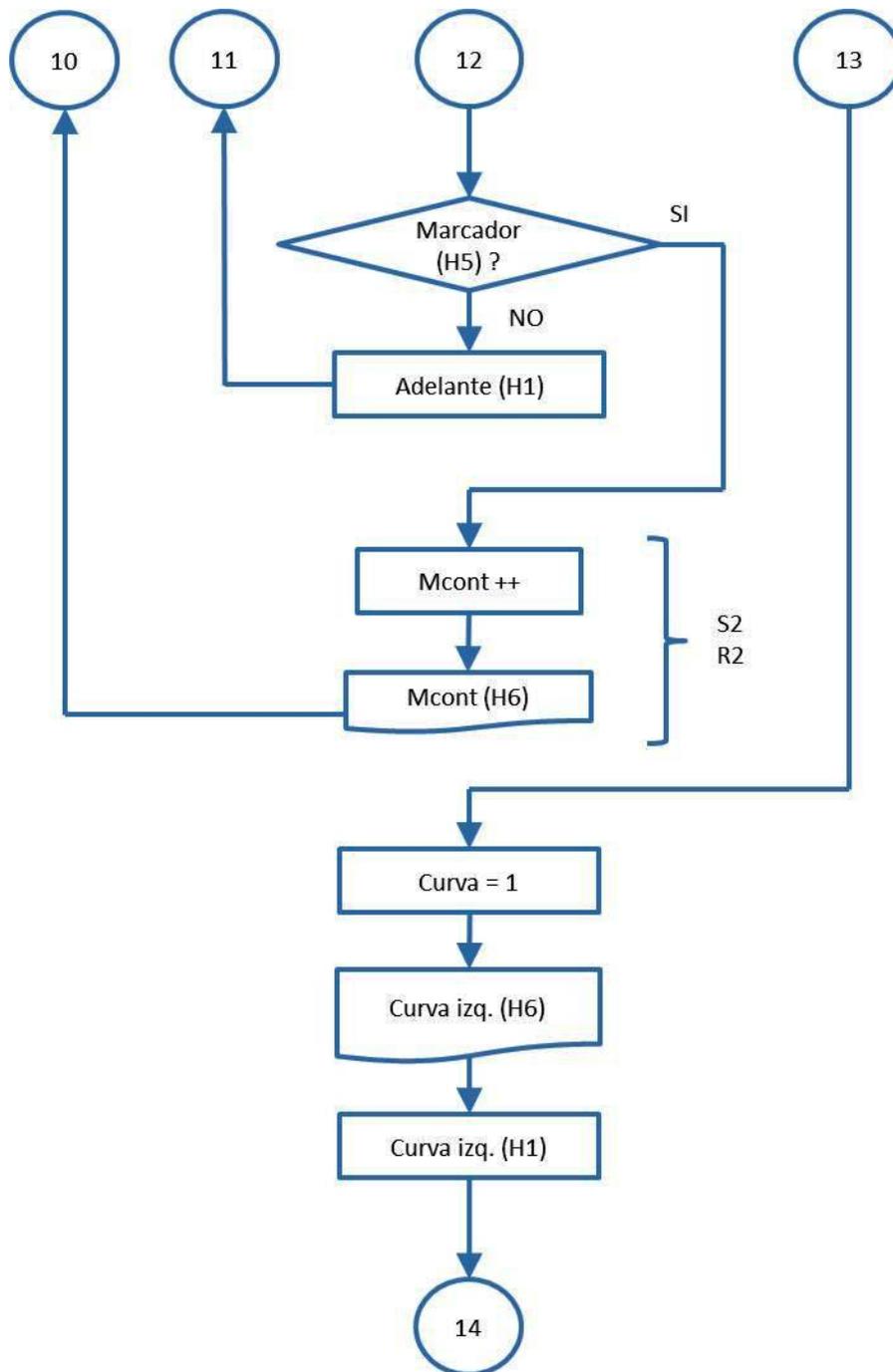


Figura A.36: Acción Cooperativa I2 para Robot Líder - Segunda Parte

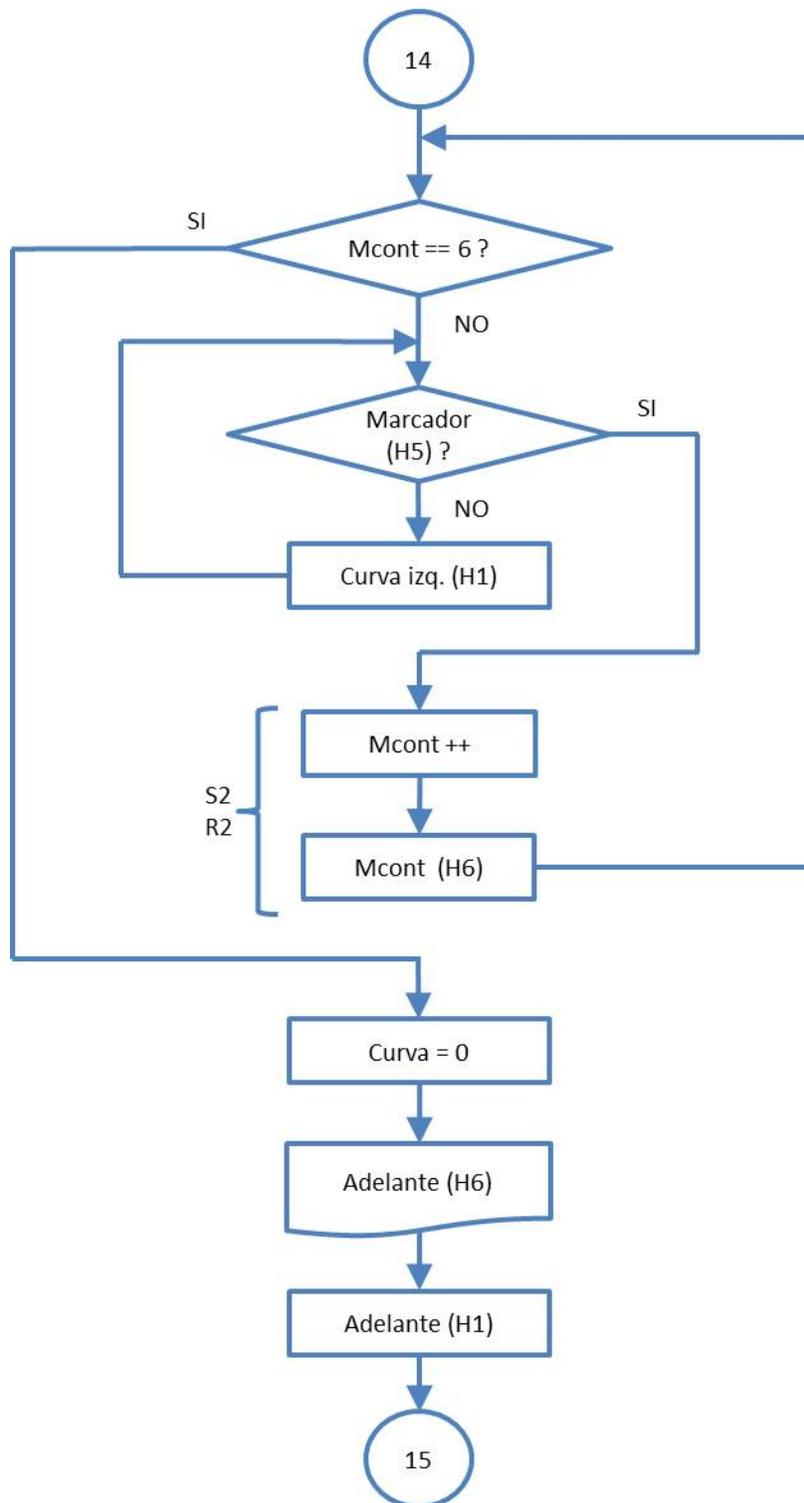


Figura A.37: Acción Cooperativa **I2** para Robot Líder - Tercera Parte

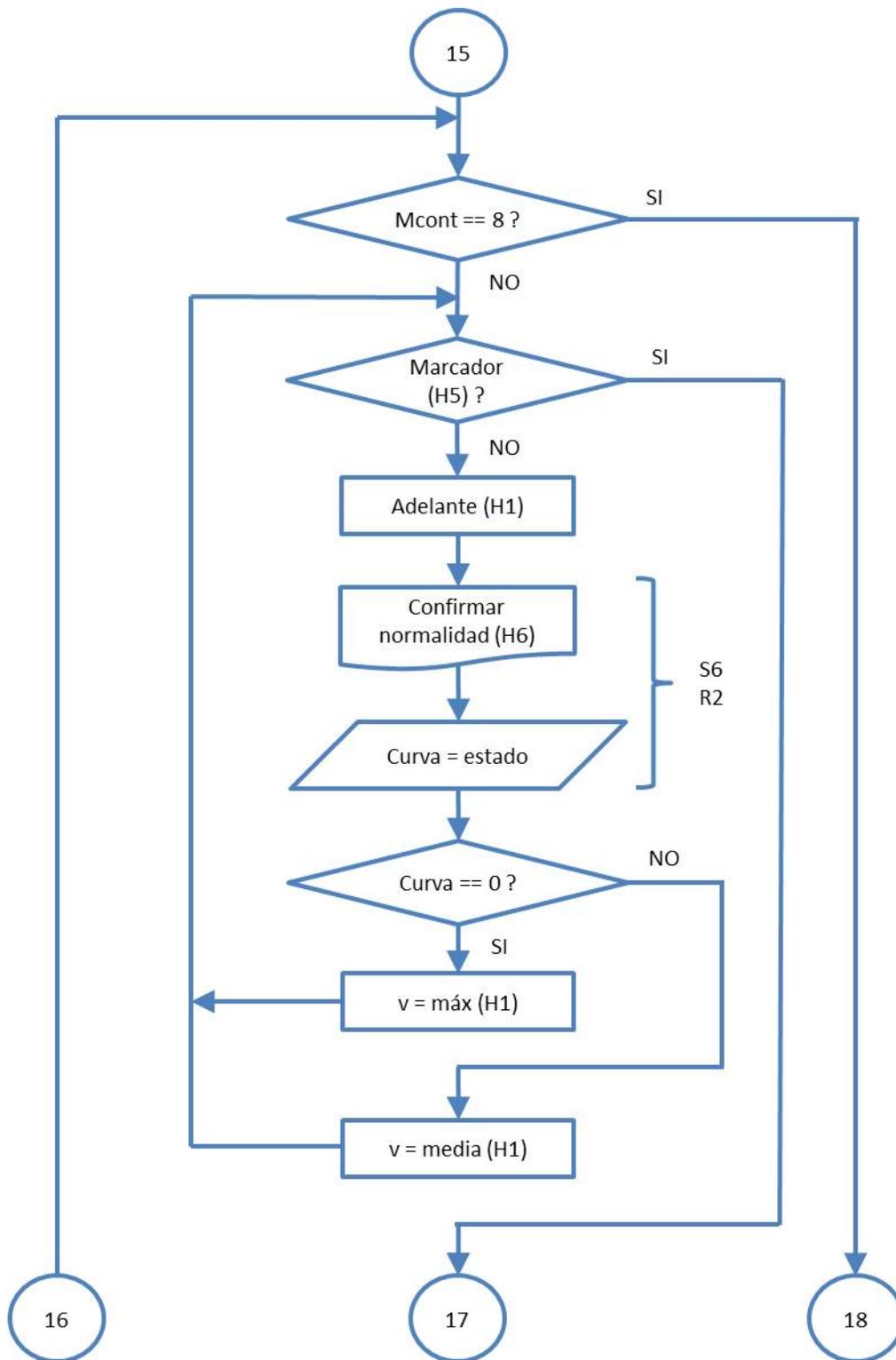


Figura A.38: Acción Cooperativa I2 para Robot Líder - Cuarta Parte

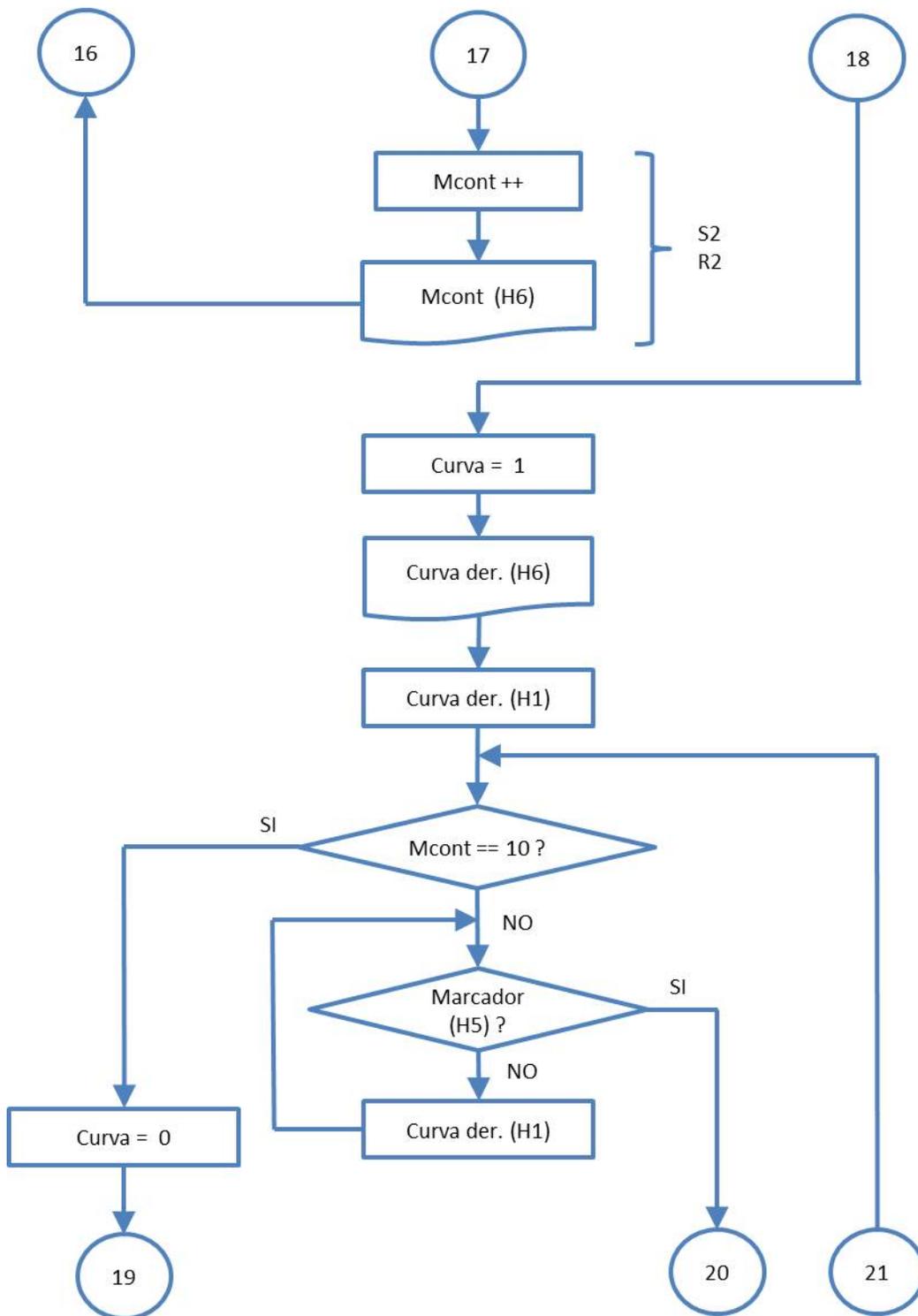


Figura A.39: Acción Cooperativa **12** para Robot Líder - Quinta Parte

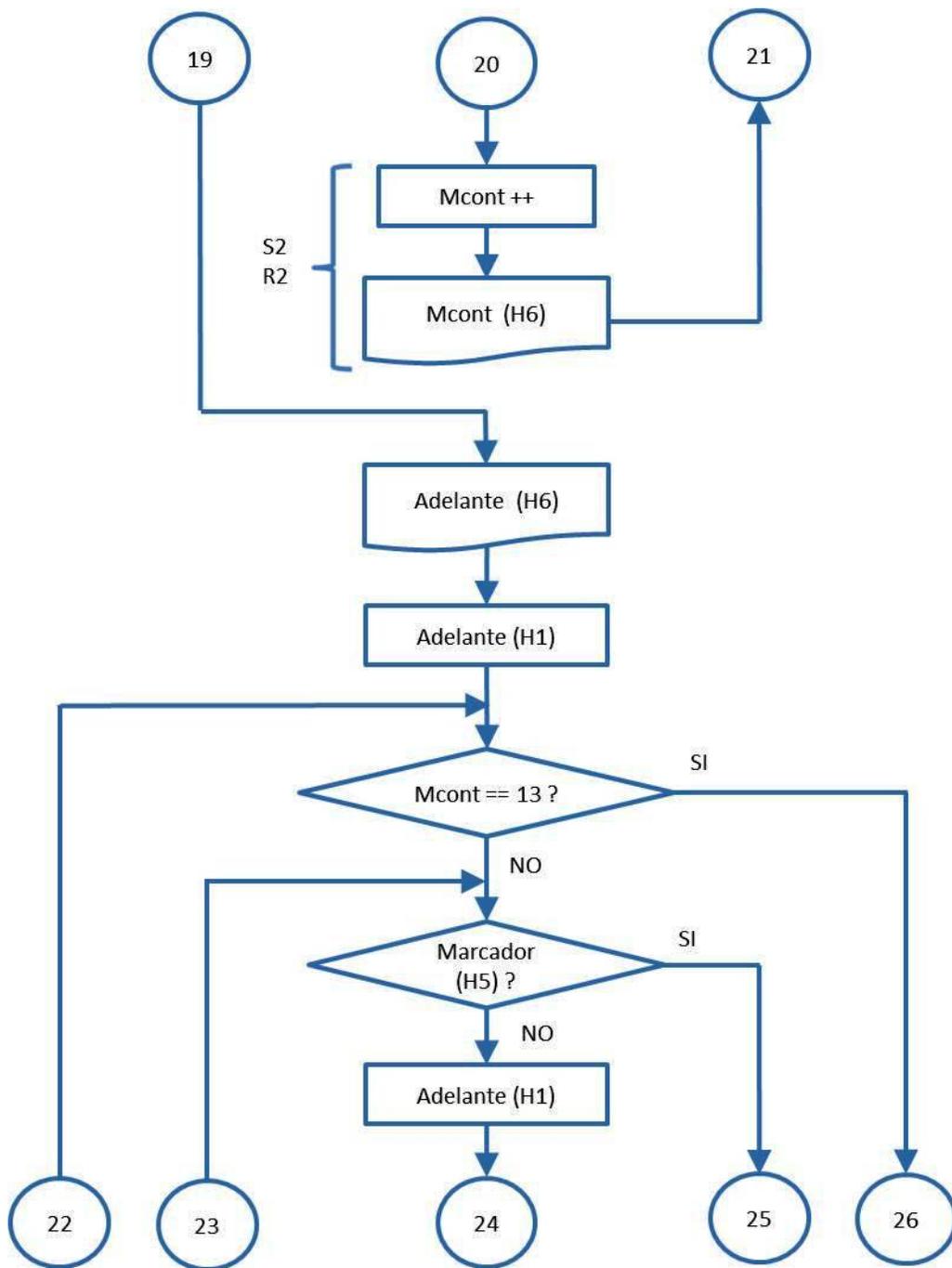


Figura A.40: Acción Cooperativa I2 para Robot Líder - Sexta Parte

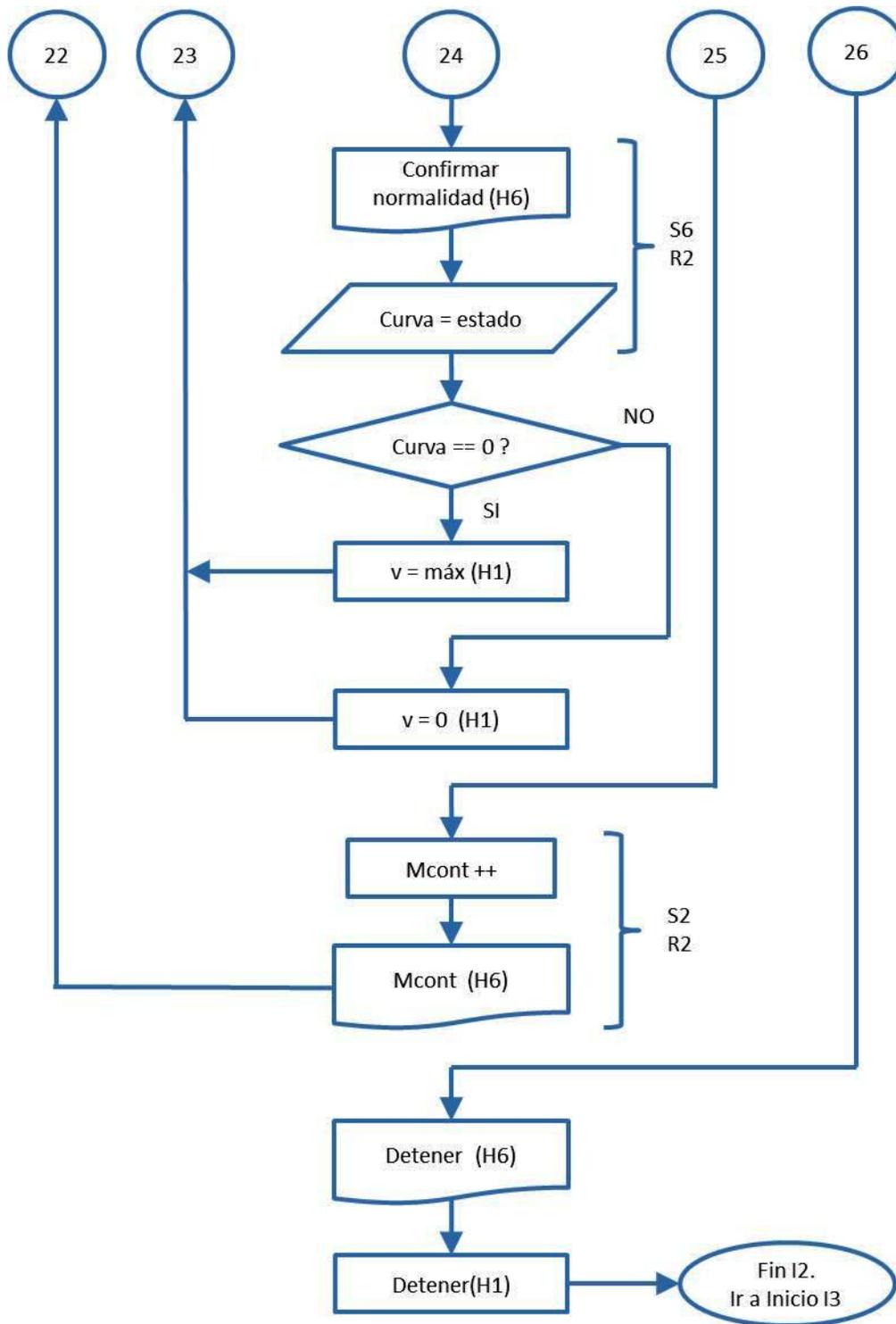


Figura A.41: Acción Cooperativa I2 para Robot Líder - Séptima Parte

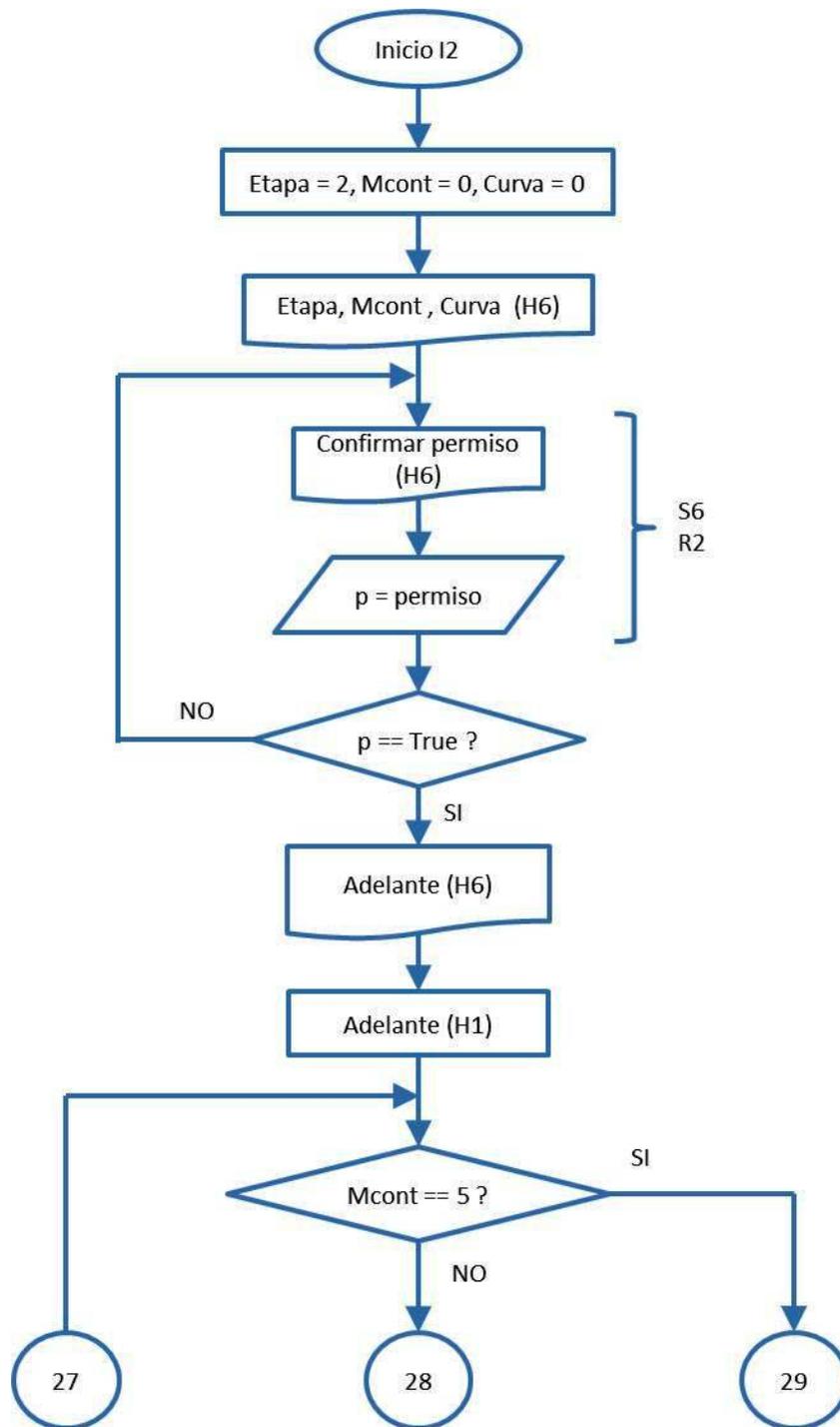


Figura A.42: Acción Cooperativa **I2** para Robot Seguidor - Primera Parte

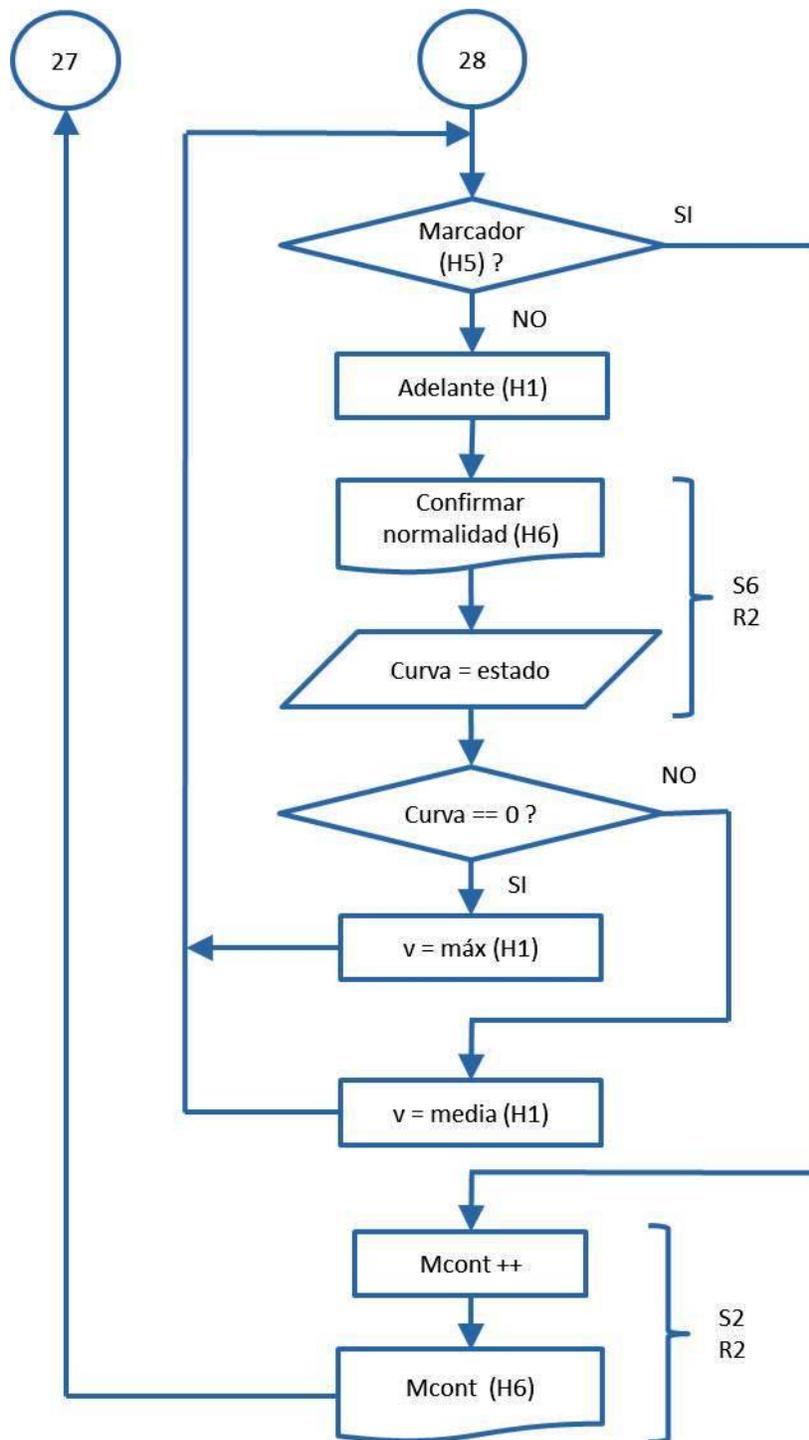


Figura A.43: Acción Cooperativa I2 para Robot Seguidor - Segunda Parte

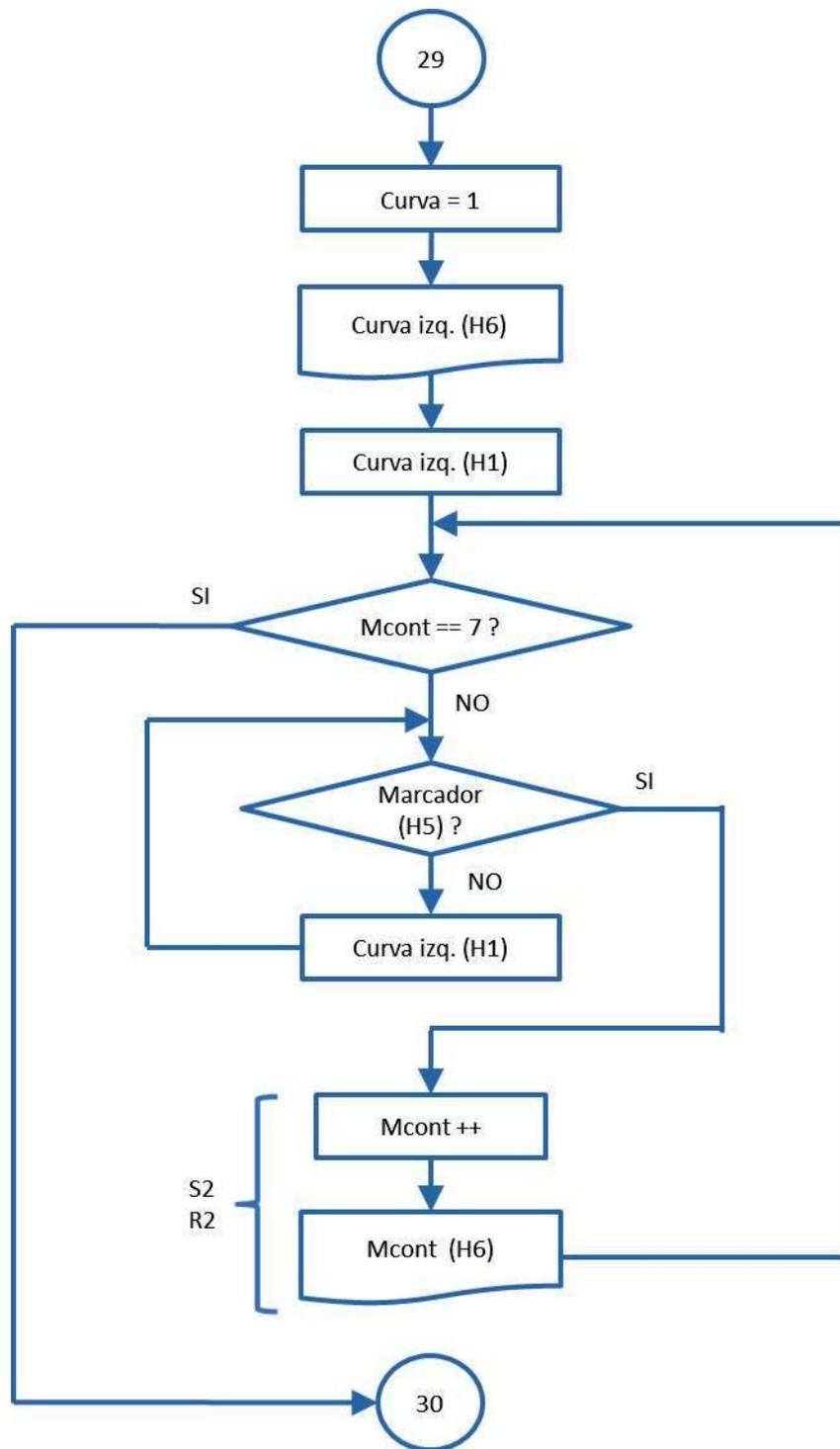


Figura A.44: Acción Cooperativa I2 para Robot Seguidor - Tercera Parte

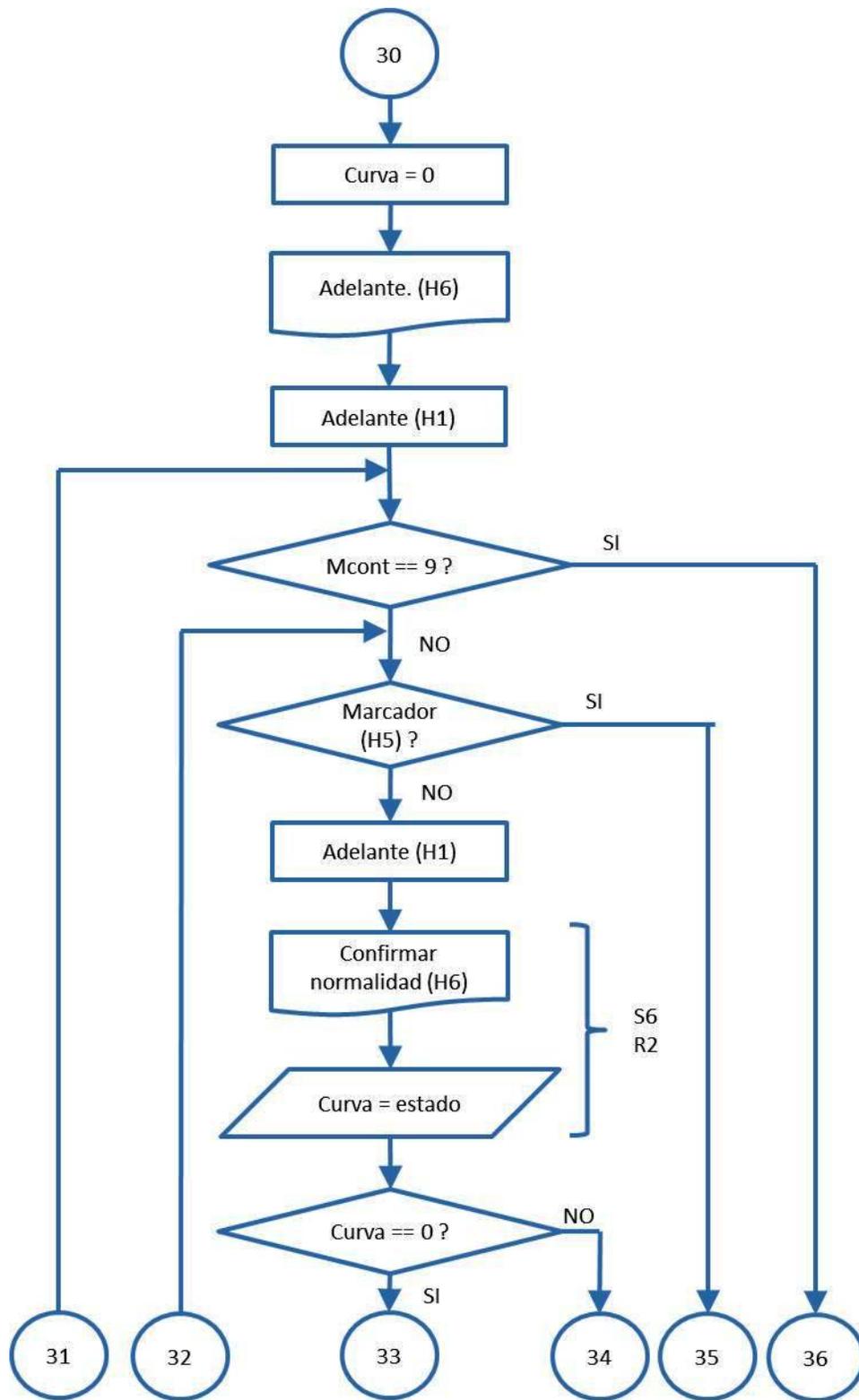


Figura A.45: Acción Cooperativa I2 para Robot Seguidor - Cuarta Parte

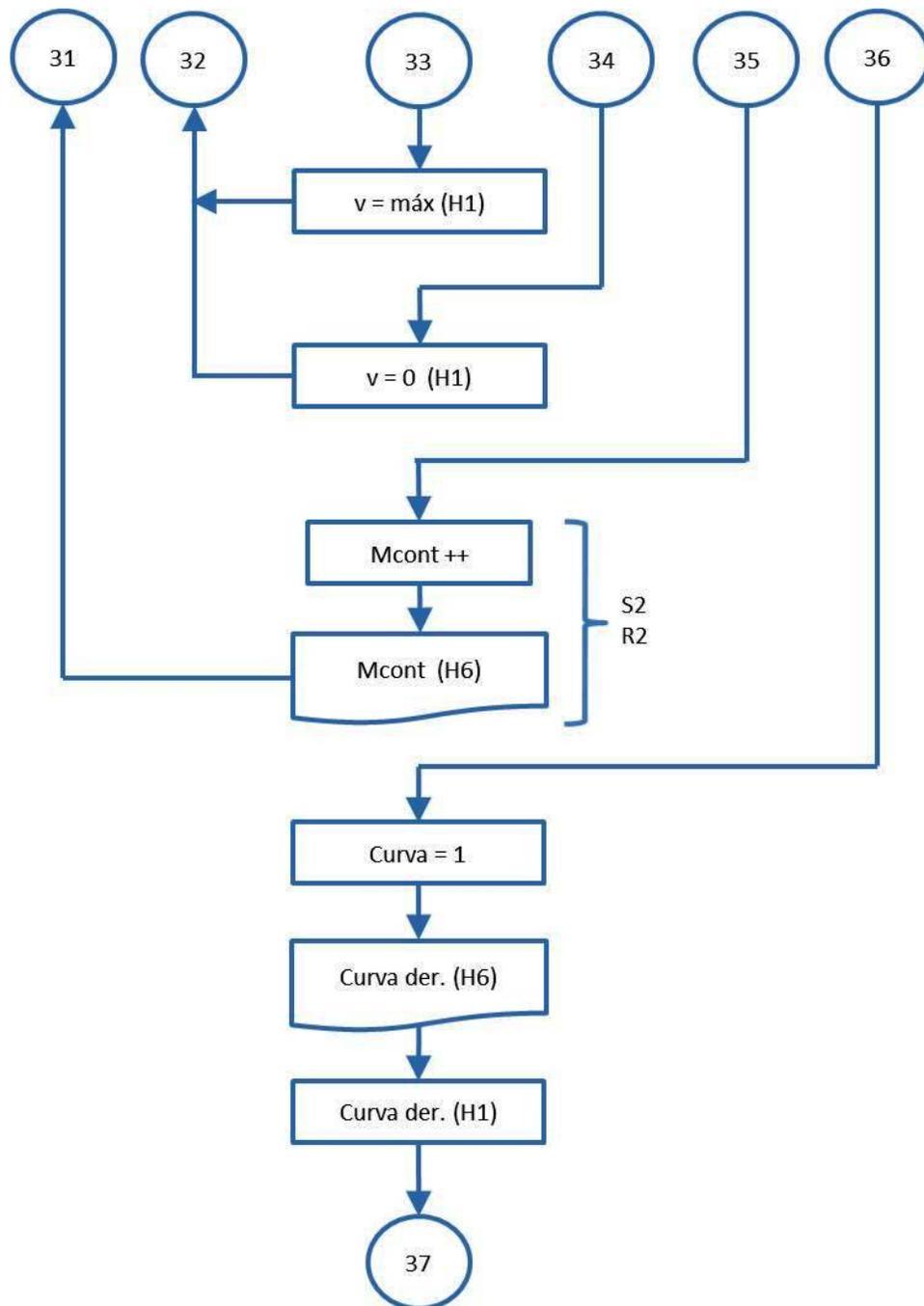


Figura A.46: Acción Cooperativa I2 para Robot Seguidor - Quinta Parte

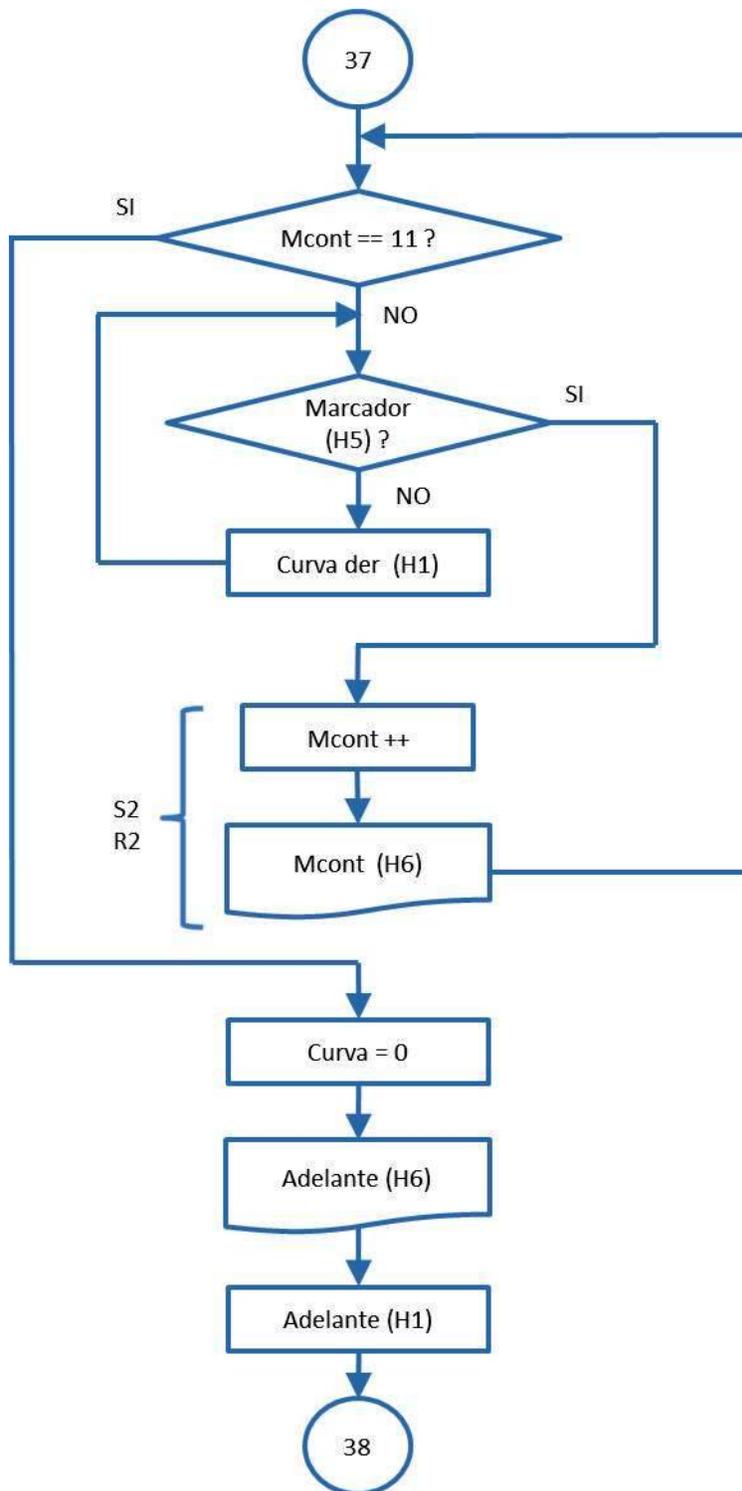


Figura A.47: Acción Cooperativa I2 para Robot Seguidor - Sexta Parte

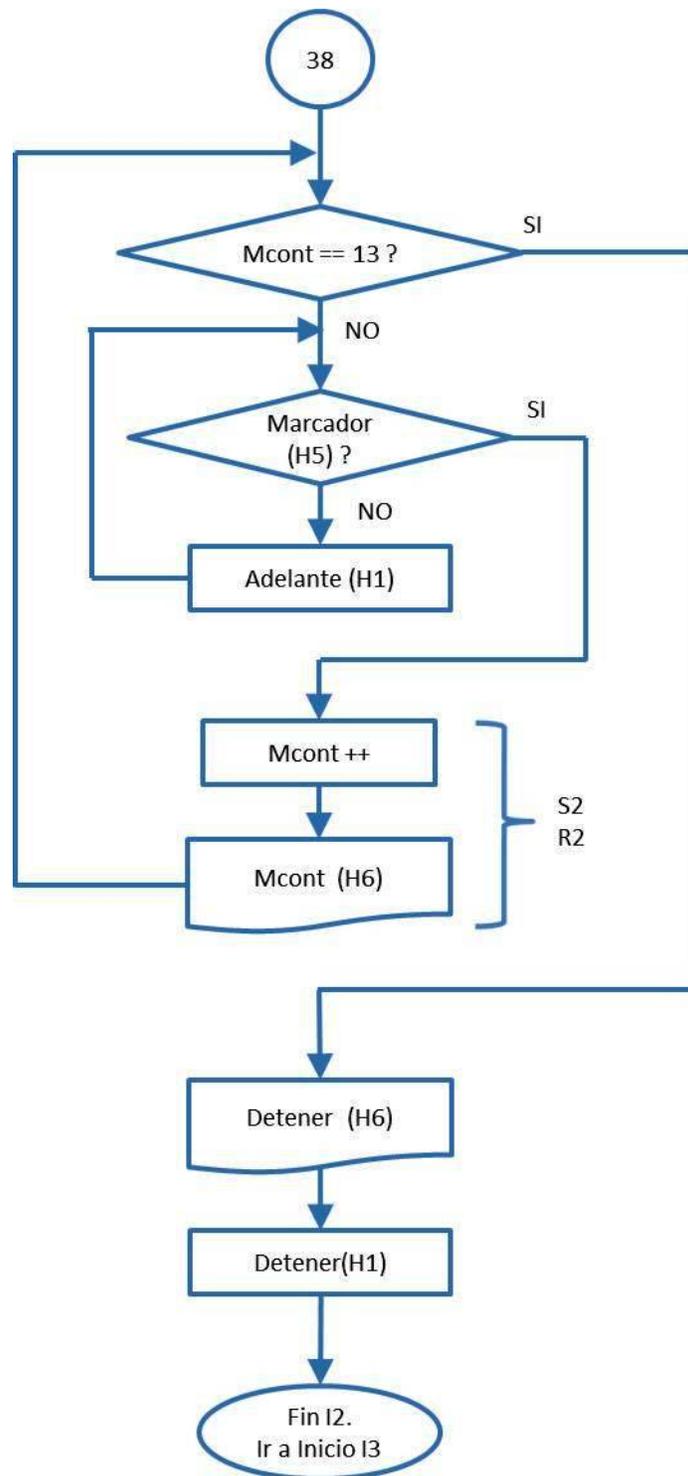


Figura A.48: Acción Cooperativa **I2** para Robot Seguidor - Séptima Parte

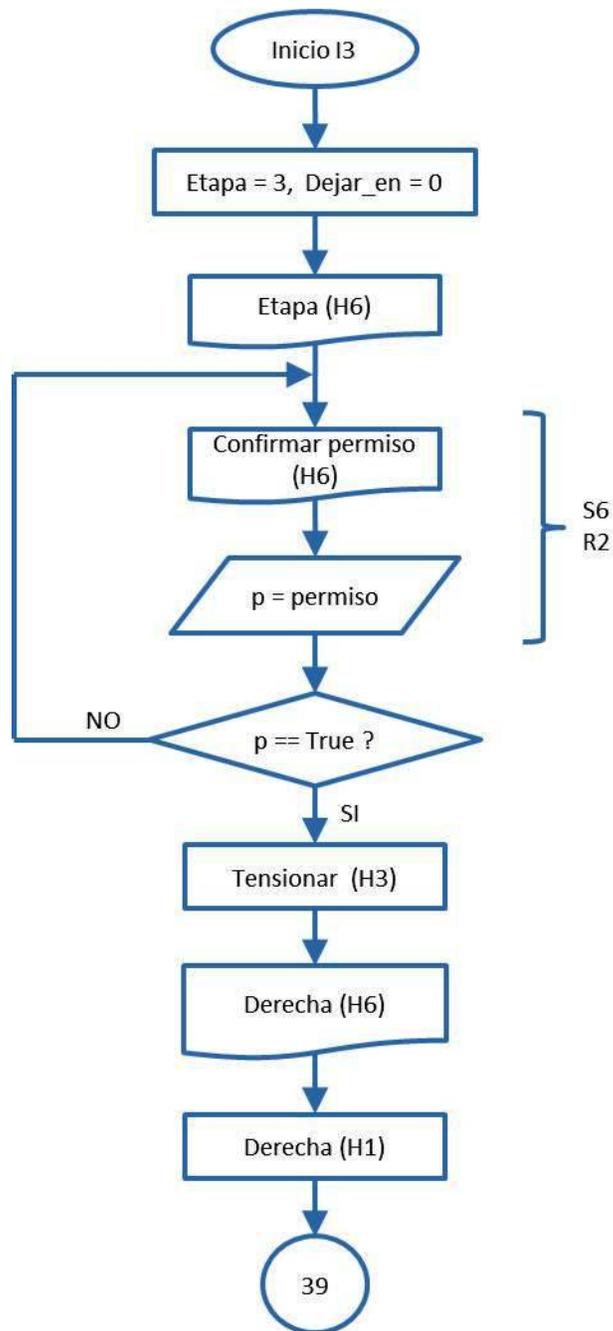


Figura A.49: Acción Cooperativa **I3** - Primera Parte

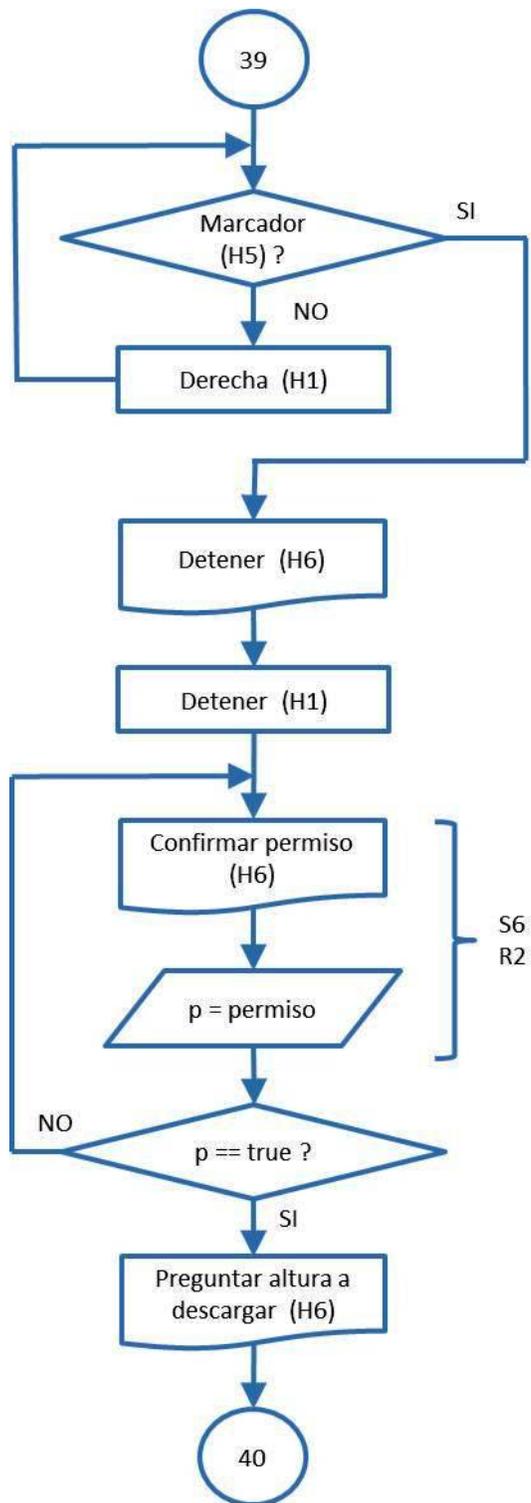


Figura A.50: Acción Cooperativa I3 - Segunda Parte

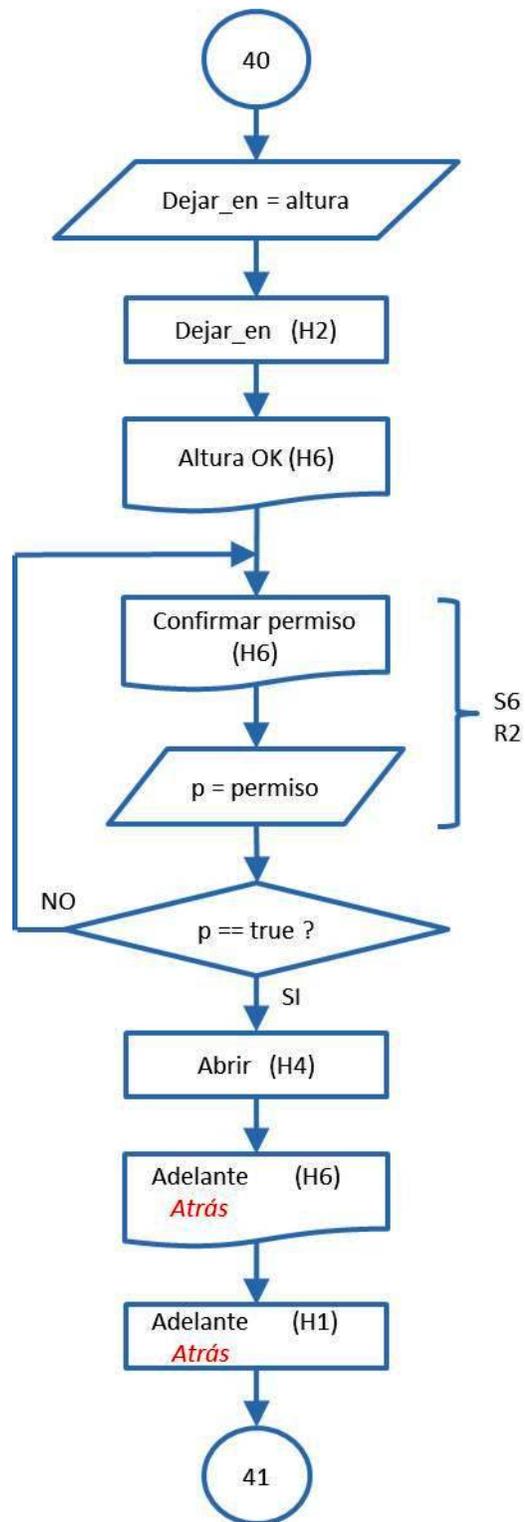


Figura A.51: Acción Cooperativa I3 - Tercera Parte

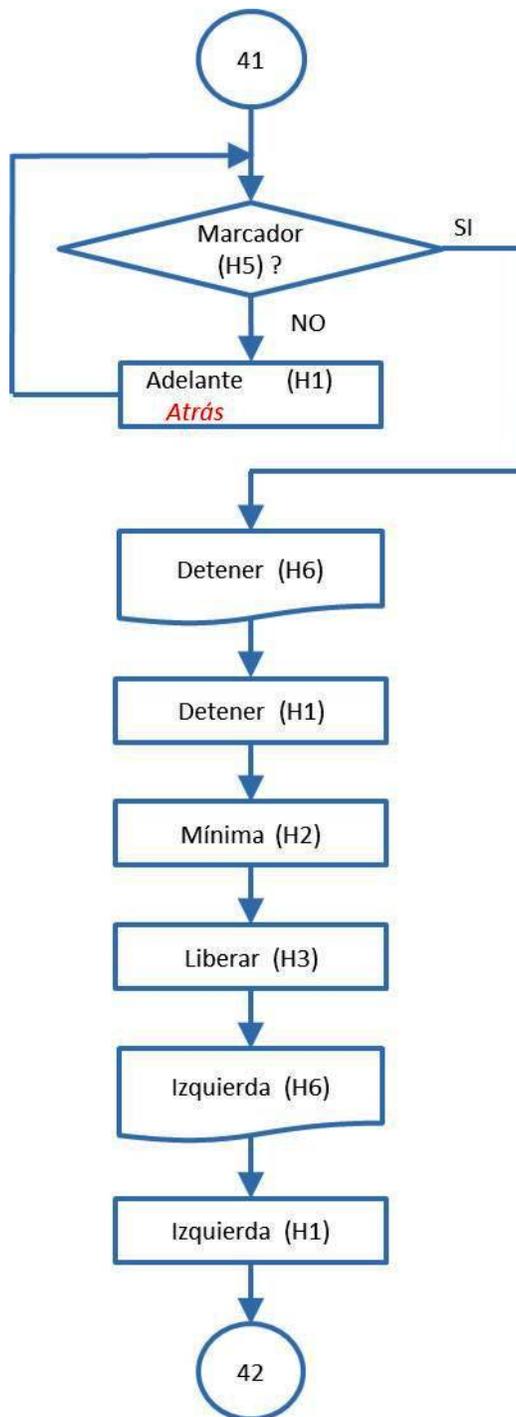


Figura A.52: Acción Cooperativa 13 - Cuarta Parte

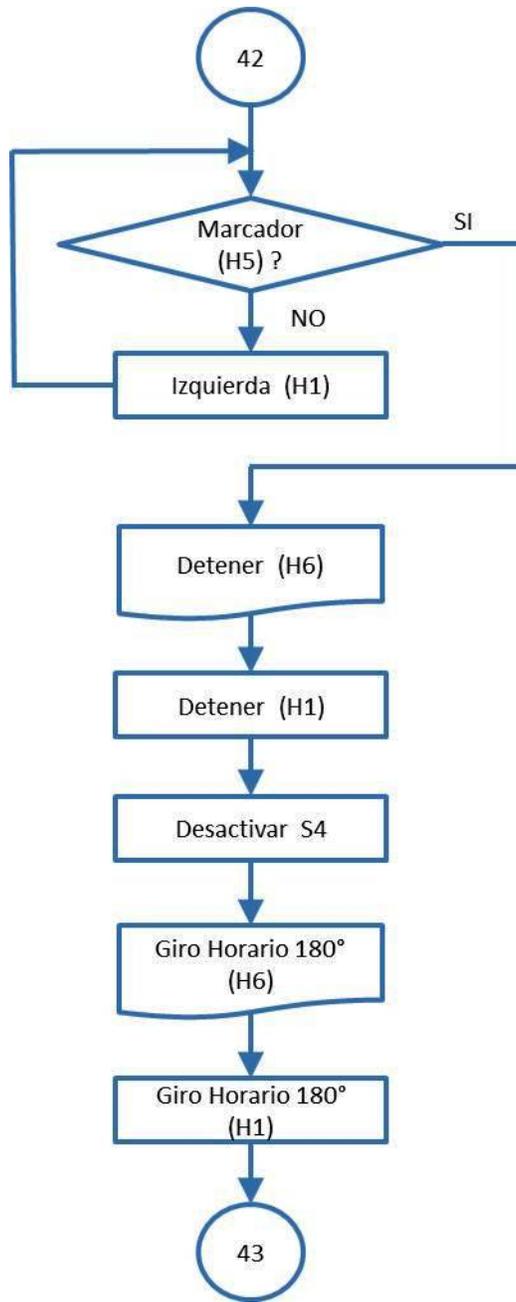


Figura A.53: Acción Cooperativa 13 - Quinta Parte

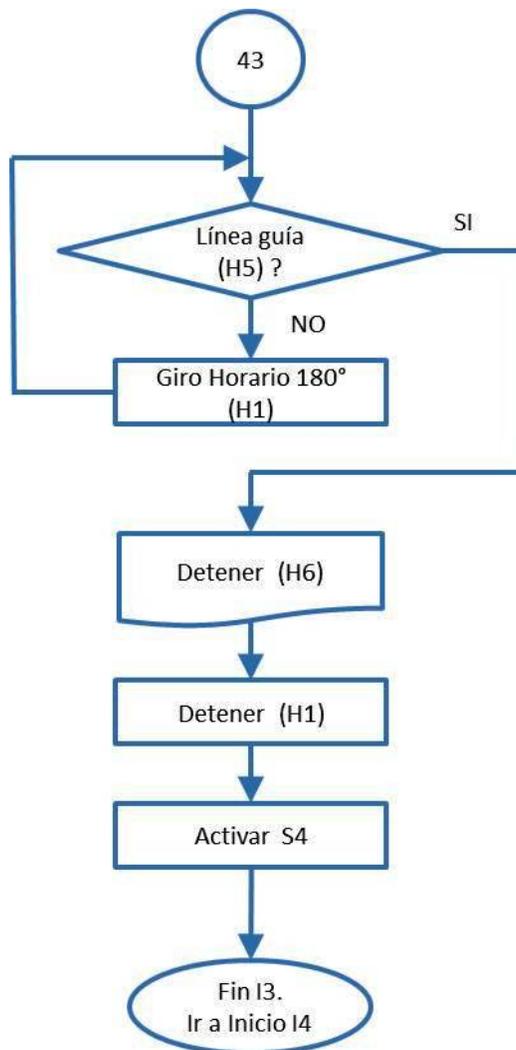


Figura A.54: Acción Cooperativa **I3** - Sexta Parte

Al igual que la acción cooperativa **I2**, la acción cooperativa **I4** (Retornar del punto final al punto inicial) es diferente para ambos agentes. Las Figuras A.49 a A.54 presentan la secuencia del Robot Líder y las Figuras A.63 a A.70 presentan la secuencia del Robot Seguidor.

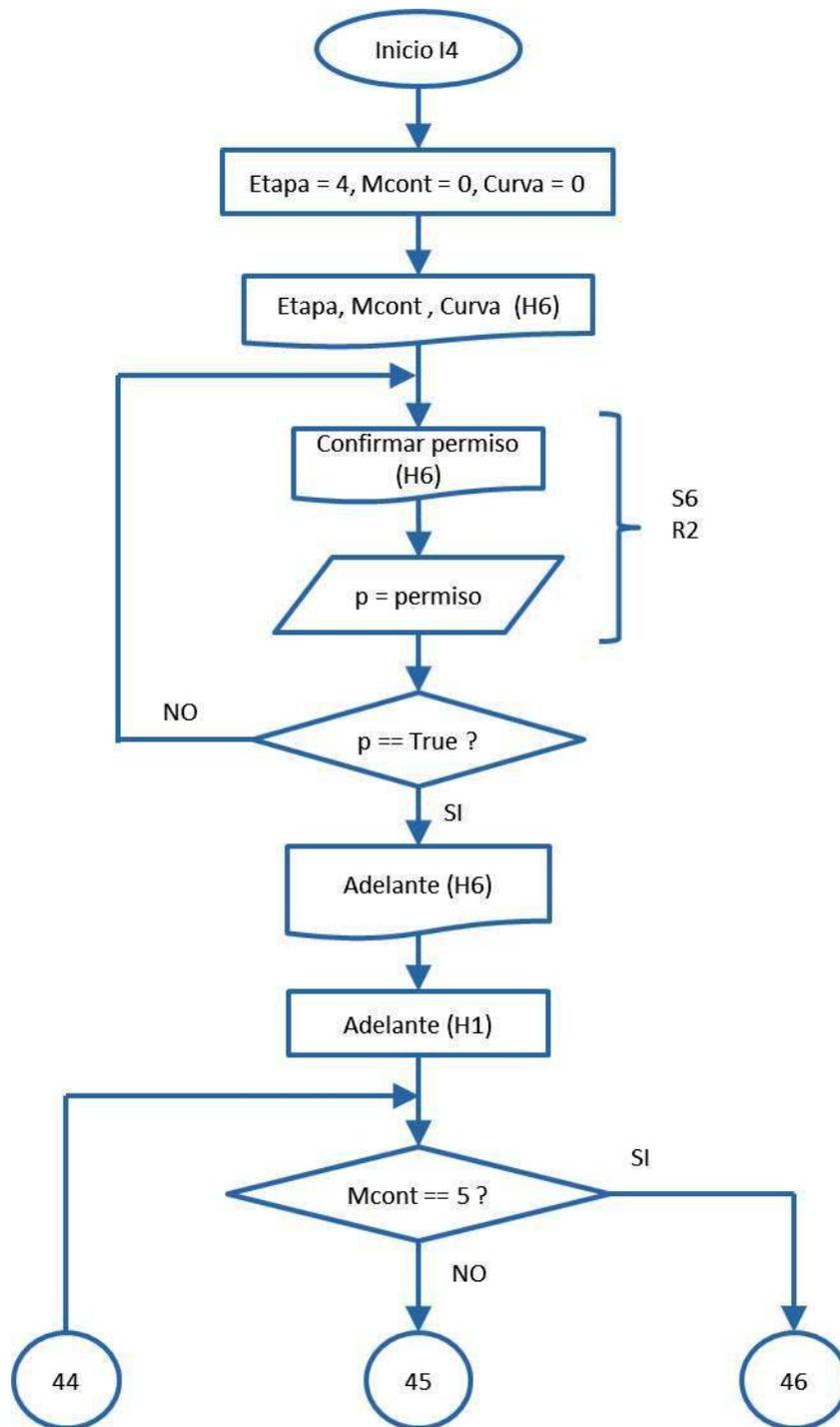


Figura A.55: Acción Cooperativa **I4** para Robot Líder - Primera Parte

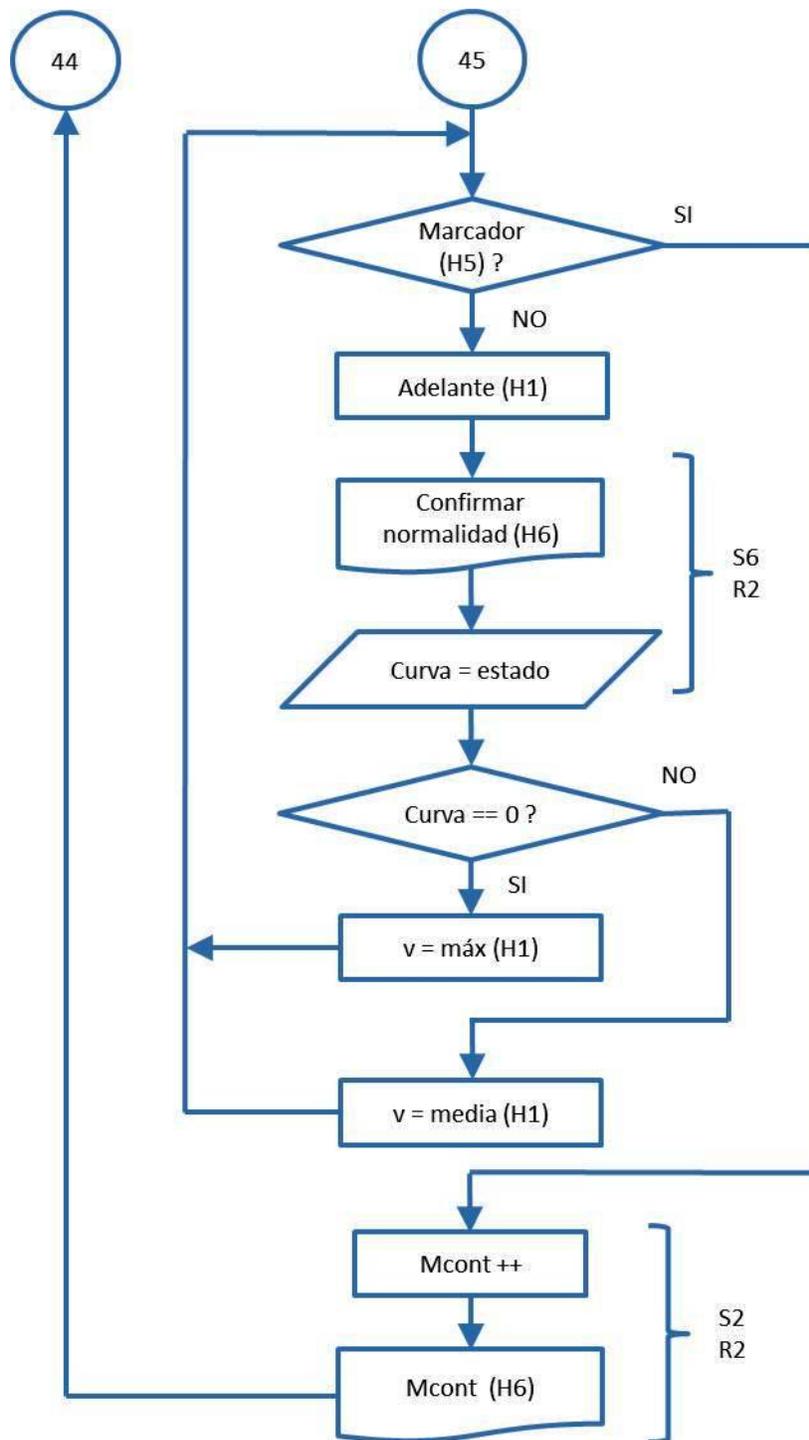


Figura A.56: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Segunda Parte

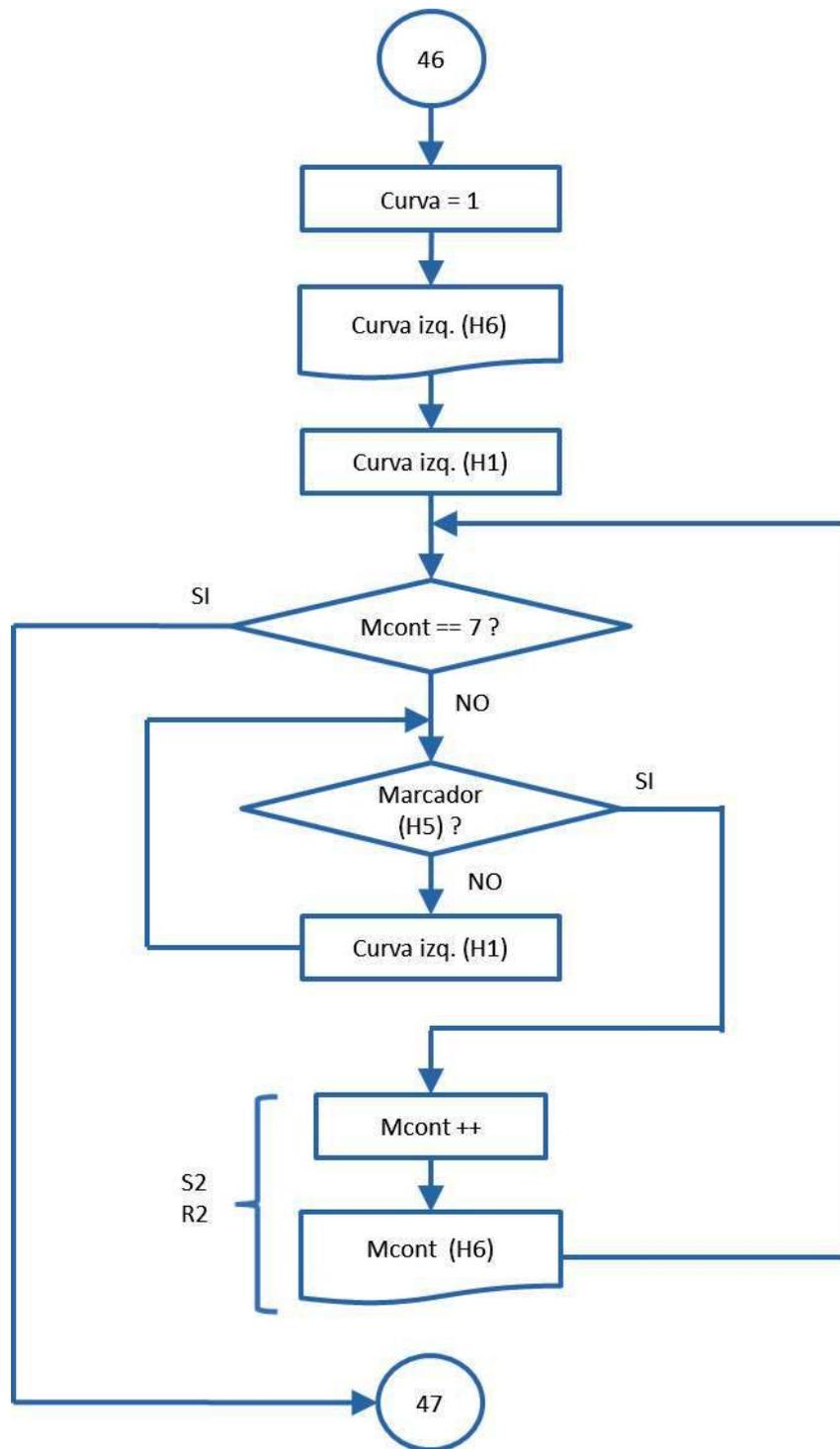


Figura A.57: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Tercera Parte

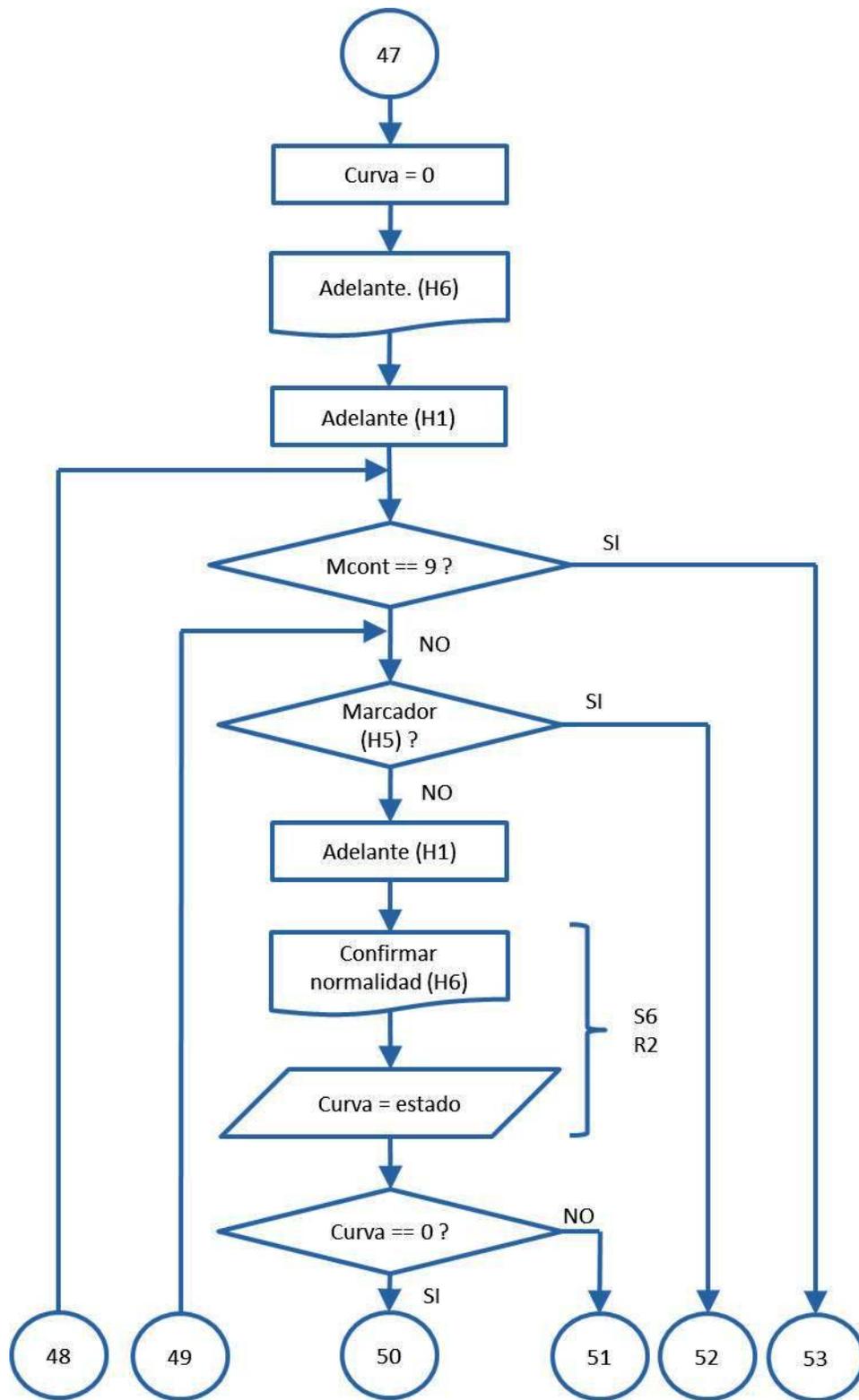


Figura A.58: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Cuarta Parte

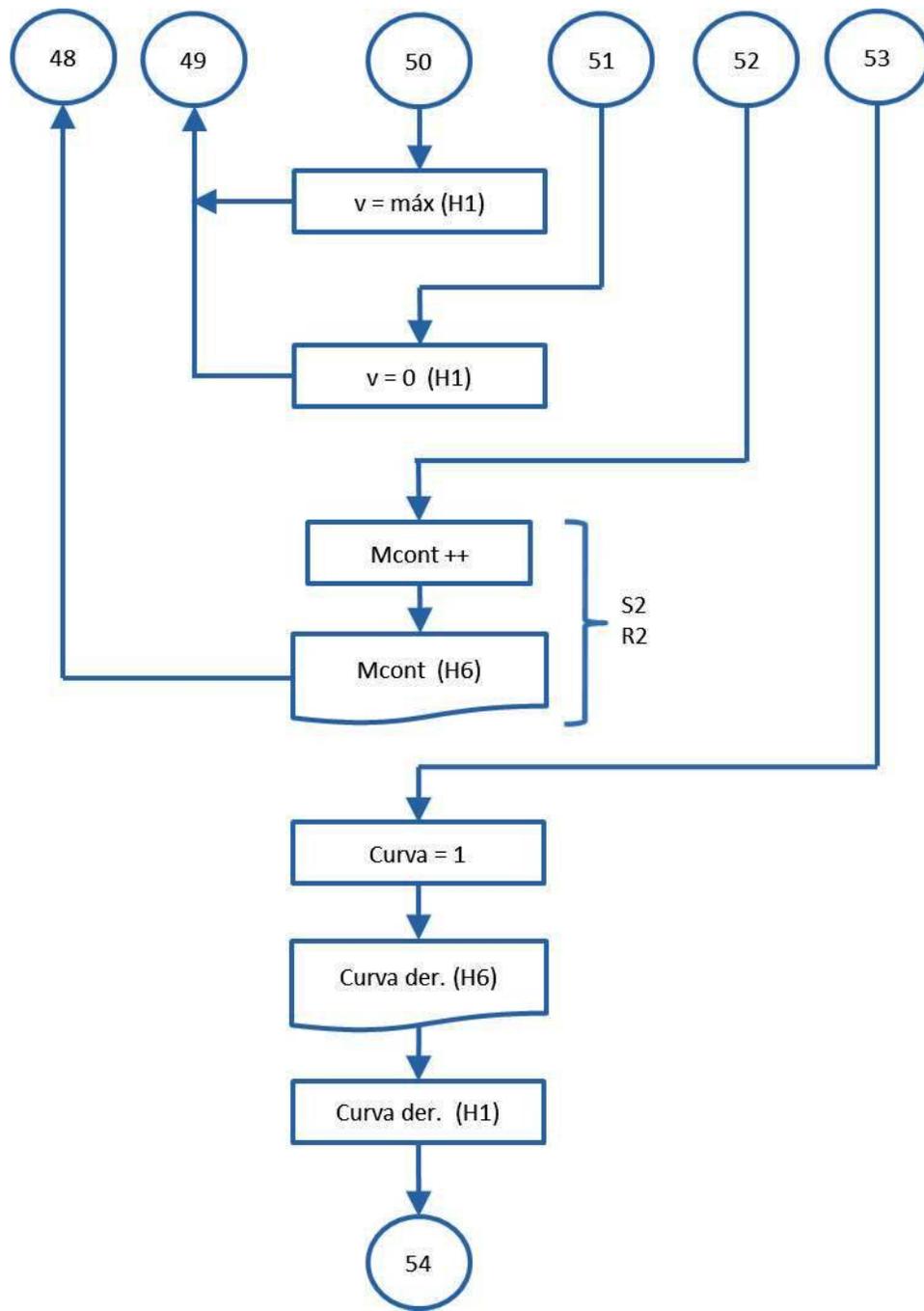


Figura A.59: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Quinta Parte

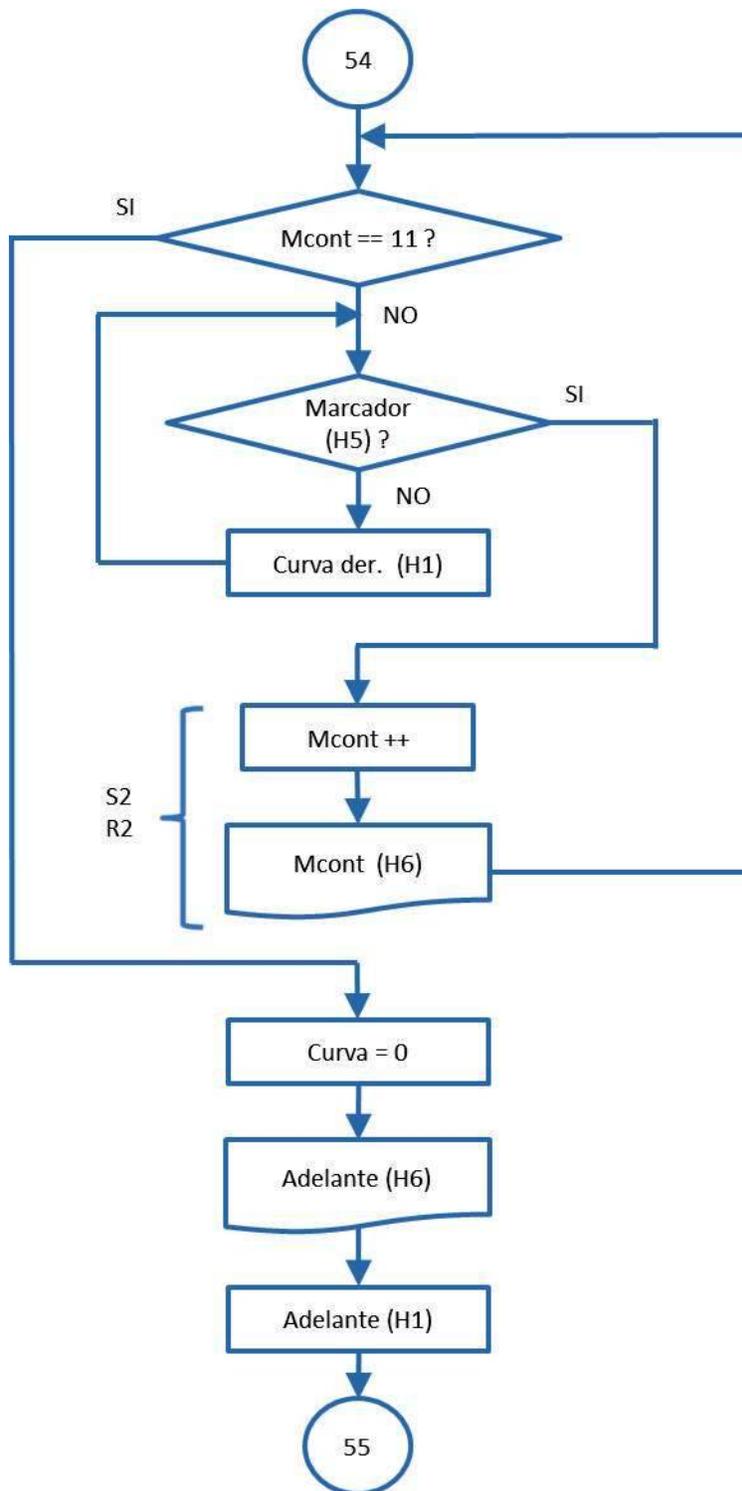


Figura A.60: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Sexta Parte

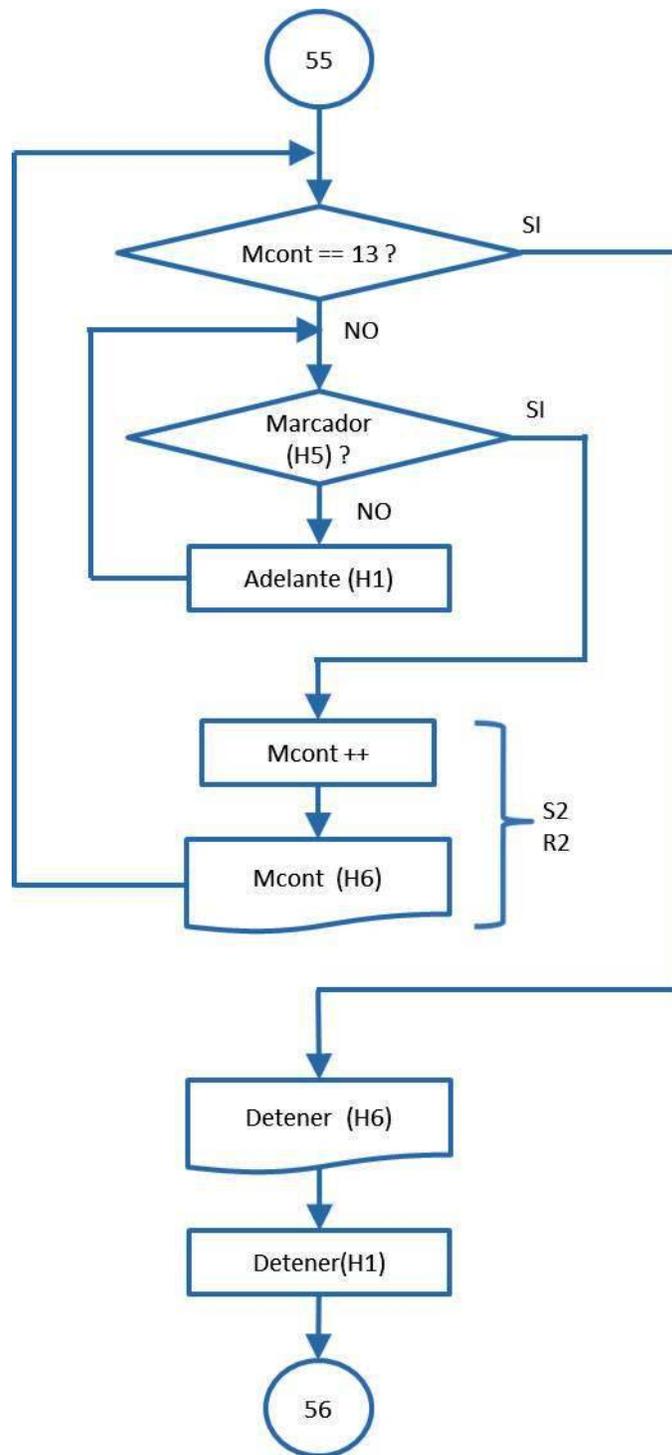


Figura A.61: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Séptima Parte

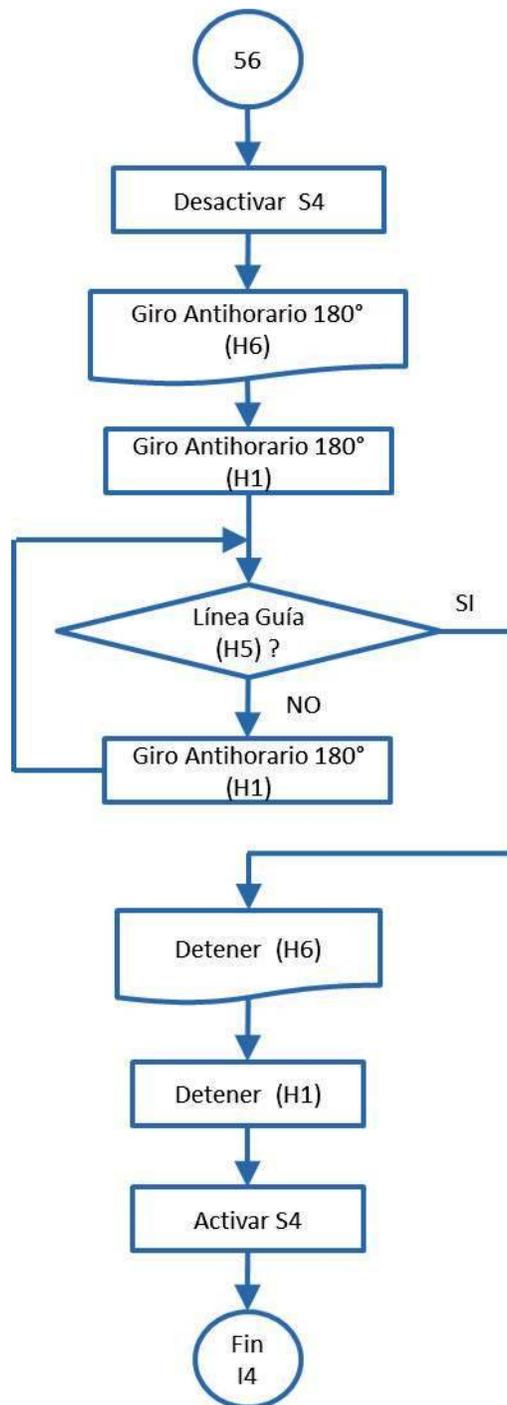


Figura A.62: Acción Cooperativa I4 para Robot Líder - Octava Parte

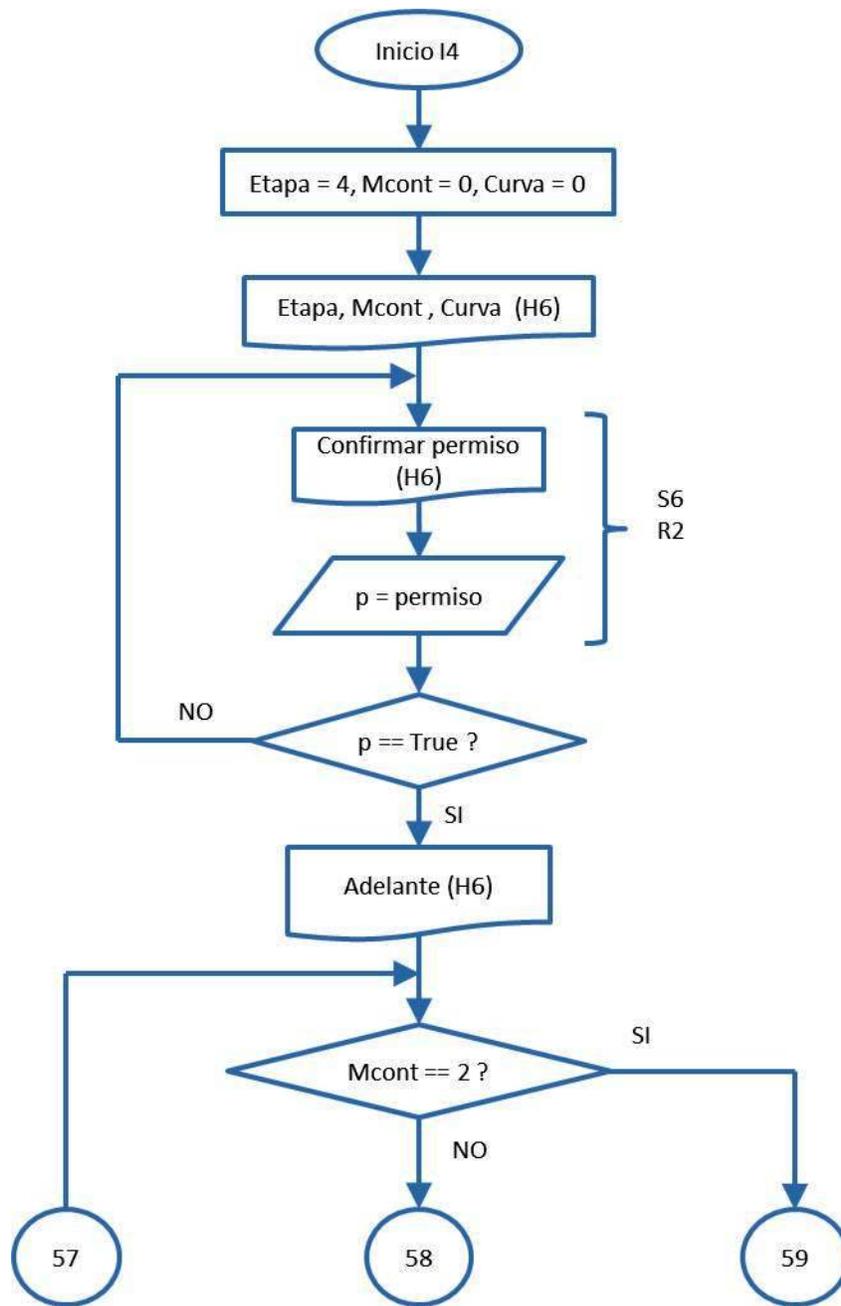


Figura A.63: Acción Cooperativa **I4** para Robot Seguidor - Primera Parte

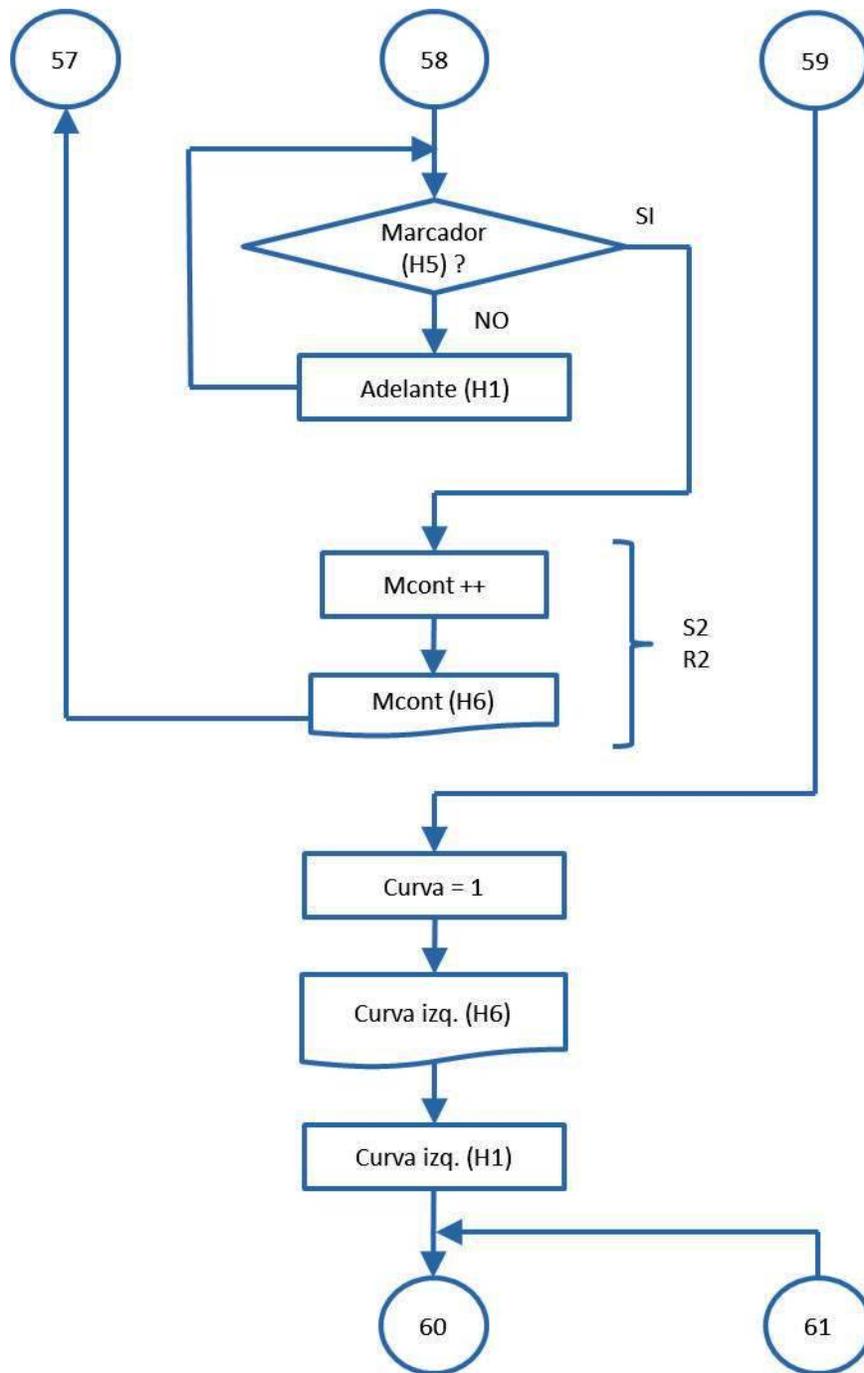


Figura A.64: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Segunda Parte

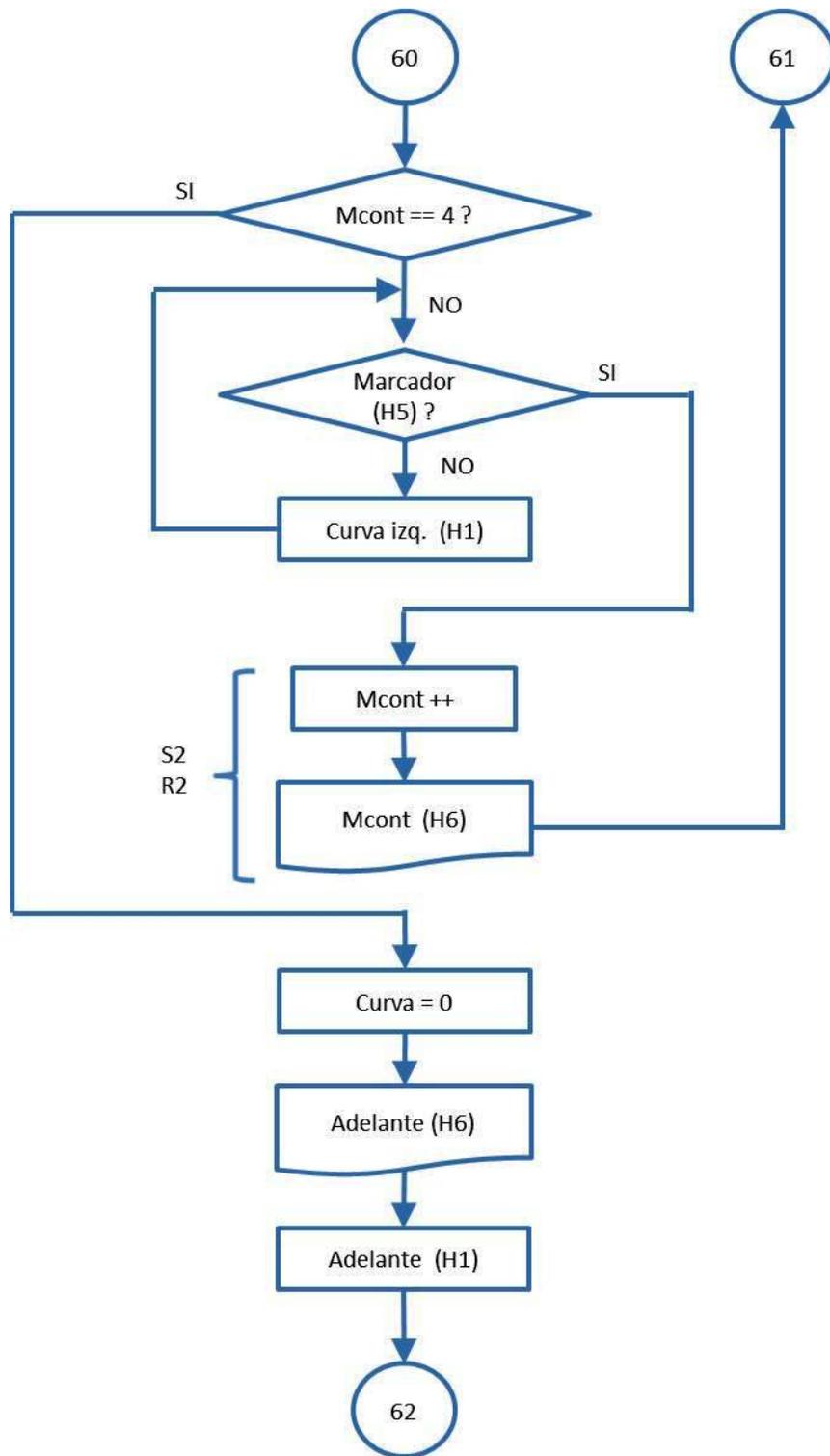


Figura A.65: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Tercera Parte

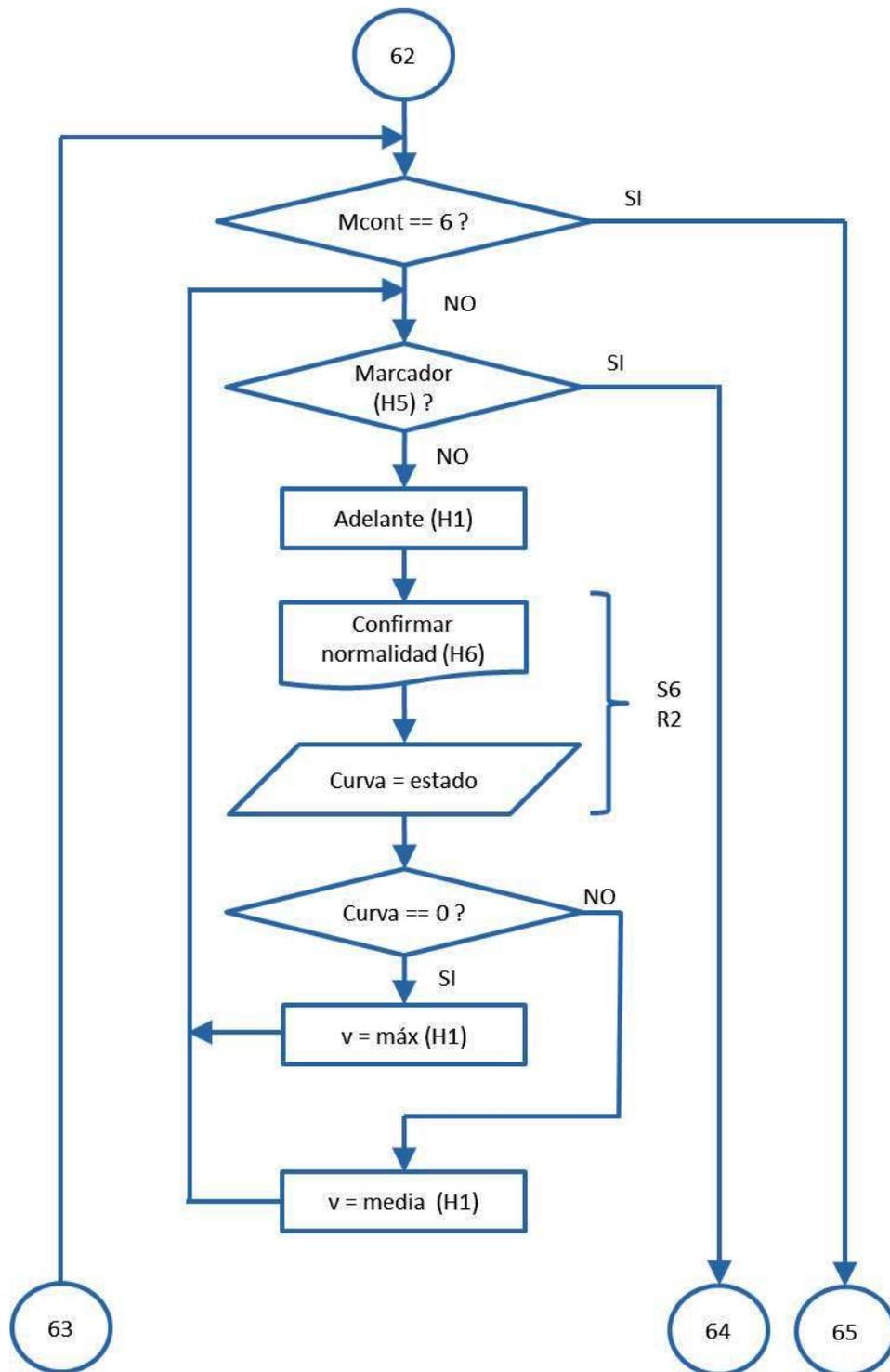


Figura A.66: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Cuarta Parte

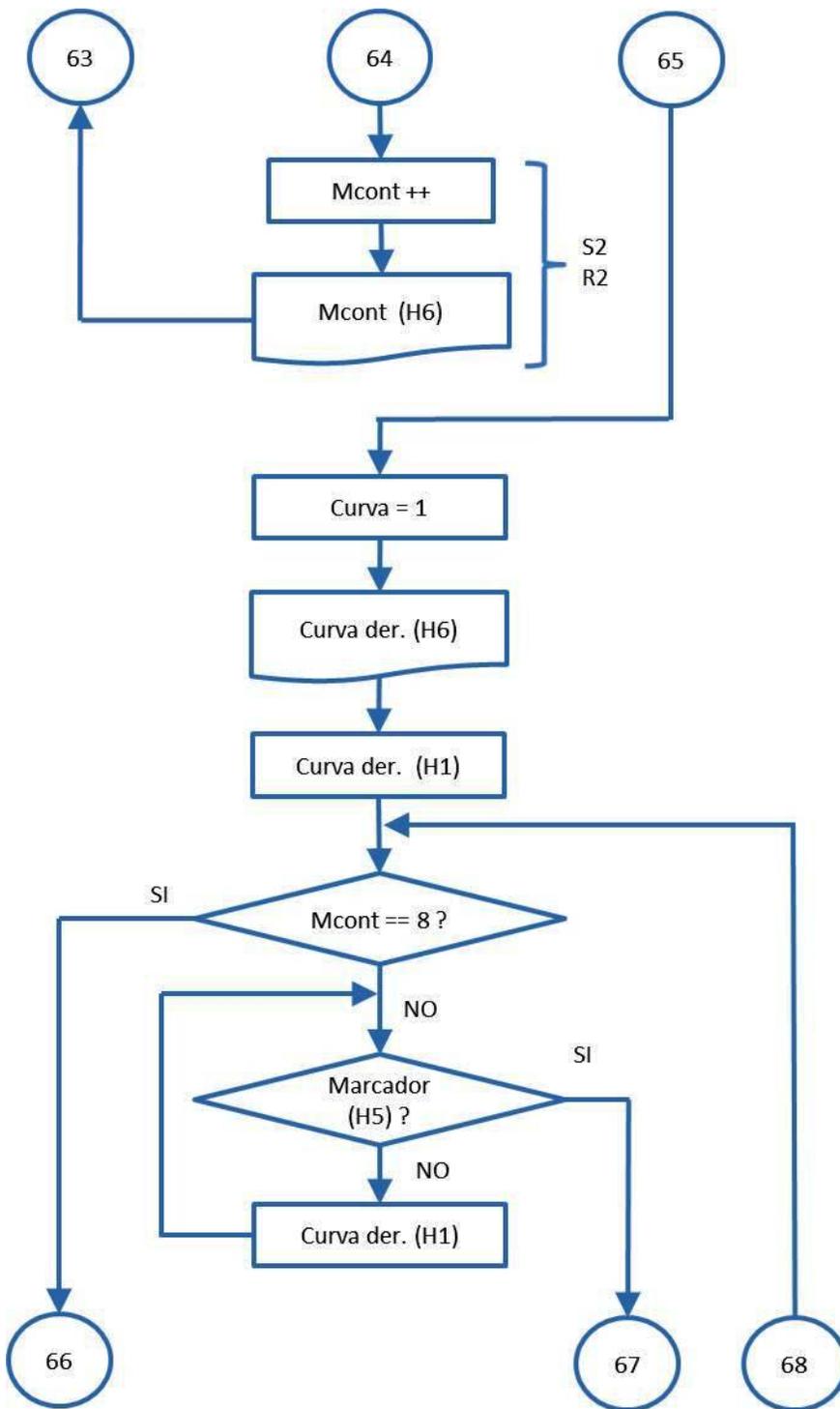


Figura A.67: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Quinta Parte

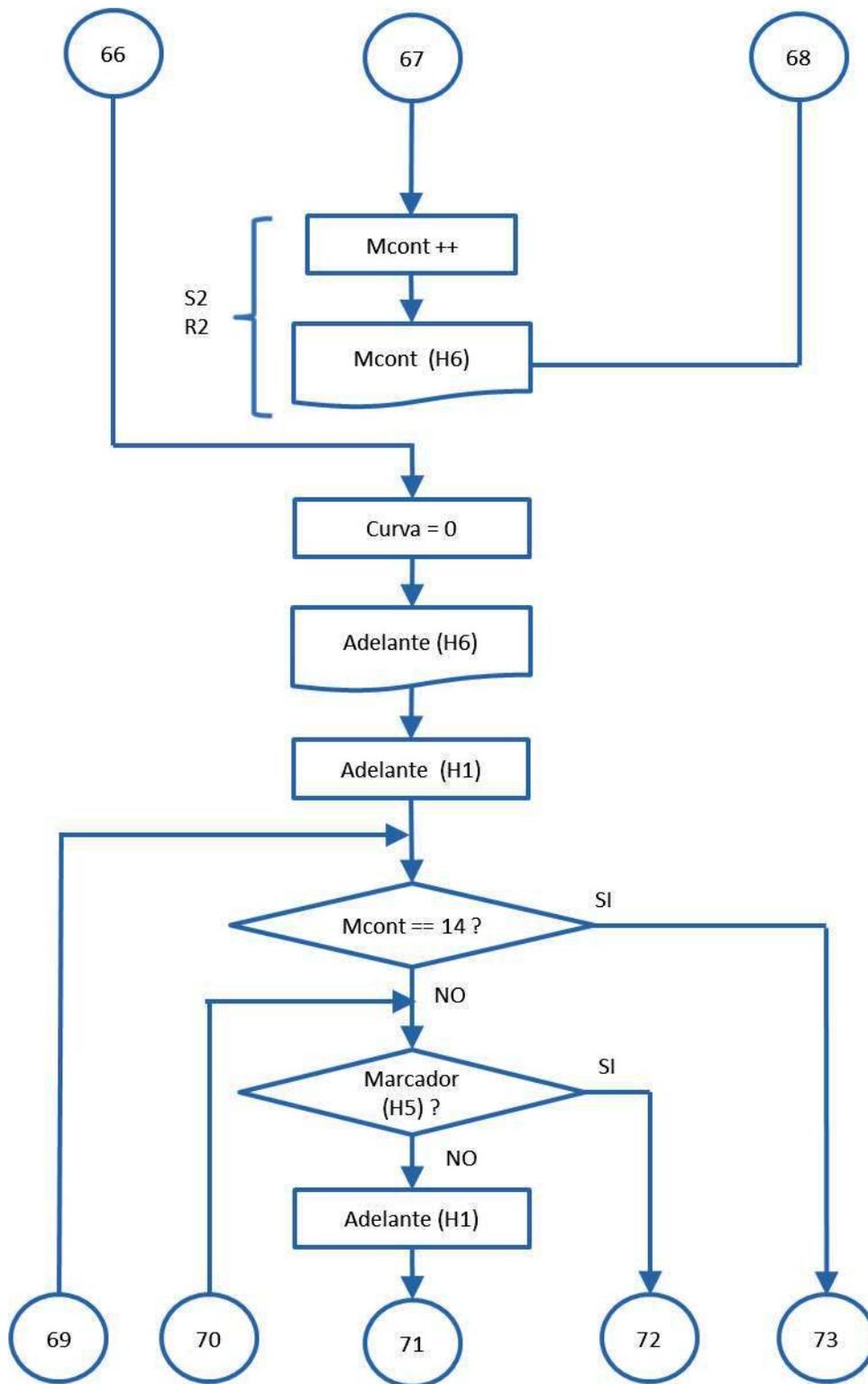


Figura A.68: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Sexta Parte

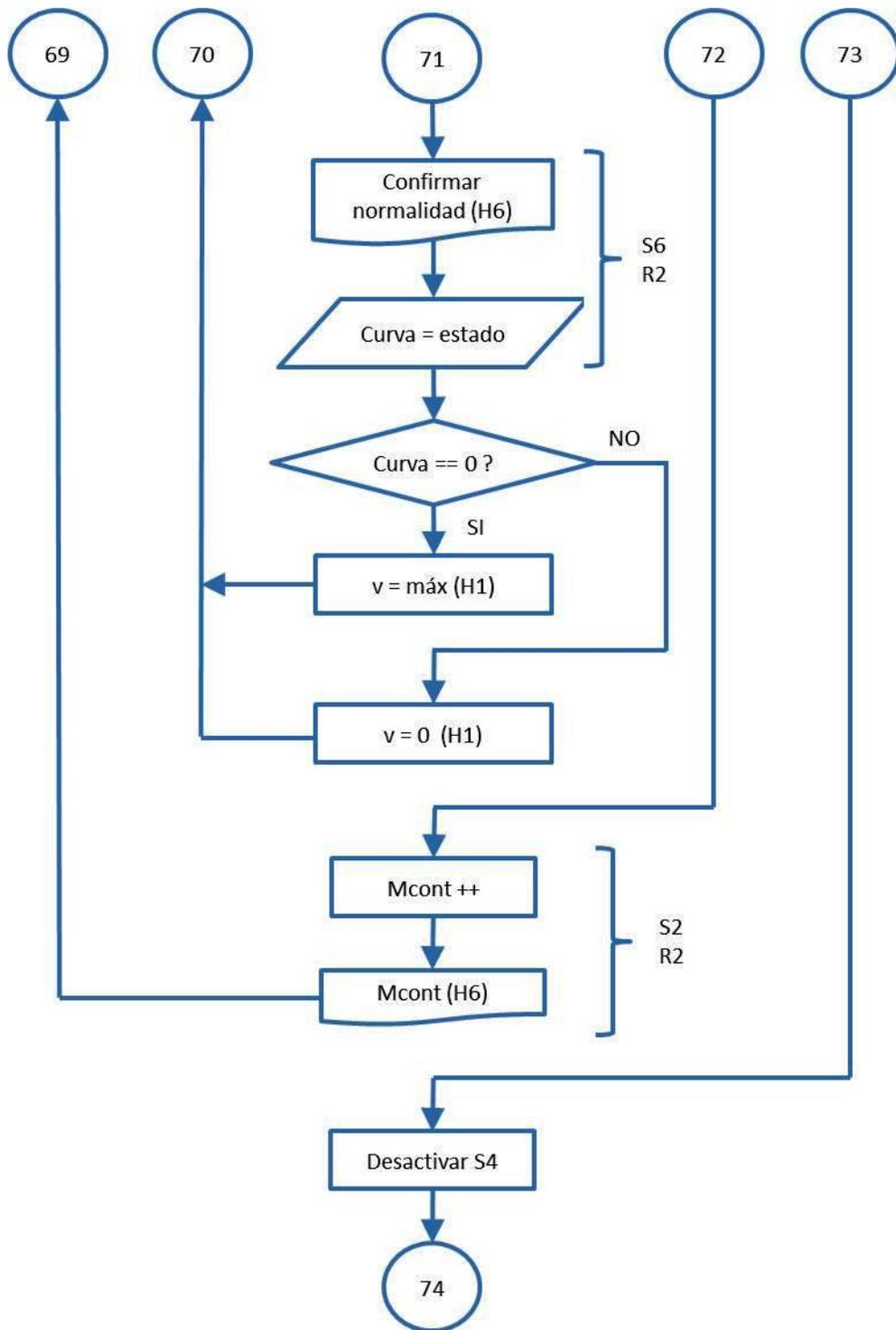


Figura A.69: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Séptima Parte

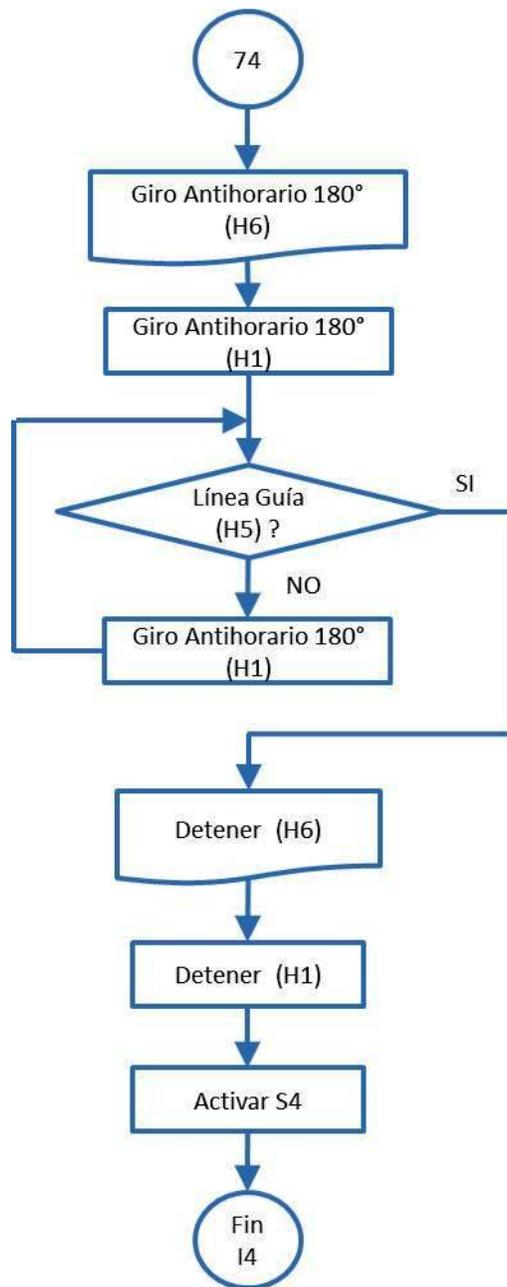


Figura A.70: Acción Cooperativa I4 para Robot Seguidor - Octava Parte

## **A.4 PLANOS DEL DISEÑO MECÁNICO**

Las carpetas que se encuentran adjuntas en formato digital al presente documento contienen los planos de las diversas piezas no-estandarizadas en formato .drw (SolidWorks 2012) y .jpg (imágenes). Dichas piezas conforman los 4 sistemas y elementos principales que se diseñaron para la tarea de transporte.

1. El robot, denominado también como el Sistema Robótico de Transporte Cooperativo (SRTC).
2. El punto inicial o Estiba, donde se colocan las canaletas en el Área de Bodega.
3. El punto final o Estante, donde llegan las canaletas transportadas al Área de Estantería.
4. La Estación de Recarga, donde se conectan los robots para recargar sus baterías.