

ESCUELA DE INGENIERÍA MINERA E INDUSTRIAL DE
ALMADÉN



TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y CONTROL DE BRAZO ROBÓTICO PARA LIMPIEZA DE PLACAS SOLARES

UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor:
Director:

Rafael Muñoz Plaza
Dr. Javier Albusac Jiménez

Curso: 2015-2016



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría comenzar este primer apartado agradeciendo a mi tutor de proyecto, al Doctor y Profesor D. Javier Alonso Albusac, por ofrecerme la posibilidad de hacer este Trabajo de Fin de Grado y manifestarme su confianza, colaboración, consejos, apoyo y sobre todo por su interés mostrado en mi proceso de realización, que jamás declinó en esfuerzos y en brindarme las posibilidades de reunirnos en todas las circunstancias posibles, ya fuera en Almadén, Ciudad Real o por videoconferencia. Sin su ayuda jamás podría haberlo realizado.

Agradecer a mi familia y seres más queridos, por estar ahí en cada momento dándome ánimos y confiando en mí siempre. Y sobre todo quiero destacar la figura de mi pareja Elena, porque sin su ayuda, su esfuerzo en buscar tiempo y regalarme horas y horas para mí y para que pudiera finalizar mi carrera no podría haberlo logrado. Y se lo quiero agradecer con creces, pues tenemos ella y yo un proyecto común todavía más importante y a largo plazo, nuestro hijo Rafa, al que dedico este proyecto.

También quiero agradecer a mis padres por todo el esfuerzo y la confianza depositada en mí, en los buenos y sobre todo en los malos momentos, este proyecto también es el final del que iniciasteis conmigo hace muchos años, y por ello os lo quiero agradecer de corazón. Y por supuesto también dedicárselo a mis hermanos pequeños Javier y María del Mar, pues son parte de mi ser y de la persona que soy ahora. Un pedazo importante de este final de mi formación se lo quiero dedicar a los que ya no están, a mis abuelos Rafael y Romualda y recientemente mi tío Manolo, porque aún faltando en mi vida, siguen muy presentes en mis recuerdos y en mi corazón. No quiero olvidarme del abuelo Pepe, que aún da guerra por donde pase, y este proyecto también es tuyo por el interés que siempre has mostrado en mí.

Y, para terminar, que no menos importante, dedicárselo a mis amigos y compañeros de carrera, ya que, en los momentos difíciles durante el desarrollo de este largo camino, eran capaces de sacarme una sonrisa.

A todos aquellos, les doy gracias por hacer posible llevar a cabo este proyecto.

Almadén, junio 2016



RESUMEN

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el diseño y construcción de un brazo robótico móvil con el objetivo de mejorar la eficiencia energética por medio de la limpieza automatizada de paneles solares de un parque fotovoltaico.

Para su realización se empleará el paquete de robótica Lego Mindstorms disponible en la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén. Una vez construido el robot se diseñará con el paquete de programación gráfica nativo de Lego Mindstorms.

Se creará un modelo a escala relativa de una pequeña parte de un supuesto parque fotovoltaico.

El uso de autómatas orientados a la limpieza solucionaría uno de los principales problemas a la hora de afrontar un gasto constante y caro en limpieza de los paneles solares, que llegados a cierto punto de suciedad disminuyen bastante su eficiencia en captación de energía solar.

Este proyecto unifica dos campos, primero el uso de tecnologías del campo de la robótica como área donde unificar disciplinas como la mecánica, la electrónica, la informática, la ingeniería de control y la física; y segundo, como solución para un problema concreto y su diseño y construcción del prototipo para su resolución.

Palabras clave: Brazo robótico, cinemática inversa, automatización, parque fotovoltaico, LEGO Mindstorms.



ABSTRACT

The aim of this Final Degree Project is to design and build a mobile robot arm able to improve energy efficiency by automatic cleaning of solar panels belonging to a solar power plant.

For its realization the Lego Mindstorms package available at EIMIA will be used. Once the robot has been developed, it will be designed with the native graphic programming package by Lego Mindstorms.

A relative scale model of a small part of a photovoltaic power plant will be created.

The use of robots designed to cleaning solves one of the most important problems when facing a constant and expensive spending of solar panels cleaning, since a high level of dirt and dust reduces energy efficiency of solar gain.

This Project unifies two fields, first the use of technologies of robotics area where subjects such as mechanics, electronics, computation control engineering and physics match; and second, as a solution to a specific problem and the design and construction of a prototype to resolve that problem.

Key words: Robotic arm, inverse kinematics, automatization, Photovoltaic Solar Plant, LEGO Mindstorms



*“En los momentos de crisis,
sólo la imaginación, es más
importante que el conocimiento”.*

-Albert Einstein.



Tabla de contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. OBJETIVOS.....	23
3. ESTADO DEL ARTE	25
3.1. Robótica.....	25
3.1.1. Introducción a la robótica.....	25
3.1.2. Tipos de robots.....	34
3.1.3. Componentes de un robot móvil.....	44
3.1.5. Comunicaciones	56
3.2. Limpieza de paneles solares	60
3.2.1. La problemática de la suciedad en los paneles solares.	60
3.2.2. Métodos de limpieza existentes en el mercado.	62
3.3. Cinemática inversa.....	70
3.3.1. Introducción.....	70
3.3.2. Análisis Cinemático.....	71
3.3.3. Cinemática inversa y animación 3D.....	72
3.3.4. Grados de libertad.....	73
3.3.5. Métodos de solución.....	74



3.4.	LEGO MINDSTORMS.....	89
3.4.1.	Modelo NXT.....	92
3.4.2.	Motores.....	94
3.4.3.	Sensores.....	95
3.4.4.	Comunicaciones.....	97
3.4.5.	Software.....	98
4.	BRAZO ROBÓTICO PARA LIMPIEZA DE PLACAS SOLARES.....	105
4.1	Introducción.....	105
4.2	Diseño del Brazo Robótico Móvil.....	106
4.2.1	Componentes del Robot.....	108
4.2.2.	Versiones del robot.....	115
4.3	Análisis matemático del movimiento del brazo robótico.	125
4.3.1.	Control de la cinemática y trayectorias de movimientos.	125
4.4	Software.....	147
4.3.1	Programación con NXT-G.....	148
5.	RESULTADOS.....	172
5.1	Test de suciedad para placa tipo A y tipo B a 60 mm de paso.	173
5.2	Test de suciedad para placa tipo A y tipo A con 60 mm de paso.....	178



5.3 Test de suciedad para placa tipo A y tipo B de 35 mm de paso.	184
5.4 Test de suciedad para placa tipo A y tipo A.	192
6. CONCLUSIONES.....	201
Bibliografía.....	203



Índice de ilustraciones.

Ilustración 1: Herón de Alejandría	26
Ilustración 2: Hydraulis de Ctesibios.....	27
Ilustración 3: Eolípilo de Herón	27
Ilustración 4: El Gallo de Estrasburgo.....	29
Ilustración 5: León Mecánico de Leonardo Da Vinci.....	29
Ilustración 6: Pato con aparato digestivo.....	30
Ilustración 7: El falso autómatas "El turco"	32
Ilustración 8: Fotografía del primer robot industrial, Unimate (1962).....	33
Ilustración 9: Robot manipulador	35
Ilustración 10: Robot Pingüino de aprendizaje.....	35
Ilustración 11: Robot industrial de 3º generación FANUC	36
Ilustración 12: iRobot Roomba, robot inteligente para la limpieza doméstica....	37
Ilustración 13: Grupo de robots inteligentes de la película Yo, robot (2004).	38
Ilustración 14: Robot rodante de 4 ruedas, 2+2.....	41
Ilustración 15: Robot rodante con 6 ruedas	41
Ilustración 16: Robot rodante con las ruedas en triciclo.....	41
Ilustración 17: Robot rodante con orugas	41
Ilustración 18: Androide Asimo de Honda.....	42
Ilustración 19: Robot zoomórfico multipedo.....	43
Ilustración 20: Robot zoomórfico nadador.....	43
Ilustración 21: Robot Zoomórfico Reptador.....	43
Ilustración 22: Estructura básica fabricada en aluminio para un robot cuadrúpedo.	44
Ilustración 23: Esquema de un controlador en bucle abierto.....	50
Ilustración 24: Esquema de un controlador en bucle cerrado.....	50
Ilustración 25: Distintas baterías existentes en el mercado.	51
Ilustración 26: Pilas alcalinas comunes.	53
Ilustración 27: Batería de Ni-Cd de seis elementos, 7.2V y 400mAh.....	53
Ilustración 28: Batería Ni-MH de 3 elementos (3.6V) elementos y 800mAh....	54
Ilustración 29: Batería de Li-Po, 3.7V, 150mAh.....	54
Ilustración 30: Batería de Li-ion, 3.7V, 1000mAh.....	55
Ilustración 31: Cargador universal Ultra Duo Plus 60, fabricado pro Graupner. .55	



Ilustración 32: Dos tipos de cables USB.	57
Ilustración 33: Sistema de limpieza con pértigas.	63
Ilustración 34: Método de limpieza por rodillo	64
Ilustración 35: Sistema de limpieza a presión.	65
Ilustración 36: Sistema de auto limpieza automático.	67
Ilustración 37: Robot de limpieza HighRise de IPC subiendo y limpiando pared de cristal.....	68
Ilustración 38: Robot limpiador de la compañía Solarbrush.	69
Ilustración 39: Modelo de Greenbotics como solución de la limpieza automatizada.	69
Ilustración 40: Modelo de robot Ecoopia E4	70
Ilustración 41: Relación entre cinemática directa y cinemática inversa.....	70
Ilustración 42: Espacio alcanzable por el robot.....	74
Ilustración 43: Relación entre lados y ángulos de un triángulo.....	76
Ilustración 44: Suma de ángulos en brazo de 3 grados de libertad.....	77
Ilustración 45: Robot de estructura planar con 3 GDL.....	78
Ilustración 46: Soluciones codo arriba y codo abajo.	79
Ilustración 47: Representación planar de robot de 3 GDL.	80
Ilustración 48: Descomposición de ejes de robot de 3GDL	82
Ilustración 49: Representación gráfica de robot de 6 GDL.	85
Ilustración 50: Garra superior del robot de 6 GDL.....	85
Ilustración 51: Sistemas del Robot de 6 GDL	87
Ilustración 52: Múltiples bloques de LEGO.....	90
Ilustración 53: Engranaje, junta Cardan, motor y cable de LEGO. (De Izq. a Der.)	91
Ilustración 54: Modelos de LEGO pertenecientes a la línea LEGO Technic.....	91
Ilustración 55: De Izq. a Der. Distintas versiones del ladrillo LEGO: RCX, NXT y EV3.....	92
Ilustración 56: Motor LEGO incluido en el paquete NXT	94
Ilustración 57; Ladrillo LEGO con todos sus sensores y servomotores conectados a la vez.	96
Ilustración 58: Sensores creados por desarrolladores externos a LEGO.....	97
Ilustración 59: Diagrama de bloques de comunicación entre PC-NXT.	98
Ilustración 60: Entorno de programación Labview	99



Ilustración 61: Software de programación gráfica NXT-G.	100
Ilustración 62: Versión más actual del software de programación de LEGO, MINDSTORMS EV3.	101
Ilustración 63: Paquete comercial de LEGO Mindstorms NXT 2.0.....	110
Ilustración 64: Partes del bloque NXT	111
Ilustración 65: Sensor de tacto de LEGO Mindstorms	112
Ilustración 66: Sensor de ultrasonidos de LEGO Mindstorms	113
Ilustración 67: Servomotor de Lego Mindstorms	114
Ilustración 68: Batería y cargador para el "brick" de LEGO Mindstorms.....	114
Ilustración 69: Robot limpiador con doble "brick" (de perfil).....	115
Ilustración 70: Robot limpiador con doble "brick" (desde abajo)	116
Ilustración 71: Robot limpiador con doble "brick" (frontal)	117
Ilustración 72: Robot con un solo "brick"	118
Ilustración 73: Robot con un solo "brick" sobre campo de pruebas.....	119
Ilustración 74: Robot limpiador de un solo "brick" con depósito y mopa.....	121
Ilustración 75: Diseño mejorado de la mopa de limpieza.....	121
Ilustración 76: Vista general del Robot limpiador definitivo después de pruebas.	122
Ilustración 77: Representacion 3D por Lego Digital Designer del modelo final de robot (vista frontal)	123
Ilustración 78: Representación 3D por Lego Digital Designer del modelo final de robot (vista trasera)	123
Ilustración 79: Esquema general del brazo robótico móvil.	124
Ilustración 80: Vista lateral de prototipo final ejecutando ensayo de limpieza usando tinta para señalar las zonas donde hay contacto en los barridos.....	126
Ilustración 81: Esquema de plano cartesiano con todos los elementos definidos.	127
Ilustración 82: Esquema del brazo con los ángulos de las extremidades,	130
Ilustración 83: Representación gráfica del punto 1 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa.	132
Ilustración 84: Representación gráfica del punto 2 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	133
Ilustración 85: Representación gráfica del punto 3 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	134



Ilustración 86: Representación gráfica del punto 4 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	135
Ilustración 87: Representación gráfica del punto 5 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	136
Ilustración 88: Representación gráfica del punto 6 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	137
Ilustración 89: Representación gráfica del punto 8 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	139
Ilustración 90: Representación 3D de la posición estándar de reposo del robot.	141
Ilustración 91: Posición estándar en reposo coincidente con el punto 1 del movimiento de recogida de líquido.	142
Ilustración 92: Posición del punto 2 del movimiento de recogida de líquido. ..	143
Ilustración 93: Posición final de los ángulos en el punto 3 de la recogida de líquido.	143
Ilustración 94: Representación de la posición estándar previa al desplazamiento hacia la parte superior de la placa.	145
Ilustración 95: Representación de la posición final en el desplazamiento hacia la parte superior de la placa.	145
Ilustración 96: Referencia a la ilustración 79 a modo de recuerdo sobre la estructura general del robot.	149
Ilustración 97: Diagrama de estados del robot durante el proceso de búsqueda de placa y limpieza en bucle.	152
Ilustración 98: Criterio de signos en ángulos y par motor para introducir en bloques de programación.	160
Ilustración 99: Parte a: movimiento de incremento 20° del servo B en el arranque.	161
Ilustración 100: Parte a: movimiento contrario al incremento de 20° para volver a la posición inicial.	161
Ilustración 101: Parte a: bucle de búsqueda horizontal de placa.	161
Ilustración 102: Parte B: movimiento de bajada para humedecer con líquido la esponja de la pala de limpieza.	162
Ilustración 103: Parte B: movimiento de subida a posición inicial una vez humedecido la esponja de la pala de limpieza.	163



Ilustración 104: Bucle de subida desde la posición inicial para colocarse en posición de barrido vertical.	163
Ilustración 105: Parte C: bucle de búsqueda vertical de parte superior de la placa.	164
Ilustración 106: Perfiles cuando el sensor de ultrasonidos mide y compara las profundidades de las placas.	165
Ilustración 107: Parte D: lectura de profundidad de la parte alta de la placa y comienzo del switch diferenciador.	165
Ilustración 108: Parte E: movimiento de subida para llevar la pala de limpieza a la parte superior de la placa.	167
Ilustración 109: Parte E: movimiento de barrido vertical coordinado entre articulaciones para pala tipo A.	167
Ilustración 110: Parte E: movimiento de retorno hacia la posición inicial después del barrido en placa tipo A.....	167
Ilustración 111: Parte E: movimiento de posicionamiento en la parte alta de la placa tipo B.	168
Ilustración 112: Parte E: movimiento coordinado entre las articulaciones para barrido vertical placa tipo B	168
Ilustración 113: Parte E: movimiento de retorno a la posición inicial de la placa tipo B.	169
Ilustración 114: Parte F: avance y fin de bucles y programa.....	169
Ilustración 115: Esquema de disposición de test 1.	173
Ilustración 116: Esquema de disposición de test 2.	179
Ilustración 117: Esquema de disposición de test 3.	185
Ilustración 118: Esquema de disposición de test 4.	192



Índice de tablas.

Tabla 1: Clasificación de los robots según su nivel de inteligencia (JIRA)	39
Tabla 2: Tipos de sensores para robots.....	47
Tabla 3: Ventajas e inconvenientes de los actuadores de los robots.	48
Tabla 4: Clasificación del ancho de banda de las versiones de Bluetooth más usadas.....	59
Tabla 5: Parámetros DH del robot de 3GDL.....	82
Tabla 6: Parámetros DH del robot de 6GDL.....	86
Tabla 7: Características del "brick" NXT de LEGO Mindstorms.	94
Tabla 8: Objetivos y funciones del brazo robótico limpiador.	107
Tabla 9: Configuración de los elementos de cada "brick" en el prototipo.	116
Tabla 10: Tabla de dimensiones finales del robot.	124
Tabla 11: Parámetros DH del brazo robot limpiador.....	126
Tabla 12: Mosaico de movimientos de limpieza en la placa realizados con LibreCAD.	131
Tabla 13: Constantes y variables del punto 1 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	132
Tabla 14: Constantes y variables del punto 2 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	133
Tabla 15: Constantes y variables del punto 3 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	134
Tabla 16: Constantes y variables del punto 4 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	135
Tabla 17: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 4 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	135
Tabla 18: Constantes y variables del punto5 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	136
Tabla 19: Constantes y variables del punto 6 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	137
Tabla 20: Constantes y variables del punto 7 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	138
Tabla 21: Constantes y variables del punto 8 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.....	139



Tabla 22: Coordenadas y ángulos resultantes mediante cinemática inversa.	140
Tabla 23: Constantes y variables del análisis cinemático del movimiento de recogida de líquido.	142
Tabla 24: Ángulos escogidos a adoptar por las articulaciones para que el brazo robot pueda introducirse en el recipiente.	142
Tabla 25: Constantes y variables del análisis cinemático del movimiento de aproximación a la parte superior de la placa.	144
Tabla 26: Ángulos que deben adoptar las articulaciones para efectuar el movimiento de aproximación a la parte superior de la placa.	144
Tabla 27: Cadena de secuencias realizadas por el programa del robot.	150
Tabla 28: Características de los dos tipos de placas a limpiar.	166
Tabla 29: Características de las placas del Test 1.	173
Tabla 30: Imágenes del Test 1.	177
Tabla 31: Resultados del Test 1.	178
Tabla 32: Características de las placas del Test 2.	179
Tabla 33: Imágenes del Test 2.	183
Tabla 34: Resultados del Test 2.	184
Tabla 35: Características de las placas del Test 3.	185
Tabla 36: Imágenes del Test 3.	190
Tabla 37: Resultados del Test.	191
Tabla 38: Características de las placas del Test 4.	192
Tabla 39: Imágenes del Test 4.	198
Tabla 40: Resultados del Test 4.	198



Índice de ecuaciones.

Ecuación 1: Criterio de Grübler-Kutzbach para calcular el grado de libertad.....	73
Ecuación 2: Teorema del seno	76
Ecuación 3: Teorema del coseno	76
Ecuación 4: Teorema de la tangente.	77
Ecuación 5: Suma de ángulos en brazo de 3 grados de libertad.	77
Ecuación 6: Obtención del ángulo de la primera articulación del robot con 3 GDL.	78
Ecuación 7: Obtención del ángulo de la tercera articulación del robot con 3 GDL.	78
Ecuación 8: Obtención del ángulo de la segunda articulación del robot con 3 GDL.	78
Ecuación 9: Matriz de orientación del sistema de coordenadas.	81
Ecuación 10: Obtención del ángulo θ_1 por Matriz de Transformación.	83
Ecuación 11: Obtención del ángulo θ_2 por Matriz de Transformación.	84
Ecuación 12: Conjunto de ángulos cuarto, quinto y sexto del robot de 6GDL. ..	89
Ecuación 13: Matrices de posición de las articulaciones del robot.	127
Ecuación 14: Producto de las matrices de las articulaciones en una matriz.	128
Ecuación 15: Simplificación de senos y cosenos.	128
Ecuación 16: Matriz resultante de la unión de las dos matrices de las articulaciones del robot.	128
Ecuación 17: Ecuaciones de posición de las coordenadas (X,Y)	128
Ecuación 18: Ecuaciones de posición de las coordenadas (X,Y) con los valores reales.	128
Ecuación 19: Expresión en forma vectorial del sistema de ecuaciones de posición.	129
Ecuación 20: Expresión en forma vectorial simplificada por identidades trigonométricas.	129
Ecuación 21: Obtención del ángulo θ_2 por medio de la matriz transformada.	129
Ecuación 22: Obtención del ángulo θ_1 por medio de metodos geométricos. ..	130
Ecuación 23: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 1 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	132



Ecuación 24: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 2 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	133
Ecuación 25: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 3 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	134
Ecuación 26: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 5 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	136
Ecuación 27: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 6 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	137
Ecuación 28: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 7 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	138
Ecuación 29: Representación gráfica del punto 7 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa	138
Ecuación 30: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 8 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.	139
Ecuación 31: Media aritmética de los valores de porcentaje cubierto de superficie de los test.	174



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la historia de la humanidad, el ser humano ha tratado de hacer su vida más fácil mediante el uso de herramientas y maquinaria, pasando de algo sencillo a cada vez algo más complejo. El progreso inherente a todo avance tecnológico abre abanicos de usos cada vez más amplios, introduciendo procesos de producción desde la agricultura básica hasta la más compleja de las industrias. Con el desarrollo industrial, el uso masivo de la informática y robótica en todas las áreas, la humanidad anda en camino de automatizar cada vez más procesos, librándonos de trabajos o bien peligrosos, o de condiciones difíciles, o incluso trabajos que un proceso automatizado realiza de manera más eficiente y/o más rápida.

La realización de este proyecto se basa en el uso de la robótica como herramienta para lograr solventar un problema con el que, mediante el diseño, la construcción y la programación de un robot que pueda realizar una tarea de limpieza automatizada, que en manos de un humano es más costosa, más lenta y de cierta manera innecesaria, desde el punto de vista de la automatización de un proceso repetitivo y necesario. Pues el realizar la limpieza de placas solares desde un robot solventaría la problemática de la suciedad y abarataría los costes de limpieza y aumentaría la eficiencia energética del huerto o planta solar.

Después de haber realizado una gran inversión en una instalación con paneles solares, interesará que estos paneles tengan el mejor rendimiento posible, ya que la eficiencia de una placa solar depende de la cantidad de energía de la radiación que puede captar. Es comprensible que, con una placa cubierta de suciedad proveniente de polvo, arena o deposiciones de ave, es peor que la de una placa completamente limpia y con su cristal protector completamente transparente.

Al igual que se estudia y determina la posición y el emplazamiento de los paneles solares, considerando las sombras que puede afectarlos, las orientaciones e inclinaciones, buscando la mejor configuración y posicionamiento para obtener el mejor rendimiento, también se debe de tener en cuenta las condiciones externas y cómo ellas pueden causar un incremento en la suciedad que pueden recibir los paneles. Para ello no podemos evitar



que la suciedad llegue a los paneles solares, es muy necesario programar tareas de mantenimiento y limpieza con el fin de que permanezcan en el mejor estado posible.

Por tanto, se puede considerar que la limpieza de placas solares es fundamental para preservar tanto la correcta funcionalidad como la durabilidad de las placas de manera que se obtenga un mejor rendimiento y, por lo tanto, resultados más exitosos. Parte de la eficacia de una instalación de energía solar, reside en la transparencia, y por lo tanto en la limpieza de los cristales que cubren las placas. La suciedad de las superficies de las placas solares puede reducir hasta en un 20% su productividad.

Se han realizado diferentes estudios destinados a analizar y cuantificar el impacto de la suciedad sobre el rendimiento de las placas solares. Todos los estudios coinciden en la necesidad de realizar una limpieza periódica de las placas solares para mejorar su rendimiento, pero no existe una opinión consensuada en relación a la frecuencia de limpieza. La frecuencia de la limpieza de las placas solares dependerá básicamente de su ubicación, es decir, necesitarán una mayor frecuencia de limpieza aquellas placas que estén situadas en zonas montañosas, con muchos árboles, cercanas a polígonos industriales o en lugares próximos a zonas de cultivo agrícola, por nombrar algunos ejemplos.

Recientemente se ha demostrado cómo el rendimiento de las placas solares disminuye progresivamente a medida que pasa el tiempo, como consecuencia del incremento de la suciedad acumulada en la superficie de las placas.

Los trabajos de limpieza de placas solares requieren un sistema de limpieza que sea rápido y eficaz, no corrosivo y que no dañe la superficie de las placas. Por ello la limpieza se realiza, entre otros métodos, con equipos de agua osmotizada químicamente pura conectados a unas pértigas de fibra de carbono con un cepillo que permite trabajar con todas las garantías sin ocasionar ningún daño al panel porque esta agua no contiene cal.

El objetivo de este proyecto es estudiar la posibilidad de sustituir estos trabajos de limpieza, en la mayor parte de ellos manuales, por un sistema autónomo formado por un



robot que se desplace por un campo solar y lleve incorporado un brazo robótico articulado.

Los robots son parte integrante de nuestro día a día y están compuestos por una serie de elementos *hardware* (estructura mecánica, un sistema de locomoción, un sistema sensorial externo y un ordenador) y un *software* que gestione el sistema sensorial y mueva la estructura mecánica para la realización de una determinada tarea. Actualmente se pide que una máquina sea capaz de tratar diferentes productos sin que sea necesaria la intervención humana, además de poder adaptarse a los nuevos requerimientos de calidad y seguridad. Así como recibir y procesar información exterior mediante su programación y sensores especializados.

Aunque pudiera parecer un proyecto más orientado al área de la informática y la robótica, es un intento de unificación de diversas áreas de la ingeniería, un compendio de múltiples disciplinas aunadas con un objetivo común, la resolución de un problema práctico sobre automatización de un proceso. Para su desarrollo no solo hay que valerse de conocimientos de informática, sino de otras muchas asignaturas cursadas para obtener el título de Grado en Ingeniería Eléctrica, en la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén.



CAPÍTULO 2: OBJETIVOS



2. OBJETIVOS

El desarrollo de este proyecto se ha enmarcado en el contexto del desarrollo de una solución práctica a un problema concreto que en este caso es la limpieza automatizada de paneles fotovoltaicos.

Este proyecto tiene como principal objetivo desarrollar un prototipo de robot móvil, totalmente autónomo capaz de automatizar una posible limpieza de un parque fotovoltaico de grandes dimensiones.

La consecución de este objetivo conlleva diseñar y montar un prototipo de robot con el hardware del paquete LEGO Mindstorms NXT 2.0, usando para ello los paquetes de desarrollo incluidos en el mismo. Creando a su vez un programa específico para el automatizado de los movimientos del brazo robot y los de su carro móvil.

Este objetivo principal se divide a su vez en los siguientes objetivos específicos:

1. Construir un robot con capacidad de movimiento, utilizando las piezas del paquete LEGO Mindstorms, uniendo dos procesos, el movimiento del brazo limpiador y el movimiento del carro móvil de manera paralela al bloque de paneles.
2. Estudio del modelo matemático de cinemática inversa y su aplicación para controlar el movimiento del brazo robótico.
3. Diseñar mediante el paquete de software nativo de LEGO Mindstorms el programa que automatice los movimientos del brazo limpiador y los movimientos de su carro móvil.
4. Reflejar documentalmente toda la información generada, para su utilización en posibles proyectos futuros y su posible aplicación en el ámbito profesional como solución práctica y posible.



CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE



3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Robótica.

3.1.1. Introducción a la robótica.

La Real Academia de la Lengua Española (RAE) define la palabra robótica como **“Técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.”** [1]

Esta definición, aunque clara y concisa, no es precisa en cuanto a aunar todas las materias y disciplinas que se engloban dentro de ella, ya que la robótica a su vez combina disciplinas como la mecánica, la informática, la electrónica, la ingeniería de control y la física. Todas estas son usadas para poder ocuparse del diseño, la construcción, la manufactura, control y aplicación de los robots. Y es en los robots, en su diseño y construcción, donde encontramos el fin para el que está destinado la robótica. ¿Y que es un robot?

Etimológicamente todo el mundo conoce que la palabra robot proviene de la palabra “robota” que significa trabajo forzado o trabajo duro o labor en checo y muchas lenguas eslavas. También es sobradamente conocido que se introdujo por primera vez en 1921 cuando se escuchó por primera vez la palabra robot, utilizada por el escritor checo *Karel Capek* en su obra de teatro R.U.R (Rossum’s Universal Robots). [2] Y sin duda el gran divulgador de los robots, la robótica y todo el lenguaje asociado en el siglo XX fue el autor de ciencia ficción Isaac Asimov, del cual heredamos las famosas tres leyes de la robótica:

- Un robot no hará daño a un ser humano o, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño.
- Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto si estas órdenes entrasen en conflicto con la 1ª Ley.
- Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la 1ª o la 2ª Ley. [3]



Pero aún que en el entorno de la ciencia ficción, el mundo de la robótica y sus derivados ha sido explotado e imaginado mucho antes de los propios avances científicos e industriales que vemos actualmente. La idea del hombre de delegar y construir máquinas y aparatos para realizar tareas por él, es mucho más antigua, y acompaña a la humanidad desde muchos cientos e incluso miles de años atrás.

Para hablar de los primeros robots hay que hablar de los **autómatas**, pues ya se ha visto que la palabra robot es una invención “moderna”, y en la antigüedad se hablaba de ingenios mecánicos, que realizaban una tarea de manera continua. Históricamente los primeros autómatas conocidos se usaban en templos religiosos en el antiguo Egipto donde figuras y estatuas movían las extremidades por medio de poleas y contrapesos, usados por los sacerdotes del templo. Este uso del autómatas como instrumento religioso se mantendrá así hasta la Grecia clásica, donde en esos tiempos de grandes pensadores e ideólogos, el uso de mecanismos usados para el entretenimiento adquiere un gran desarrollo.

Los primeros datos detallados acerca de la construcción de un autómatas aparecen en el siglo I. Esos nuevos conocimientos de usos recreativos, quedan reflejados en el primer tratado que se conoce sobre figura de los autómatas, de título “Autómatas” escrita por el ingeniero y matemático de tradición helenística Herón de Alejandría (10 d. C.-70 d. C.) donde explica la creación de mecanismos, muchos basados en los principios de Philon o Arquímedes, hechos en su mayor parte para entretenimiento y que imitaban el movimiento, tales como aves, que vuelan y beben, puertas automáticas, estatuas con un mecanismo para servir vino, todas producidas por el movimiento del agua, la gravedad sistemas de palancas.

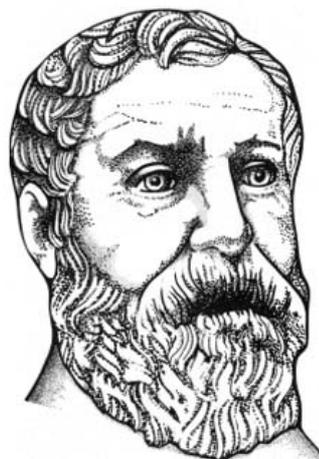


Ilustración 1: Herón de Alejandría

El mayor logro que le podemos atribuir es la invención de la primera máquina de vapor, llamada la eolípila, aelópilo o aelópila y la fuente de Herón. La Eolípila fue una máquina que se componía de una esfera hueca con dos tubos curvos, colocada sobre una caldera. Como el interior de la esfera estaba lleno de agua, esta se hacía hervir provocando que por los tubos escapara el vapor, haciendo girar la bola muy rápido. Es cómico saber



que Eolípila es una máquina sin un fin práctico en sí, se colocaba en templos y lugares públicos como distracción o juguete para divertir y entretener a los niños de la época. Otro ejemplo que sí presenta una tarea útil y un gran logro en la época es el dispensador de agua por monedas, o el de un molino de viento para accionar un órgano, la Hydraulis de Ctesibios.

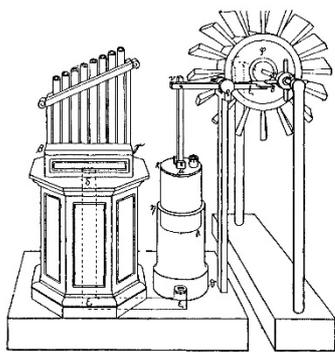


Ilustración 2: Hydraulis de Ctesibios



Ilustración 3: Eolípila de Herón

Sin lugar a dudas, el invento estrella de Herón, que le hizo famoso en su época, fue el mecanismo que abría y cerraba de manera automática las puertas del templo. Consistía en que al encender el sacerdote el fuego de la pira, el aire de un depósito situado bajo el altar se iba calentando gradualmente, y por efecto sifón el agua contenida en el depósito pasaba a un cubo sostenido por unas cadenas, y conforme más se iba llenando el cubo descendía arrastrando esas mismas y abriendo por un sistema de poleas y correas las puertas.

En el proseguir de la historia, cuando el Imperio Romano conquistó Grecia y absorbió todo su conocimiento, los avances de la escuela de Alejandría se extendieron con el Imperio Romano, que a su vez realizó muchos avances en el campo de la ingeniería civil y las grandes construcciones arquitectónicas, con el consiguiente avance en mecanismos y poleas para llevar tales edificaciones, avanzando sobre todo en el campo de la distribución de agua.

Destacar que el ser humano en la antigüedad no era falto en inventiva, ya que se ha visto que el grado de desarrollo e ingenio era brillante, aunque había que solucionar un gran problema técnico sobre todo por las imperfecciones constructivas de la época. Pero es digno merecedor de elogio el enorme legado de los griegos, y todo un hito de



cultura y tecnología. Habría que preguntarse qué hubiera podido suceder de haber inventado por aquel entonces una máquina de vapor operativa.[4][5]

Como en muchas otras áreas, al llegar tiempos posteriores a la Grecia y Roma clásica, se produce un parón tecnológico, una época oscura, y no es hasta el final de la Edad Media y comienzos del Renacimiento cuando volvemos a contar con un paso adelante en la creación de autómatas, el problema es que, en muchos de los casos, la falta de fuentes hace que muchos de los ingenios e inventos de la época hayan caído en el olvido.

Del **siglo XIII** han llegado referencias ligeramente bien documentadas, como el *Hombre de Hierro* del sacerdote, obispo y Doctor de la Iglesia **Alberto Magno** (nacido en Lauingen, Baviera, probablemente entre 1193 y 1206, y fallecido en Colonia, el 15 de noviembre de 1280). Fue maestro de Tomas de Aquino. Su *Hombre de Hierro* del que se cuenta que era capaz de andar, atendía la puerta del monasterio, avisaba si había llegado alguien, se encargaba de entretener a los visitantes y además podía hacer tareas caseras, obviamente la realidad del funcionamiento del mismo se desconoce, y caería al lugar de una buena historia mezclada con ficción y leyenda deformada por el paso del tiempo, ya que otra de sus creaciones, *Cabeza Parlante*, supuestamente destruida por su alumno alegando que esa creación estaba influenciada por el demonio. Por tanto, de sus creaciones únicamente quedan relatos de la época.

Coetáneo a Alberto Magno también se conoce otra Cabeza Parlante creada esta vez por el franciscano **Roger Bacon**. Bacon, junto al fraile *Bungay* tardó siete años en construir una cabeza de bronce que pudiese hablar. Lo hicieron leyendo ciertos libros antiguos que cayeron en sus manos, y al igual que con Alberto Magno la historia se mezcla con el mito y leyenda. También se cuenta que crearon un autómata de hierro que habló, pero al poco tiempo se autodestruyó. Respecto a la cabeza mecánica de Bacon estaba hecha de latón y podía responder a preguntas sobre el futuro, la de Alberto Magno con forma de mujer, respondía también sobre el futuro.

Otro ejemplo relevante de la época y es el autómata más antiguo que se conserva en la actualidad, el **Gallo de Estrasburgo**, creado en el año 1352. Formaba parte del



reloj de la torre situado en la catedral de esta misma ciudad, movía el pico y las alas al dar las horas.

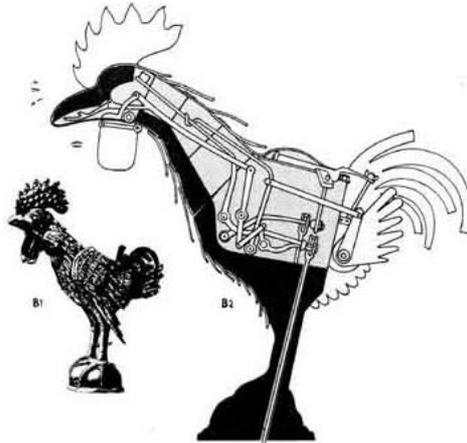


Ilustración 4: El Gallo de Estrasburgo.

Durante los siglos XV y XVI ya de lleno en el Renacimiento, las figuras más relevantes de esa época también realizaron sus propias aportaciones a la historia de los autómatas. No podía faltar en este pequeño viaje por la historia de los autómatas la aportación de uno de los más grandes inventores de todos los tiempos, Leonardo Da Vinci, que creó un autómata llamado el *León Mecánico*, fue construido en 1515 a petición del Rey Francisco I. Según los registros de la época, el autómata era capaz de desplazarse por sí mismo y, si se le golpeaba con un látigo su costado, las compuertas se abrían y dejaban caer lirios, que eran la flor simbólica de esa monarquía.



Ilustración 5: León Mecánico de Leonardo Da Vinci.



Más adelante en los siglos XVII y XVIII, ya en una época donde los avances en engranajes, por maestros artesanos relojeros, habían conseguido crear autómatas cuya misión era la de entretener a familias reales y demás gentes de las cortes. Los paseaban por ferias como atracciones para entretener al pueblo llano. Estos autómatas representaban figuras de animales y humanas en acciones cotidianas.

Jacques de Vaucanson (1709-1782) el cual en nuestros tiempos pasa desapercibido y es desconocido para el gran público (s. XVIII) este inventor, al igual que otros de la época, fue una celebridad entre la aristocracia y la incipiente comunidad científica de toda Europa, incluso Voltaire lo apodó como “el nuevo Prometeo”. Su autómata más famoso es el *pato con aparato digestivo*. El pato contaba con más de 400 partes móviles, y era capaz batir sus alas, beber agua, digerir grano e incluso defecar. Vaucanson también construyó otros autómatas, entre los que destaca uno previo al pato, *El Flautista*, un autómata con forma humana, simulando ser un pastor que tocaba la flauta. Se cuenta que podía ser capaz de interpretar 12 melodías distintas. Al igual que el posterior pato, se basaba en un complejo entramado de engranajes internos, en este caso realizaba el movimiento de todas sus partes por un mecanismo impulsado por aire. También construyó uno de los primeros telares automáticos.[6]

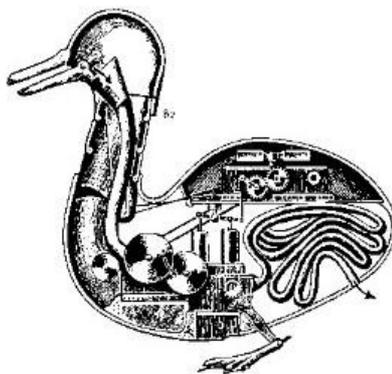


Ilustración 6: Pato con aparato digestivo

Ya a finales del siglo XVIII y principios del XIX, en plena Revolución Industrial, se podría decir que entramos en una nueva era completamente distinta en la cual toda la inventiva va destinada a cubrir y ampliar el conocimiento en dirección a la industria. Se desarrollaron variados ingenios mecánicos utilizados mayormente para la industria textil, se pueden encontrar entre estos hitos en la ingeniería los siguientes:



- La tejedora Jenny fue una máquina tejedora multi-bobina, inventada en 1764 por James Hargreaves.
- La *Spinning-mule* de Samuel Crompton, inventada el 1779 como un desarrollo de la tejedora Jenny.
- El primer telar mecánico, que funcionaba a vapor creado por Edward Cartwright en 1785.
- El telar de Jacquard, un telar mecánico también, creado por Joseph Marie Jacquard que constituyó con sus tarjetas perforadas los primeros precedentes históricos de las máquinas de control numérico, construido en 1801.

En el siglo XIX los autómatas dejaron de estar de moda, algo paradójico ya que en este siglo la revolución industrial podía haber concurrido en grandes avances significativos en la creación de autómatas, y con razón ya que el avance en producción industrial estaba avanzando enormemente. También es cierto que era muy difícil conseguir con una tecnología basada en el vapor unos autómatas antropomorfos, además que no hubieran servido de utilidad más allá de la que tuvieron antaño como entretenimiento y divertimento en ferias y exhibiciones. No obstante, se atisbaba que el sueño de muchos ingenieros era lograr autómatas que ayudasen en procesos industriales, pero era algo que aún se veía como muy lejano. También influyó en esa falta de interés en los autómatas por parte de la comunidad científica casos de fraudes como el de *El Turco*, famosísimo falso autómatas humanoide que “jugaba” al ajedrez, creado por Wolfgang Von Kempelen, cuando en realidad se escondía un experto jugador de ajedrez dentro y se cree que se manejaba con imanes y engranajes al supuesto autómatas.

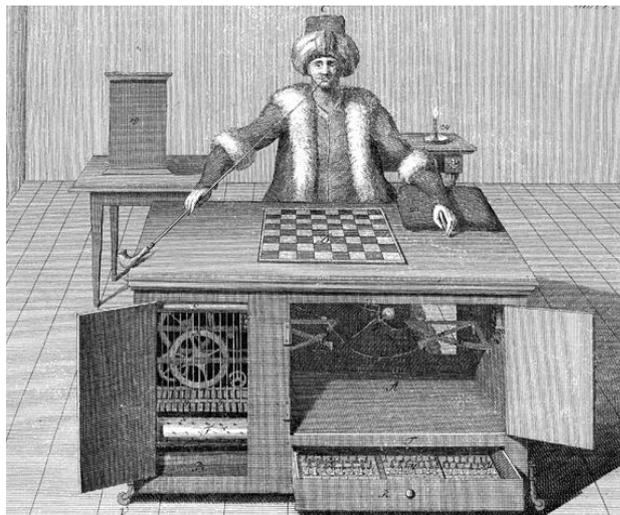


Ilustración 7: El falso autómatas "El turco"

A finales del XIX, la llegada de la electricidad sería el impulso necesario para aspirar a una nueva generación de autómatas más complejos y perfectos, la otra parte realmente importante sería para sorpresa de muchos la propia ficción que en la primera mitad del siglo XX propiciaría incluso la creación de la palabra robot.

En la década de 1890 el científico Nikola Tesla, uno de los más grandes inventores y visionario de la historia, creó entre muchos otros dispositivos, los motores de inducción, y ya construía vehículos controlados a distancia por radio, como el famoso barco controlado por radiocontrol. Nikola Tesla fue un visionario que ya soñaba y escribía sobre mecanismos inteligentes tan capaces como los humanos.

Durante la II Guerra Mundial, en el estudio del material radioactivo usado en el proyecto "Manhattan", usaban máquinas muy próximas a lo que hoy en día se entiende como robot tele operador, básicamente se componían de servomecanismo que repetía los movimientos hechos por los operadores a distancia mediante engranajes.

Al finalizar la II Guerra Mundial comenzarían los primeros trabajos que llevan a los robots industriales, que supondrían toda una nueva revolución, de la cual en principio no sería tomada muy en serio, pero que cambiaría el panorama de trabajo industrial en las cadenas de montaje. En 1954, el inventor estadounidense George C. Devol establecería las bases del robot industrial moderno, desarrollando un dispositivo de transferencia



programada articulada (según su propia definición); básicamente un brazo robótico programable para realizar tareas específicas.

Devol se unió a Joseph F. Engelberger en 1958 e iniciando una curiosa tradición en la inventiva e innovación estadounidense, crearon en el garaje Engelberger un robot al que llamaron Unimate. Incluía el computador que manejaba el manipulador, que en conjunto formaban un dispositivo que podía ser programado para la realización de tareas de manera automática. El primer Unimate fue instalado en 1962 en una planta de la General Motors en su fábrica de Trenton (Nueva Jersey). La máquina, con un peso de 1.800 kg, fue considerada el primer robot industrial de la historia y su función era la de levantar y apilar grandes piezas de metal caliente, para funciones de manipulación de piezas y ensamblaje.

Este punto se puede considerar como la inflexión o el inicio de la era de la robótica industrial, pues el uso y desarrollo de los robots programados, introdujo una nueva y potente herramienta de fabricación.

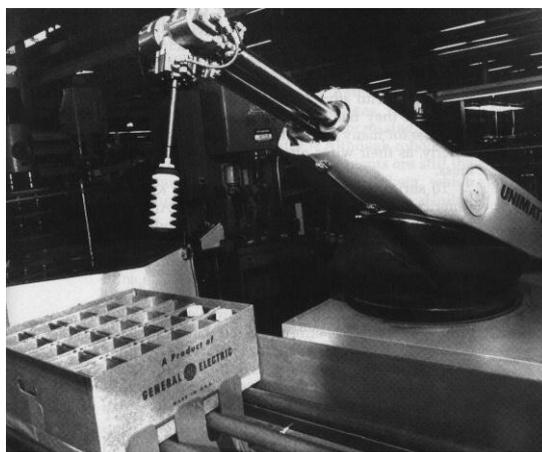


Ilustración 8: Fotografía del primer robot industrial, Unimate (1962)



3.1.2. Tipos de robots.

Es bastante complicado el establecer una relación de clasificación de los robots, pues distintas fuentes no se ponen de acuerdo en tanto a los parámetros en los que clasificarlos. Pueden clasificarse según su software en el controlador, el diseño mecánico y la capacidad de los sensores. También los robots se pueden clasificar de acuerdo a su aplicación, su arquitectura, su nivel de inteligencia, su generación, a su nivel de lenguaje de programación y a su nivel de control.

3.1.2.1. Clasificación por su generación.

Los robots pueden ser clasificados desde un punto de vista cronológico, agrupándolos por tiempo y similitudes funcionales acorde a la generación cronológica a la que pertenecen. Se determinarán por el orden histórico de desarrollo en la robótica y se puede diferenciar en cinco generaciones, que son normalmente asignadas a los robots industriales.

1ª Generación: Manipuladores.

Esta primera etapa podría considerarse que se inicia en los años 50, donde las máquinas únicamente cuentan con un sistema de control, el llamado lazo abierto, un sencillo sistema de control en el que no existe retroalimentación alguna por parte de algún sensor y realizan tareas previamente prefijadas. Con un marcado carácter multifunción pero prácticamente con un sistema mecánico, con un sistema de control sencillo y que permite manejar el movimiento de los siguientes modos:

- **Manual:** cuando es el operario quien controla o maneja en primera persona la tarea a modo de tele orden del manipulador.
- **De secuencia fija:** cuando es una tarea repetida constantemente, de forma invariable, un proceso o secuencias de trabajo previamente preparadas.
- **De secuencia variable:** entendemos por este tipo un robot programable con distintos tipos de programas prefijados que pueden intercambiar ciclos de trabajo, previa introducción de ellos.



Estos primeros robots tuvieron una gran aceptación en cadenas de montaje sobretodo en el campo de la automoción, ya que eran y son capaces de realizar muchas operaciones básicas realizadas de forma óptima. Pero claro está que estos dispositivos son utilizados generalmente cuando las funciones de trabajo son sencillas y repetitivas.



Ilustración 9: Robot manipulador

2ª Generación: Robots de repetición o aprendizaje.

La segunda generación se desarrolla hasta los años 80, este tipo de robots son un poco más conscientes de la información de su entorno que su generación anterior, disponen de sistemas de control, en este caso de lazo cerrado, y es por medio de sensores que adquieren esa información del entorno capaz de modificar y retroalimentar el proceso que están realizando. Estos manipuladores ya son capaces de almacenar la información para poder tomar decisiones en base a esos datos almacenados recogidos por los sensores.



Ilustración 10: Robot Pingüino de aprendizaje.



3ª Generación: Robots con control por computador.

A comienzos de los años 80, la capacidad de computación y la introducción del ordenador en casi todos los ámbitos industriales e incluso a niveles domésticos, promueven una nueva manera de concebir los procesos automatizados, ya que la capacidad de procesamiento de la información se simplifica y abarata cada vez más. Durante los años 80 y 90, los robots cuentan con controladores ahora manejan la información y datos de los sensores, y se introduce la programación informática para el procesado y manejo de estos robots, ya que ahora serán capaces de realizar las instrucciones programadas con dichos sistemas.



Ilustración 11: Robot industrial de 3ª generación FANUC

Igualmente, los robots siguen usando un control del tipo lazo cerrado, pero mucho más conscientes de su entorno y con una mayor capacidad de proceso para adaptarse al mismo. Ahora los manipuladores o sistemas mecánicos pueden ser multifuncionales, controlados por un ordenador, que con el desarrollo del microchip cada vez va siendo más pequeño. Por tanto, al igual que en equipos informáticos, ahora tendremos que dividir, por un lado, la programación del robot y denominarla como el *software* y el resto de componentes físicos que componen el equipo del robot como el *hardware*.

Este tipo de robots, sobretodo en el campo industrial, son los que más se han impuesto en el mercado, pudiendo facilitar, mejorar y abaratar costes de fabricación en todo tipo de industrias, ya que ofrecen múltiples ventajas, y aun reduciendo el número de personal necesaria para cada uno de los campos donde se introduce, se establece una



demanda de personal cualificado, capaz de desarrollar programas de control que permitan el manejo, del robot, como a su vez, personal para manejarlos y ejecutar el mantenimiento de estos equipos.

4ª Generación: Robots Inteligentes.

A partir de los años 90, ya asentado el uso industrial de los robots de la anterior generación, y con la industria informática creciendo exponencialmente con vistas a llevar un PC (personal computer) a cada hogar, esta generación se visualiza como el siguiente paso en la robótica. Este es incorporar a los mecanismos ya sobradamente estudiados de movimientos y sensores de una inteligencia capaz de manejar toda la información y tener la capacidad “autónoma” de manejar y tomar decisiones mediante una inteligencia artificial. Esta generación también tiene cada vez sensores mucho más sofisticados que mandan información al controlador y la analizan mediante estrategias complejas de control.

Debido a las nuevas tecnologías, nuevos lenguajes de programación, microprocesadores cada vez más potentes, estos robots buscan perfeccionar estrategias, se adaptan y aprenden de su entorno, realizando tareas pre programadas pero usadas en función de los datos que los sensores les aportan, pero usando conocimiento difuso y procesamiento dirigido para mejorar el desempeño del sistema. En cierto modo los sensores tienen la tarea de supervisar el ambiente global, registrándolo todo en la



Ilustración 12: iRobot Roomba, robot inteligente para la limpieza doméstica

memoria, como por ejemplo los efectos de sus acciones, para así crear un modelo del mundo e información auxiliar para la determinación de tareas y metas.

Actualmente podemos encontrar este tipo de robots ya introducidos incluso en labores domésticas, como los famosos robots de limpieza de la compañía Roomba, que son capaces de trazar mapas de la vivienda para repartir las labores de limpieza del suelo, siendo capaces de



evitar obstáculos y de recargarse automáticamente cuando detectan que están faltos de energía.

5ª Generación: Los robots del futuro. La inteligencia artificial.

Esta generación actualmente se encuentra, se podría decir, en desarrollo. Pues aun perfeccionando tanto las tecnologías electromecánicas como la inteligencia artificial de la generación anterior aún no se ha logrado llegar al robot inteligente definitivo. Se espera que los nuevos avances en computación, en nanotecnología, impresión 3D, nuevos modelos conductuales y en muchas más disciplinas, puedan lograr la auténtica repercusión de los robots en todos los ámbitos de la vida cotidiana. Desde las tareas domésticas y familiares, aplicaciones en el campo de la asistencia personal y sanitaria, aplicaciones en medicina, cirugía e implantes físicos robóticos para la mejora de funciones deterioradas, en el sector militar, en la exploración espacial, agricultura inteligente, etc.

El campo de aplicación de nuevos dispositivos es tan amplio que al igual que a comienzos y mediados del siglo XX, es la inventiva y el desarrollo de la imaginación de los futuros diseñadores e inventores de los que dependerá explotar y convertir en realidad este futuro que está al alcance de los dedos. Estos robots inicialmente comenzaron como investigación y desarrollo en universidades y centros de investigación, ya que era una forma económica y viable de experimentar con múltiples tareas robóticas, hoy en día se pueden encontrar en múltiples centros docentes, e incluso de primaria y secundaria, ya que existen paquetes educativos de robótica muy accesibles y ayudan positivamente a fomentar el interés de sus alumnos por la ciencia y la tecnología y los resultados son como se ha podido observar altamente satisfactorios.[7][8]

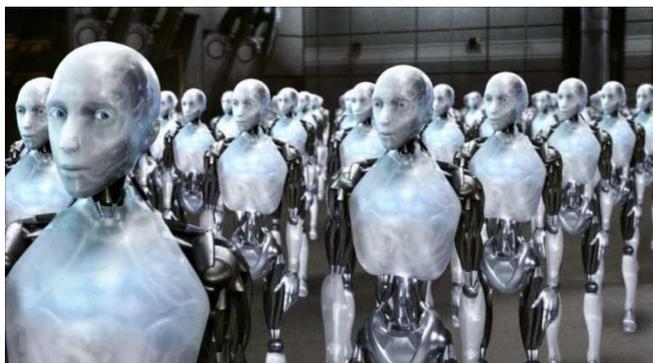


Ilustración 13: Grupo de robots inteligentes de la película Yo, robot (2004).



3.1.2.2. Clasificación de los robots según su nivel de inteligencia

La Asociación de Robots Industriales de Japón, JIRA en sus siglas en inglés, tienen una clasificación propia para los robots. Consta de seis clases diferenciadas basadas en el nivel de inteligencia del robot, son las siguiente:

Clase 1	Dispositivos de manejo manual, controlados por una persona.
Clase 2	Robots de secuencia arreglada.
Clase 3	Robots de secuencia variable, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
Clase 4	Robots regeneradores, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
Clase 5	Robots de control numérico, donde el operador alimenta la programación del movimiento, hasta que se enseñe manualmente la tarea.
Clase 6	Robots inteligentes, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

Tabla 1: Clasificación de los robots según su nivel de inteligencia (JIRA)

3.1.2.3. Clasificación de robots según su estructura.

Se ha visto dos tipos de clasificaciones atendiendo a la generación del robot y al grado de inteligencia, pero más allá de este aspecto práctico hay otro hecho característico de los robots modernos que les dotan de una mayor libertad y de gran utilidad. Esta característica no es otra que la estructura, ya que la flexibilidad funcional de un robot a través del cambio de su configuración describe en gran medida al propio robot. La subdivisión de los robots, en base en su arquitectura, se hace en los siguientes grupos:



poli articulados, móviles, androides, zoomórficos e híbridos. Por tanto, podemos clasificarlos de la siguiente manera:

1. Poli articulados.

En este grupo se encuentran los robots que ya se han mencionado antes, tales como los de primera y segunda generación, que aun que puedan tener una diversa forma y configuración, su característica común es la de ser básicamente sedentarios (como los brazos robóticos de las cadenas de montaje) y estar estructurados para mover sus elementos en un espacio limitado y determinado y con un pequeño número de grados de libertad. Básicamente los integrantes de este grupo son los manipuladores, los tan frecuentemente usados los robots industriales.

2. Móviles.

En contrapartida a los del primer grupo, los robots móviles son robots con gran capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas y dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Suelen ser guiados en sus desplazamientos por sensores. Este grupo al ser muy amplio puede tener una subclasificación acorde a los mecanismos usados para su desplazamiento, podríamos incluir en este grupo al resto de clasificaciones restantes, pues bien es cierto que igualmente tienen movilidad y robot bípedos y zoomórficos podrían ser incluidos en los robots móviles, pero se centrará este grupo únicamente en el marco de los robots rodantes.

Robots rodantes.

Este tipo de robot se desplaza haciendo el uso de ruedas como su nombre indica. Pueden ser montadas en configuración dos y dos, es decir, dos ruedas delanteras y otro par de ruedas traseras, siendo al igual que en los automóviles un par de ellas las ruedas que presentan tracción con dos direcciones, hacia adelante y hacia atrás.



Ilustración 14: Robot rodante de 4 ruedas, 2+2

También es posible encontrar otro tipo de distribuciones de ruedas. Pueden existir las ruedas montadas en modo triciclo, o incluso con seis ruedas. En cada uno de los casos al igual que con cuatro ruedas, siempre habrá al menos un par de ruedas que sean con tracción, pudiendo ser el resto para cumplir la función de la dirección.

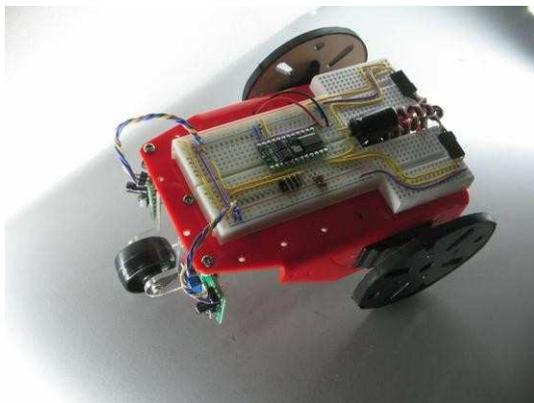


Ilustración 16: Robot rodante con las ruedas en triciclo.



Ilustración 15: Robot rodante con 6 ruedas

También hay que incluir a los robots con orugas, en el que un mecanismo de oruga similar al de los tanques sustituye a las ruedas como mecanismo tractor. La dirección en este tipo se consigue parando una de las orugas o haciéndolas girar en dirección opuesta.



Ilustración 17: Robot rodante con orugas



3. Androides.

Un androide es un robot que diseñado para reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemático del ser humano. En la actualidad, los androides son todavía dispositivos en una fase temprana de desarrollo, ya que aún no tienen una utilidad práctica, y están destinados al estudio y experimentación. Posiblemente el aspecto más significativo en cuanto a desplazamiento y movilidad de los androides es su locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener el equilibrio y caminar correctamente. Existen ya modelos capaces de caminar bien sobre suelos planos y subir escaleras.



Ilustración 18: Androide Asimo de Honda.

4. Zoomórficos.

Otra clase interesante de robot serían los zoomórficos, que considerados en sentido no restrictivo podrían incluir también a los androides, su principal característica es que su movimiento y sus sistemas de locomoción están diseñados para imitar el de



diversos seres vivos. Estos movimientos que podríamos diferenciar entre caminadores y no caminadores, y una vez excluidos los androides y su movimiento bípedo, podríamos entender como caminador al movimiento múltipedo, como el que pudiera imitar a seres de cuatro o más patas motoras. Sus movimientos son diseñados de tal forma para poder tener una movilidad más acorde a terrenos de difícil acceso y en los cuales un movimiento multipedo sería el más eficiente.



Ilustración 19: Robot zoomórfico multipedo

Los robots zoomórficos caminadores múltipedos por tanto están siendo objeto de experimentos en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos terrenos, pilotados o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas.



Ilustración 20: Robot Zoomórfico Reptador.



Ilustración 21: Robot zoomórfico nadador.



Otra clase de robot zoomórfico serían los no caminadores, en este grupo se incluyen los robots reptadores, nadadores y voladores, no hay mucho en lo que ahondar, ya que estos diseños no están muy desarrollados y tienen aún menos aplicaciones actuales aun si cabe con respecto a los robots zoomórficos múltipedo.

3.1.3. Componentes de un robot móvil.

Vistos los principales tipos de robots móviles que se construyen en la actualidad, a continuación, se detallan las partes constituyentes de los robots, tanto estructurales, como mecánicas y electrónicas.

3.1.3.1. Estructura de un robot.

La estructura es la base física que ejerce como soporte que denota la forma y la funcionalidad del robot. Puede ser una mezcla de partes fijas y móviles, creadas con diversos materiales, desde plásticos y metales ligeros hasta aleaciones más resistentes y ligeras como la fibra de carbono. También debe ser incluida como integrante de la estructura la parte motriz del robot, que suele ir embebida en la propia estructura, ya que normalmente las partes móviles forman parte de la misma. La estructura a su vez sirve de sujeción para toda la circuitería electrónica, los sensores y demás actuadores.



Ilustración 22: Estructura básica fabricada en aluminio para un robot cuadrúpedo.

La estructura también el medio en el que se va a poder desenvolver el robot, así como el marco de actividades que podrá ser capaz de realizar. También actúa como elemento protector de las partes más sensibles del mismo, protegiendo la electrónica interna de golpes, agua, polvo y demás agentes externos. protege partes sensibles de la electrónica de golpes, polvo, agua y



otros agentes externos. La estructura debe ser realizada como un buen equilibrio entre ligereza y rigidez. [9][10]

3.1.3.2. Sensores.

El robot debe ser capaz de interactuar con su entorno, y sobre todo si es móvil, debe ser capaz de adaptar sus movimientos y sus acciones de acuerdo con el estado y las características del medio que le rodea.

Para conocer e interactuar con el entorno, los seres vivos tienen un sistema sensorial. Para poder dotar a los robots de un sistema similar se han desarrollado multitud de sensores para lograr esta capacidad de adaptación al entorno. El uso de sensores les permite saber dónde están, cómo es el lugar en el que están, a qué condiciones físicas de temperatura a la que se encuentran, dónde están los objetos con los que interactuar, sus parámetros físicos, etc.

Para esto se utilizan distintos tipos de sensores, que ahora se van a detallar en mayor o menor medida. Pueden tener un rango de complejidad que varía desde los medianamente simples a otros con un alto grado de complejidad en su *hardware* y más aún de complejidad de programación.

Los sensores por tanto son los encargados de adquirir la información del entorno, y la transmiten a la unidad de control del robot. Ésta a su vez, según su programación, enviará la información ya procesada a los actuadores para realizar, o no, las tareas acordadas con su programación.

Básicamente un sensor funciona con algún elemento sensible a una magnitud física y el cómo transformarla en un valor electrónico para que sea posible introducir al circuito de control, de modo que el robot sea capaz de cuantificarla y reaccionar en consecuencia. Por tanto, podemos establecer una lista y una relación de los sensores con respecto a su magnitud física.



Magnitud física	Tipo de sensor	
Luz	Elementos sensibles	LDRs o Fotorresistores (resistores variables por la incidencia de la luz) Fotodiodos Fotoceldas o celdas fotovoltaicas Cámaras de vídeo Fototransistores CCD
	Módulos integrados	Reflectivo De ranura
Sonido	Elementos sensibles	Micrófonos Captadores piezoeléctricos
	Módulos integrados	Rangers (medidores de distancia) ultrasónicos
Temperatura	Termistores Diodos RTDs (Termorresistencias) Termopares, Termocuplas Circuitos integrados Piro sensores (a distancia)	
Humedad	Sensores capacitivos Sensores resistivos Módulos integrados	
Presión y/o fuerza	Elementos sensibles	Sensores de fuerza Sensores de presión Microinterruptores
	Sensores	Sensores de contacto Piel robótica



Gravedad	Acelerómetros, sensores de vibración Giróscopos Sensores pendulares (Inclinómetros) Contactos de mercurio
Proximidad	Sensores capacitivos Sensores inductivos
Magnetismo	Interruptores magnéticos Efecto Hall Brújulas electrónicas
Ubicación	GPS Receptores de radiobalizas
Distancia	Medidores de distancia ultrasónicos Medidores de distancia por haz infrarrojo
Velocidad	Tacómetros Codificadores (encoders)

Tabla 2: Tipos de sensores para robots.

3.1.3.3. Actuadores.

Los actuadores tienen como función generar el movimiento de las articulaciones del robot. Se puede distinguir tres grandes grupos, clasificados según del tipo de energía que utilicen:

- Hidráulicos.
- Neumáticos.
- Eléctricos.

En la siguiente tabla vamos a describir resumidamente las características, ventajas y desventajas de los distintos tipos de actuadores: [11]

	Neumáticos	Hidráulicos	Eléctricos
Energía	Aire a presión (5-10 bar)	Aceite mineral (50-100 bar)	Corriente eléctrica



Opciones	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindros - Motor de paletas - Motor de pistón 	<ul style="list-style-type: none"> - Cilindros - Motor de paletas - Motor de pistones axiales 	<ul style="list-style-type: none"> - Corriente continua - Corriente alterna - Motor paso a paso - Servomotor
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Baratos - Rápidos - Sencillos - Robustos 	<ul style="list-style-type: none"> - Rápidos - Alta relación potencia-peso - Auto lubricantes - Alta capacidad de carga - Estabilidad frente a cargas estáticas 	<ul style="list-style-type: none"> - Precisos - Fiables - Fácil control - Sencilla instalación - Silenciosos
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Dificultad de control continuo - Instalación especial (compresor, filtros) Ruidoso 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil mantenimiento - Instalación especial (filtros, eliminación aire) - Frecuentes fugas - Caros 	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia limitada

Tabla 3: Ventajas e inconvenientes de los actuadores de los robots.

3.1.3.4. Sistemas de control.

Entendemos como un sistema de control a la combinación de componentes que actúan juntos para realizar el control de un proceso. El control de un robot actualmente se realiza por medio de un ordenador industrial, también conocido como unidad de control o controlador. El controlador se ocupa del almacenaje y procesado de la información de los diversos componentes del robot industrial.

Este control se puede realizar de dos maneras, si se hace un control durante todo el tiempo, se habla de un control de forma continua, en cambio, si se realiza cada cierto tiempo sería un control de forma discreta. Si el sistema es continuo, el control se realiza con elementos continuos, ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia.



Dominio del tiempo.

A sabiendas de que el tiempo es una variable independiente empleada en la mayoría de sistemas de control, es interesante evaluar las respuestas del estado y la salida con respecto al tiempo. La respuesta en el tiempo se divide normalmente en la respuesta transitoria y la respuesta en estado permanente.

Dominio de la frecuencia

La importancia de analizar la respuesta de los sistemas de control en el dominio de la frecuencia radica en el hecho de que en los sistemas de comunicaciones la respuesta en frecuencia es de mayor importancia, ya que la mayoría de las señales a ser procesadas son de tipo senoidal. El estudio de respuesta en frecuencia nos permitirá proyectar el desempeño del dominio del tiempo de un sistema.

En oposición al sistema continuo, cuando el sistema es discreto, el control se realiza con elementos digitales como una computadora industrial, un ordenador o cualquier procesador digital. Por lo que para trabajar con los datos lo primero que hay que realizar es la digitalización de los valores antes de su procesamiento y volver a convertirlos tras el procesamiento. Actualmente casi todos los sistemas de control son digitales, y más específicamente en el control de los robots, se realizan con sistemas discretos de lazo cerrado, controlado por un ordenador. El ordenador procesa la información de los sensores y activa los actuadores en intervalos del orden de milisegundos. [12]

De todas formas, detallaremos los dos tipos de sistemas, sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

- Sistemas en bucle abierto: son aquellos en los que la salida no tiene influencia sobre la señal de entrada.

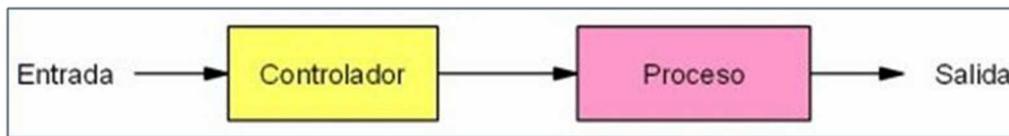


Ilustración 23: Esquema de un controlador en bucle abierto

- Sistemas en bucle cerrado: son aquellos en los que la salida influye sobre la señal de entrada.

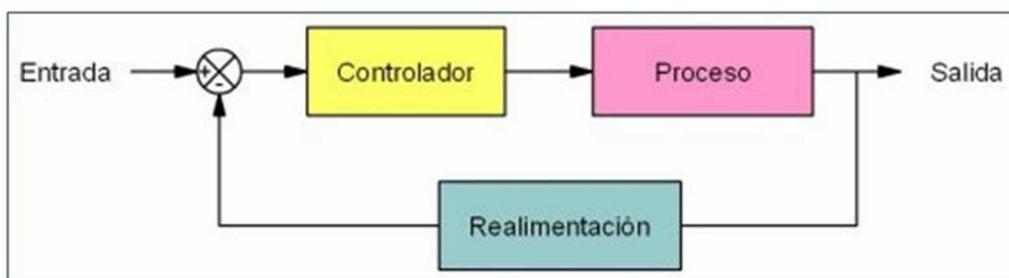


Ilustración 24: Esquema de un controlador en bucle cerrado.

3.1.3.5. Alimentación.

Puesto que la mayoría de robots que de los que se está haciendo alusión en este trabajo fin de grado son autónomos y no están en una posición fija sino móvil, es una parte fundamental de los componentes del robot, la fuente de alimentación. Para garantizar la autonomía del robot, dado que al ser móvil generalmente no va a poder tener energía externa, solo contará con la carga de energía interna que pueda el mismo transportar, exceptuando casos de alimentación externa por placas solares en la estructura del robot como en ciertos robots móviles. Prácticamente se descartará el uso de otras fuentes de alimentación con la pila de Hidrógeno, baterías inerciales y bombonas de aire comprimido (para describir con más amplitud la fuente principal de energía de la robótica).

La principal fuente de alimentación de un robot móvil es la batería eléctrica, de la que se puede diferenciar en dos grandes grupos, ya sean pilas alcalinas o baterías recargables. Cada tipo de batería, en cualquiera de sus modalidades, se adaptará mejor o peor a nuestro robot según su aplicación y uso.



Ilustración 25: Distintas baterías existentes en el mercado.

Para elegir la batería se deben tener en cuenta ciertos aspectos:

Tensión nominal

El primer parámetro a tener en cuenta es el voltaje de alimentación:

- **Pilas alcalinas: 1.5V** nominales por elemento.
- **Baterías de níquel cadmio (Ni-Cd): 1.2V.** Descarga 1.1V y carga 1.4V nominales por elemento.
- **Baterías níquel metal hidruro (Ni-MH): 1.2V.** Descarga 1.1V y carga 1.4V nominales por elemento.
- **Baterías de polímeros de litio (Li-Po): 3.7V.** Descarga 3.2V y carga 4.2V nominales por elemento.
- **Baterías de Litio Hierro (LiFe-Po): 3.2V.** Descarga 3V y carga 3.6V nominales por elemento.

Es aconsejable alimentar el robot a la tensión nominal que sus elementos eléctricos internos requieren, siendo esta tensión nominal la que marque la disposición de las baterías para alcanzar dicha tensión.



Capacidad de la batería

La capacidad de la batería es un parámetro muy importante, ya que está directamente relacionada con la duración de la misma hasta que se agote y necesite volver a cargar. La capacidad de una batería normalmente se **expresa en mAh (miliamperio-hora)**. Tomando por ejemplo una batería de 1000 mAh, esta podrá proporcionar una intensidad de 1000mA durante una hora aproximadamente antes de agotarse. El consumo requerido por el sistema alimentado es inversamente proporcional al tiempo que durará la carga de la batería, si el consumo es menor, durará más tiempo, de manera contraria si se proporciona más intensidad durará menos tiempo.

La **duración de una batería a grandes rasgos depende de dos aspectos:**

- **La capacidad** de la batería (expresada en mAh)
- **El consumo** del circuito que alimenta la batería

Peso

No hay que tomar a la ligera el peso de la batería, y concretamente la relación entre tamaño y peso. Ya que a la hora de diseñar y establecer la estructura del robot hay que tener en cuenta tanto la ubicación de las baterías como el cómo estas pueden afectar a las condiciones de equilibrio y desplazamiento que pudiera tener el robot, y es aconsejable elegir, en caso de que así se pueda, las baterías más ligeras que cumplan con la alimentación requerida.

Vistos los aspectos más importantes de las baterías, se va a analizar las **ventajas e inconvenientes** de los tipos de alimentación más frecuentes y significativos:

- **Pilas alcalinas:** Las más frecuentes en el uso doméstico, normalmente son desechables, aunque existen modelos recargables con cargador. Hay que desecharlas tras su utilización. Se utilizan en dispositivos de bajo consumo. Obligan a usar porta pilas al no poder ser soldadas sin dañarlas.



Ilustración 26: Pilas alcalinas comunes.

- **Baterías níquel cadmio (Ni-Cd):** Con una vida útil relativamente baja y facilidad al desgaste. Estas baterías tienen un alto “efecto memoria”¹. Se deterioran completamente en largos periodos de almacenamiento. Su auto descarga es del 10% en las primeras 24 horas, y después sobre un 2,5% al día, disminuyendo con el tiempo. Se pueden unir elementos entre sí mediante soldadura. **Prohibidas por la UE todo tipo de baterías que contengan cadmio, que es altamente contaminante.**



Ilustración 27: Batería de Ni-Cd de seis elementos, 7.2V y 400mAh.

- **Baterías metal hidruro (Ni-MH):** Estas baterías tienen menos efecto memoria que las anteriores, y se soluciona mediante dos o tres ciclos de descarga y carga si la batería es nueva y su tensión no ha bajado de 0,9 V (descarga profunda). Tienen

¹ El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías con cargas incompletas. Se produce en cierto tipo de baterías cuando se carga una batería sin haber sido descargada del todo, este suceso sobre todo afecta a las baterías de Níquel-Cadmio.



casi el doble de vida útil que las de Ni-Cd, pero una autodescarga mayor. También son más sensibles al calor.



Ilustración 28: Batería Ni-MH de 3 elementos (3.6V) elementos y 800mAh

- **Baterías Li-Po:** No tienen efecto memoria. Pesan del 20% al 35% menos que las de Ni-MH o de Ni-Cd. No tienen efecto auto descarga. El almacenamiento puede ser prolongado siempre que se mantengan a una tensión del 75% de la nominal. Su mayor problema son los sobrecalentamientos y la posibilidad de explotar por dichos problemas.



Ilustración 29: Batería de Li-Po, 3.7V, 150mAh.

- **Baterías Li-ion:** Actualmente con la irrupción de los teléfonos móvil y más concretamente *Smartphone*, ha proliferado el uso de estas baterías por encima de las demás para estos usos electrónicos. Son muy ligeras y con poco espesor y prácticamente no tienen efecto memoria. Tienen una larga vida y muy baja tasa de auto descarga. En contra se podría decir que son bastante costosas y que también pueden explotar por problemas de sobrecalentamiento.



Ilustración 30: Batería de Li-ion, 3.7V, 1000mAh.

Cargadores

La elección de un buen cargador es casi tan importante como la de la propia batería, ya que cargar una batería es un proceso complicado, y no todos los cargadores lo hacen igual de bien. Además, cada tipo de batería ha de cargarse con su cargador específico debido a que sus intensidades y curvas de carga son diferentes.

En los últimos años han ido apareciendo cargadores universales a buenos precios que sirven para cargar la mayoría de modelos de baterías, además de realizar el equilibrado.



Ilustración 31: Cargador universal Ultra Duo Plus 60, fabricado pro Graupner.

Por ejemplo, el cargador de la imagen es capaz de cargar y equilibrar baterías Ni-Cd, Ni-MH, Li-Po o Li-Fe de hasta 7 elementos. Además, puede cargar dos baterías al mismo tiempo, como se observa en la imagen.[13]



3.1.5. Comunicaciones

A la hora de realizar un correcto intercambio de datos entre el usuario y el robot, es importante contar con un canal adecuado de comunicación y obtención de datos con el programa de control de manejo del robot. Esta comunicación puede ser de doble sentido, es decir, poder mandar ordenes, modificaciones o puesta en marcha de tareas desde nuestro controlador al robot, y en el sentido contrario, obtener información desde el robot hacia nuestro ordenador o controlador para recabar datos sobre sensores, memoria o cualquier otra propiedad o información del equipo que queramos obtener. Estas comunicaciones pueden ser del tipo cableada o por el contrario inalámbrica, siendo esta ultima la que más ventajas nos ofrece al poder ser a distancia y sin tener que estar conectados físicamente al dispositivo.

3.1.5.1. USB

El Universal Serial Bus, más conocido comúnmente USB, es un puerto de comunicación de periféricos a un ordenador. Fue creado en 1996 en desarrollo común por empresas como IBM, Microsoft e Intel entre otras con la finalidad de sustituir y eliminar los puertos en paralelo y serial y para aumentar la velocidad de transmisión de datos de estos últimos. También mejoraron las capacidades plug-and-play permitiendo a esos dispositivos ser conectados o desconectados sin necesidad de reiniciar el sistema, y una vez establecido este sistema como objetivo final el universalizar las conexiones al ordenador creando un estándar en el mercado que unificara a todos los fabricantes. No obstante, en aplicaciones donde se requiere robustez industrial y se necesitan altas velocidades y grandes transferencias de datos los buses PCI o PCIe salen ganando.

Se pueden clasificar en cuatro tipos acorde a su velocidad de transferencia de datos y generación:

- Baja velocidad (1.0): Tasa de transferencia de hasta 1,5 Mbps (192KB/s). El primer modelo en salir al mercado, utilizado en su mayor parte por dispositivos de interfaz humana como los teclados, que requieren poca o nula alimentación.



- Velocidad completa (1.1): Tasa de transferencia de hasta 12Mbps (1,5MB/s), Una mejora del anterior modelo, mejorando en este caso la velocidad de transferencia, pensado para las primeras memorias de almacenamiento.
- Alta velocidad (2.0): Tasa de transferencia de hasta 480 Mbps (60MB/s) pero por lo general de hasta 125Mbps (16MB/s). Quizás el más extendido y utilizado. El cable USB 2.0 dispone de cuatro líneas, una para datos, una para corriente y otra de toma de tierra.
- Super alta velocidad (3.0): Tiene una tasa de transferencia de hasta 4.8 Gbps (600MB/s). Esta especificación es diez veces más veloz que el anterior. Se han incluido cinco conectores extra, actualmente es el estándar utilizado en multitud de dispositivos, sobre todo en almacenamiento gracias a su gran velocidad de transferencia.



Ilustración 32: Dos tipos de cables USB.

3.1.5.2. Wifi.

WLAN (*Wireless Local Area Network*) es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible, se podría decir que es la alternativa inalámbrica a las redes LAN cableadas. Se basa en la utilización de la radiofrecuencia, esta tecnología permite mayor movilidad a los usuarios al minimizar las conexiones cableadas y al saltar la barrera arquitectónica de tener que estar unido físicamente al emisor. Las WLAN van adquiriendo importancia en muchos campos, como almacenes o para manufactura, en los que se transmite la información en tiempo real a una terminal central. También son muy populares a nivel doméstico pues están presentes en la mayoría de hogares con conexión



a internet, siendo de gran utilidad y sobrepasando a las conexiones por puerto Ethernet.[14]

Ventajas:

- Comodidad inalámbrica, ya que permite el acceso a la red desde múltiples puntos dentro de un rango sin importar las barreras arquitectónicas.
- Permite una flexibilidad y posibilidad de conexiones de múltiples puestos de trabajo sin problema ni gasto en infraestructura.
- Posibilidad de elección entre varias señales libres o con seguridad.

Inconvenientes:

- Fallo en la conexión, un error o corte en la señal inalámbrica inhabilita por completo el sistema.
- En comparación a su equivalente por cable es mucho más lenta.
- Hay más facilidad respecto al “hackeo” de la red.
- Distancia limitada en cuanto al rango de la red.

3.1.5.3. Bluetooth

Otro tipo de conexión inalámbrica es la conexión por tecnología Bluetooth. Este término proviene de la palabra escandinava “Blåtand” en honor al rey Harald Blåtand, cuya traducción al inglés es Harald Bluetooth. Este rey vikingo pasó a la historia por unificar las tribus noruegas, suecas-danesas y por convertirlos al cristianismo. En analogía a esta tecnología cuyo fin es unificar las comunicaciones inalámbricas entre dispositivos, para poder transmitir voz, imágenes y en general datos en un radio de corto alcance a un bajo coste.

El estándar Bluetooth es de hecho una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Area Personal (WPAN), y funciona bajo radio frecuencias pudiendo atravesar diferentes obstáculos para llegar a los dispositivos que tenga a su alcance. Normalmente los dispositivos que usan esta tecnología suelen ser pertenecientes a sectores de las telecomunicaciones y la informática personal, como *smartphones*,



reproductores multimedia, ordenadores portátiles, *tablets*, reproductores de audio, televisores, etc.

Actúa en la franja de frecuencias 2.4 – 2.48 GHz la cual es conocida como “Banda ISM” que significa “Industrial, Scientific and Medical” que es una banda libre no regulada destinada a ser usada para investigar por los tres organismos anteriores, lo cual es muy genérico y actualmente es usada sobre todo a nivel comercial, personal o doméstico. Pero esto tiene sus inconvenientes también, ya que al ser libre puede ser utilizada por cualquiera y para ello, pudiendo dar múltiples interferencias con otras redes y/o dispositivos. Para evitar las múltiples interferencias que se pudieran introducir (microondas, WLANs, mandos, etc.) Bluetooth utiliza una técnica denominada salto de frecuencias.

El salto de frecuencias funciona cambiando de frecuencia y manteniéndose en cada una un “slot” o paquete de tiempo para después volver a saltar a otra diferente. Cuando coinciden más de un dispositivo bluetooth en un mismo canal de transmisión se utiliza para gestionar esa posible interferencia lo que se llaman “piconets” que son redes creadas donde hay un maestro que es el que gestiona la comunicación y establece su reloj, y unos esclavos que escuchan al maestro y sincronizan su reloj con el del maestro, excluyendo así al resto de dispositivos que no han sido autorizados para la sincronización.[15]

Los dispositivos con Bluetooth pueden clasificarse según su capacidad de canal:

Versión	Ancho de banda
Versión 1.2	1 Mbit/s
Versión 2.0 + EDR	3 Mbit/s
Versión 3.0 + HS	24 Mbit/s
Versión 4.0	32 Mbit/s

Tabla 4: Clasificación del ancho de banda de las versiones de Bluetooth más usadas.



3.2. Limpieza de paneles solares

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es, la búsqueda de una solución efectiva para la problemática relativa al mantenimiento de campos de paneles solares, en concreto, sobre la incidencia de la suciedad con respecto al rendimiento y potencia en dichos paneles.

3.2.1. La problemática de la suciedad en los paneles solares.

Debido a varios agentes responsables de la suciedad, ésta irá acumulándose y haciendo que llegue menos luz sobre el generador solar, y en consecuencia, disminuirá su rendimiento y la potencia generada.

Estos agentes pueden ser de distinto origen y composición, los principales son los siguientes:

- El polvo, la arena, el polen y otras pequeñas partículas suelen acumularse de forma natural al ser transportadas por el aire. Suelen ser más comunes en zonas áridas donde se desarrollan actividades agrícolas y que poseen suelos arenosos.
- Contaminantes, como vapores, humos y hollines, igualmente transportados por el aire pueden concurrir en una capa más difícil de limpiar que el polvo o la arena. Es más común en zonas urbanas e industriales.
- Los excrementos de las aves, más comunes de los que se pueda pensar, suponen un deterioro mayor incluso que el polvo o arena, pues puede provocar un bloqueo parcial de las células de los módulos.

Hay que tener en cuenta otros factores ambientales que en combinación con los ya citados pueden aumentar la incidencia sobre el funcionamiento del campo solar. La sedimentación de arena y polvo en las zonas áridas puede verse agravada **por el rocío** nocturno, que va a favorecer a la adhesión y compactación de ese polvo cuando este se seque, y una vez se vaya repitiendo este ciclo cada vez la capa será más gruesa y puede



llegar a bloquear completamente el panel de la incidencia de la luz. Por otro lado, en zonas cálidas y húmedas, puede llegar a producirse el crecimiento de moho, ya que entre el calor acumulado de día y la humedad nocturna puede proliferar el cultivo de microorganismos en la superficie de los paneles.

Cada vez se tienen más en cuenta estos factores ambientales que afectan sobre la incidencia de la suciedad en la obtención de energía solar. Muchas empresas y universidades ya han realizado estudios destinados a analizar y cuantificar el impacto de la suciedad sobre el rendimiento de las placas solares, para buscar un modelo matemático para prevenir estas pérdidas, para poder saber con qué frecuencia es necesario limpiar las placas solares, o incluso para determinar los distintos tipos de suciedad y que efecto tiene cada una de ellas sobre el rendimiento del panel fotovoltaico.[16]

Todos los estudios coinciden en lo beneficioso que es para la instalación solar el realizar una limpieza periódica de las placas solares y cómo influye este acto positivamente sobre su rendimiento. Aunque todos ellos coinciden en la importancia de la limpieza, aún no se ha establecido un patrón de frecuencia determinado, ya que la versatilidad de tipos de instalaciones, la disparidad de climas, localizaciones y agentes externos, hacen muy complejo crear un canon de limpieza apto para todo tipo de instalaciones.

La frecuencia de la limpieza estará determinada en gran medida por la ubicación del parque solar, siendo más proclives a requerir una limpieza aquellos que se encuentren en zonas con amplia vegetación y con gran cantidad de aves en el entorno, y también las cercanas a zonas industriales por todas las formas de suciedad vistas anteriormente.

Siempre que se realiza un nuevo proyecto o estudio para una posible nueva instalación, al realizar el análisis financiero, cada vez es más habitual y aconsejable, valorar unas posibles pérdidas de rendimiento por la suciedad acumulada en torno a un 5% de la producción total de energía en el campo solar.

Teniendo en cuenta que, en base a la legislación vigente, este tipo de campos tienen asegurado un funcionamiento de por lo menos 25 años, estas pérdidas, a lo largo



de este periodo suponen una gran cantidad de energía perdida y por tanto de dinero que se dejará de percibir en dicha explotación.

De acuerdo con los diferentes estudios consultados, las pérdidas por suciedad en los paneles solares están entre un 5% y 8% del total de la producción, según los criterios antes vistos de localización, tipo de suciedad, etc. En dichos estudios también se afirma que el rendimiento de las placas solares disminuye progresivamente a medida que el tiempo transcurre, como consecuencia del incremento en la suciedad acumulada en la superficie de las placas. En el caso de concentradores solares, dada la sensibilidad de sus sistemas de captación de calor, las pérdidas pueden llegar a ser muy superiores (en torno al 20%).[17]

3.2.2. Métodos de limpieza existentes en el mercado.

Para intentar reducir estas pérdidas por suciedad al mínimo, se han adaptado distintas soluciones de mayor o menor medida para tratar de atajar este problema. A continuación, se investigará el estado de arte de las opciones existentes en el mercado sobre la limpieza de espejos para analizar las ventajas/desventajas de cada una de ellas.

Se pueden analizar y clasificar teniendo en cuenta según los siguientes criterios:

- Sistemas con o sin agua.
- Operados manualmente o mecanizados.
- Sistemas con o sin rozamiento.

3.2.2.1. Sistemas de limpieza con pértigas y agua.

Clasificación: sistema con agua, manual y con rozamiento.

Posiblemente uno de los métodos más utilizados en la limpieza de campos solares. Se basa en la limpieza mecánica de la superficie vidriosa. Se complementa con un sistema de apoyo hidráulico de bombeo y mangueras. El agua que se va a utilizar, suele ser tratada



mediante filtros de partículas y un descalcificador o incluso agua osmotizada, para evitar la acumulación de cal a la hora de limpiar. El agua en la limpieza se almacena en un depósito desde donde se impulsa, por medio de una bomba, a unas pértigas que alcanzan hasta los veinte metros de altura.

La limpieza mecánica en sí, se realiza a través de unos cepillos situados en los extremos de las pértigas. Los cepillos suelen ser de poliéster, de forma que no rayan y así no causan daños en el panel. La suciedad que se va separando por el arrastre mecánico del cepillo, combinado con el agua, va secando sin dejar rastro.



Ilustración 33: Sistema de limpieza con pértigas.

Las ventajas de este sistema son:

- Muy económico.
- Necesita de personal no cualificado
- Adecuado para parques pequeños.

Desventajas:

- Consume más agua que otros sistemas.
- Necesita mínimo dos personas para operar.
- Optimiza poco el tiempo entre carga y descarga de agua.

3.2.2.2. Sistema de limpieza con rodillo automatizado.

Clasificación: sistema con agua, automatizado y con rozamiento.

Este sistema consta de un dispositivo formado por un vehículo con un mecanismo que porta un rodillo de limpieza con cerdas suaves para no dañar los paneles al limpiar. Igualmente se utiliza agua tratada descalcificada para evitar los restos de cal. Similar a los sistemas de limpieza de vehículos en túneles de lavado, se produce previamente una pulverización de agua para después pasar el rodillo giratorio e incluso después se puede volver a pasar agua para aclarar si se ha mezclado previamente algún tipo de detergente.



Ilustración 34: Método de limpieza por rodillo

Los componentes de este sistema de limpieza suelen ser:

1. Vehículo de transporte.
2. Bomba.
3. Brazo articulado manejado desde la cabina.
4. Cabeza de rodillo rotatorio con hilera de pulverizadores.

Es uno de los sistemas más adecuados para instalaciones amplias, pero deben estar adaptadas para poder desplazar un equipo de estas características entre las distintas hileras de paneles.

Ventajas de este sistema:

- Puede limpiar instalaciones de grandes dimensiones en un tiempo óptimo.



- Necesita un solo operario
- Optimiza el consumo de agua.

Desventajas:

- Necesita de una formación específica para el operario.
- Aumenta las posibilidades de deterioro o avería de los equipos.
- Consumo de combustible y mantenimiento alto.

3.2.2.3. Limpieza a presión.

Clasificación: sistema con agua, manual y sin rozamiento.

Este sistema está compuesto por un equipo de limpieza de agua a presión montado en un vehículo que incorpora a su vez una plataforma elevadora donde se sitúa el operario. Éste se va aproximando a la superficie a limpiar manejando la plataforma. Una vez está situado en posición, acciona la boquilla de agua y va recorriendo toda la superficie.



Ilustración 35: Sistema de limpieza a presión.

**Este mecanismo lo podemos encontrar en diferentes situaciones:**

- Para instalaciones grandes: Es el ideal para plantas solares compuestas por paneles individuales de gran tamaño en los cuales el operario se sitúa en el área próxima y desde la posición elevada puede con, pocos movimientos, limpiar el panel unitario.
- Para instalaciones fijas: Para grandes hileras de paneles continuos se puede utilizar un sistema en el que el operario con la pistola a presión cuenta con un conductor del vehículo que le va desplazando longitudinalmente. Puede constar de módulos con varias pistolas para optimizar aún más la limpieza.

Ventajas:

- Puede limpiar instalaciones con estructuras de seguimiento de grandes dimensiones.
- Equipo relativamente económico si no incluye control automático.
- Adecuado para instalaciones dispersas, aunque deben contar con vías para el desplazamiento del vehículo.

Desventajas:

- Gasta mucha agua.
- Consumo de combustible.
- Mínimo dos operarios.

3.2.2.4. Capa antiadherente.

Menos común que los sistemas antes comentados, se puede recubrir la superficie del panel con una capa antiadherente. Puede que la lluvia de siempre la impresión de que reducirá la limpieza y la frecuencia con la que se puede dar lugar a que valoremos invertir menos en limpieza, pero también existen lluvias que depositan suciedad y junto con depósitos de polvo y arena previos ensucien aún más el cristal que recubre las células, por



tanto, este método consiste en depositar una capa antiadherente en la superficie del cristal y favorecer con las lluvias la auto limpieza.

3.2.2.5. Sistema de auto limpieza automático.

Similar a la instalación de tuberías de riego en zonas verdes y césped. Este sistema está compuesto por una red de tuberías que recorre el campo fotovoltaico. Se intalan en la parte superior de los módulos unos aspersores por los que sale agua a una determinada presión. Una vez activados aportan una pequeña corriente de agua de unos segundos de duración que elimina toda la suciedad depositada sobre los paneles. Una de las ventajas significativas de este sistema es que, al estar completamente automatizado, se puede conectar a una instalación meteorológica, con temporizador y programación. Así, en función de las condiciones climatológicas del entorno, como su temperatura, humedad, la época del año e incluso aportando datos de la producción y correlacionándolos con la base de datos, se puede llegar a programar de manera más eficiente.

Este sistema, que es el que mejor implantación está teniendo últimamente, consigue mejorar los resultados de las instalaciones en un 10% respecto a otras instalaciones similares en su misma zona.



Ilustración 36: Sistema de auto limpieza automático.



3.2.2.6. Sistema de limpieza robótico.

El siguiente paso lógico en la automatización de los procesos de limpieza, es la realización de estos trabajos por medio de robots. Actualmente, el mundo de la robótica ha desarrollado robots autónomos para la limpieza de las fachadas y cubiertas de vidrio de los edificios. Se han introducido robots domésticos de limpieza, hay autómatas limpiadores para piscinas e incluso módulos fotovoltaicos que es lo que nos interesa en este proyecto.

La automatización del proceso de limpieza de un panel solar tiene la ventaja de disponer prácticamente durante todo el proceso de captación de energía del total de rendimiento que podemos obtener con nuestro panel solar. Los sistemas manuales de limpieza requieren mucha mano de obra, tiempo y dinero. Los robots pueden trabajar por la noche para dejar los paneles limpios para el día siguiente, y que puedan trabajar al máximo de su rendimiento.



Ilustración 37: Robot de limpieza HighRise de IPC subiendo y limpiando pared de cristal.



Podríamos establecer dos tipos de robots limpiadores para paneles solares, los externos al propio panel y los montados en la misma estructura del panel. Un modelo de limpiador externo al panel sería el modelo de robot *Solarbrush*.



Ilustración 38: Robot limpiador de la compañía Solarbrush.

Este modelo de limpiador tiene el inconveniente inherente a su diseño. Es necesario el posicionamiento humano y manual entre panel y panel o conjunto de paneles, ya que no dispone de medios para pasar de uno a otro.

En cambio, los robots automatizados incorporados al panel o al conjunto de paneles evitan ese inconveniente, pero con el sobrecoste de tener que incorporar una unidad de robot por cada módulo.

Hay modelos que incorporan railes o ruedas que ayudan al desplazamiento de un conjunto de paneles colocados en serie, optimizando y reduciendo el número de robots necesarios para su uso en huertas y plantas solares. Podemos ver estos modelos en las siguientes figuras.



Ilustración 39: Modelo de Greenbotics como solución de la limpieza automatizada.



Ilustración 40: Modelo de robot Ecoopia E4

3.3. Cinemática inversa.

3.3.1. Introducción.

La cinemática inversa es un modelo matemático que va a poder resolver la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación de la parte más externa conocida.

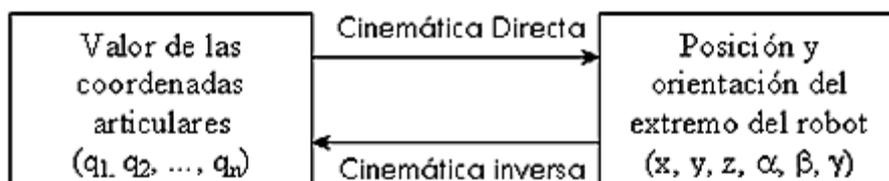


Ilustración 41: Relación entre cinemática directa y cinemática inversa.

En Robótica, la cinemática inversa (o IK, *Inverse Kinematics*) es la técnica y conjunto de soluciones, que permiten establecer y determinar el conjunto de movimientos necesarios para que una cadena de articulaciones ubique el actuador final en una posición concreta. Normalmente la resolución de ese problema consiste en una serie de ecuaciones cuya solución no suele ser única, el cálculo de la cinemática inversa suele ser un problema complejo. El objetivo de la cinemática inversa es encontrar los valores que debe tomar el sistema de articulaciones del robot, es decir sus coordenadas y valores angulares, para que su extremo efector se oriente y se coloque según se desee llegar a una determinada



posición espacial. Puede tener múltiples soluciones, pues depende del número de articulaciones y del resto de configuraciones del sistema.

El objetivo procedimental es que, si se requiere una posición de destino y una orientación en términos cartesianos, se va a calcular mediante la cinemática inversa un conjunto de sistemas que describirán en términos cartesianos los movimientos realizados y se despejarán los ángulos de articulación buscados que son los correctos para ejecutar ese movimiento.

Por tanto, el movimiento de una cadena cinemática es modelado por un conjunto de ecuaciones cinemáticas exclusivas de esa misma cadena. A ese conjunto de ecuaciones que definen el conjunto de la cadena de movimiento éstas definidas en términos de sus parámetros. [18]

3.3.2. Análisis Cinemático

Se ha mostrado previamente que la cinemática inversa se refiere a la utilización de las ecuaciones cinemáticas de las cadenas articulares de un robot para determinar los parámetros que van a proporcionar al final de la cadena el movimiento deseado para llegar a una posición final conocida. Este conjunto de especificaciones de los parámetros es conocida como la planificación de movimientos. La cinemática inversa quiere conseguir transformar este plan de movimiento en trayectorias del actuador que serán introducidas ya de manera acorde a su tipo de programación en ordenes electromecánicas para el robot. El movimiento de una cadena articulada, por tanto, va a ser modelada y definida por esas ecuaciones cinemáticas y sus parámetros.

El robot con brazo articulado (o cualquier tipo de conjunto de articulaciones) consta de unos segmentos rígidos conectados mediante articulaciones similares a la disposición en la naturaleza de estructuras rígidas y articulaciones. Los múltiples ángulos, que determinarán el grado de libertad, pueden llegar a determinar múltiples e indefinidas posiciones, cuanto más complejas a mayor número de las mismas. La solución al problema cinemático inverso consistirá, como se ha visto antes, en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2 \dots, q_n]$ para que su



extremo se posicione y oriente según la posición requerida. Por norma general, no existe una solución única para este problema, e incluso puede llegar a no existir solución.

En la búsqueda de la solución es donde se halla el auténtico propósito de la cinemática inversa, y como se ha visto no hay una única solución, pues hay a su vez múltiples métodos para hallar la posible solución al problema. La solución más básica y, no por ello menos compleja, es el método de Newton, o método iterativo, que puede llegar a resultar un conjunto de cálculos lentos pues consta de técnicas numéricas iterativas, buscando acotar el tiempo máximo (o iteraciones) que debe realizar el algoritmo de búsqueda.

Existen otros métodos para buscar la solución al problema, que veremos más adelante, como por ejemplo, el uso de métodos geométricos y la resolución de los triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot. También podemos contar con la resolución a partir de la transformación homogénea de matrices y el método del desacoplamiento cinemático.

3.3.3. Cinemática inversa y animación 3D

Un campo donde cabe destacar el uso de la cinemática inversa a parte del campo de la robótica, es en el mundo de la programación de juegos y animación en 3D, donde se utiliza para conectar, diseñar y prever físicamente los movimientos de los personajes del juego. Una figura animada se modela con un esqueleto de segmentos rígidos conectados con las articulaciones, es decir, se compone de estructuras de cadenas cinemáticas de movimiento. Las ecuaciones cinemáticas de la figura definen la relación entre los ángulos de las articulaciones de la figura y su pose o configuración. Por tanto, la cinemática inversa y el conjunto de soluciones para determinar las ecuaciones y parámetros, resulta muy útil en este campo, y es incluida en parte fundamental de la mayoría de software de animación y diseño 3D.

Gracias a estos programas asistidos de dibujo y programación, se pueden desarrollar movimientos naturales y creíbles que aúnan muchas cadenas de articulaciones interconectadas entre si formando un conjunto modelado entre sí con las obvias



restricciones geométricas. A la hora de imitar y reflejar movimientos humanos o animales hay que tener en cuenta que todos los grados de libertad tienen sus restricciones físicas que no se pueden sobrepasar.

3.3.4. Grados de libertad.

Previamente se ha pasado por encima del término de grado de libertad sin llegar a definirlo en concreto. Se podría decir que es el conjunto de movimientos realizables que libremente podría hacer un cuerpo aislado. En un movimiento que se puede descomponer en 3 rotaciones y 3 traslaciones geométricas independientes acordes a los movimientos realizables en nuestro espacio físico de tres dimensiones.

Se conoce como grado de libertad a los movimientos independientes que se mantienen en un cuerpo unido a otro mecánicamente, mediante pares cinemáticos², cuando algunos movimientos elementales desaparecen.

También se puede definir que los grados de libertad son el número mínimo de velocidades generalizadas independientes necesarias para definir el estado cinemático de un sistema mecánico. Se dice que un sistema es holónomo cuando el número de grados de libertad coincide con el de coordenadas independientes, al contrario, no es holónomo si tiene más coordenadas independientes que grados de libertad.[19]

3.3.4.1 Grados de libertad en mecanismos planos

En un sistema plano de dos dimensiones, cuyo mecanismo solo tiene un movimiento dentro de las citadas dos dimensiones, el número de grados de libertad del mismo se pueden calcular mediante el criterio de Grübler-Kutzbach:

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

Ecuación 1: Criterio de Grübler-Kutzbach para calcular el grado de libertad.

donde:

² Pares cinemáticos: en ingeniería mecánica se denomina par cinemático a una unión entre dos miembros de un mecanismo. Un ejemplo son dos barras unidas por un perno que permite que las piezas giren alrededor de él.



m , movilidad.

n , número de elementos (eslabones, barras, piezas, etc.) de un mecanismo.

j_1 , número de uniones de 1 grado de libertad.

j_2 , número de uniones de 2 grados de libertad.

3.3.5. Métodos de solución.

Dada la posición del extremo final del sistema articulado y conociendo la longitud de cada segmento hay que descubrir los ángulos de las articulaciones. El objetivo consiste en encontrar dichos valores que deben adoptar las coordenadas articulares y los ángulos que se deben posicionar y orientar según una determinada localización espacial.

El proceso para obtener las ecuaciones depende principalmente de la configuración del robot. Se deben resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales y simultáneas.

-Problemas fundamentales que surgen de la búsqueda de las posibles soluciones:

- Ecuaciones no lineales (sen , cos en matrices de rotación).
- Existen múltiples soluciones.
- Es posible que no exista una solución.
- Singularidades.

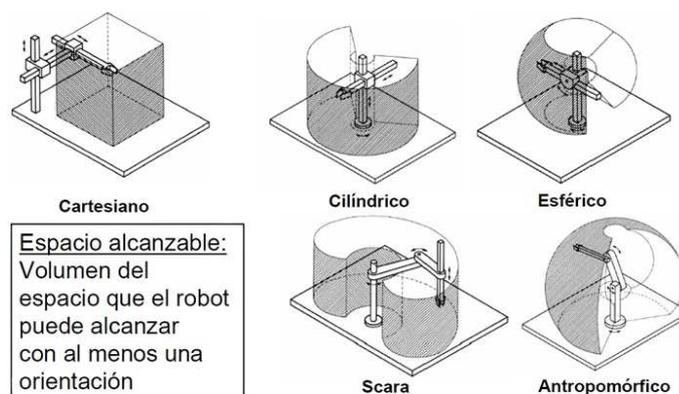


Ilustración 42: Espacio alcanzable por el robot.



Deben atenderse las múltiples soluciones:

- Elección que mejor minimice los movimientos desde la posición inicial.
- Concepto de solución más cercana.
- Mover los enlaces de menor peso.
- Considerar obstáculos (evitar colisiones).

3.3.5.1. Tipos de solución:

Métodos geométricos: Se suele utilizar para las primeras variables articulares, uso de relaciones geométricas y trigonométricas.

Por matrices de transformación homogénea: Despejar las n variables q_i en función de los componentes de los vectores n , s , a y p . Que son el vector normal, el de deslizamiento, el de aproximación y el de posición del extremo respectivamente.

Desacoplamiento cinemático: En robots de 6 GDL, separación de orientación y posicionamiento.

Soluciones numéricas (iterativas): No aplicables en tiempo real.

3.3.5.2. Métodos Geométricos

Este procedimiento relativamente sencillo es quizás el más adecuado para robots de pocos grados de libertad o para el caso de que se consideren solo los primeros grados de libertad, correspondientes a una sección del robot, exclusivamente dedicados a posicionar el extremo del mismo.

Se basa en encontrar las relaciones geométricas en las que deben intervenir las coordenadas buscadas del extremo efector del robot, sus dimensiones físicas y las coordenadas y angulares de las articulaciones del robot.

Por tanto, se van a utilizar los conocidos teoremas que relacionan ángulos, lados, senos y cosenos de un triángulo, que obtendremos triangulando el plano y los ejes cartesianos de una representación planar de las articulaciones y segmentos del robot junto a las posiciones finales del extremo del brazo articulado.

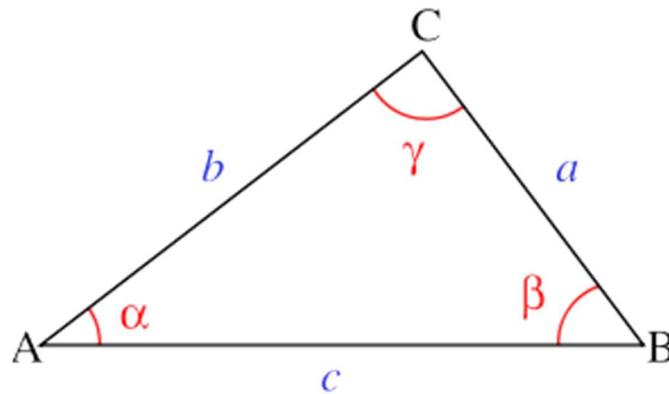


Ilustración 43: Relación entre lados y ángulos de un triángulo.

Teoremas del seno, coseno y tangente:

Teorema del seno:

Si en un triángulo como el de la imagen ABC, las medidas de los lados opuestos a los ángulos A, B y C son respectivamente a, b, c, entonces:

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

Ecuación 2: Teorema del seno

Teorema del coseno:

Dado el mismo triángulo ABC, siendo sus ángulos α , β y γ ; y los lados a, b, c, los respectivamente opuestos entonces:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\gamma)$$

Ecuación 3: Teorema del coseno



Teorema de la tangente:

$$\frac{a-b}{a+b} = \frac{\tan\left[\frac{1}{2}(\alpha-\beta)\right]}{\tan\left[\frac{1}{2}(\alpha+\beta)\right]}$$

Ecuación 4: Teorema de la tangente.

La orientación del último enlace es la suma de las variables articulares

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

Ecuación 5: Suma de ángulos en brazo de 3 grados de libertad.

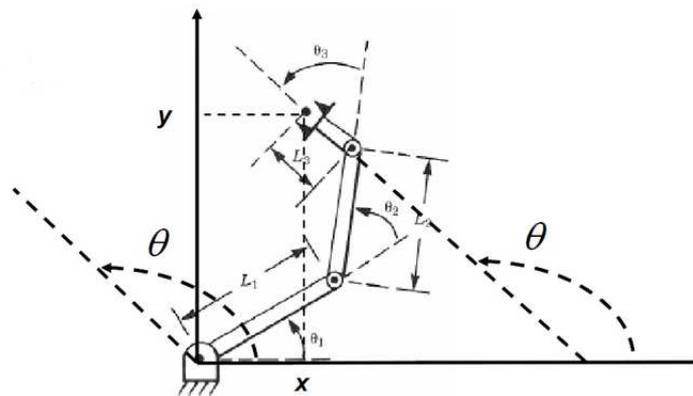


Ilustración 44: Suma de ángulos en brazo de 3 grados de libertad.

Como se trata de un movimiento relativamente sencillo, acorde a un robot de tres Grados de libertad, se va a mostrar la descomposición de movimiento de una estructura típica articular.

El dato de partida son las coordenadas (P_x, P_y, P_z) referidas a (S_0) en las que se requiere posicionar su extremo.



Como se ve este robot posee una estructura planar, quedando este plano definido por el ángulo de la primera variable articular q_1 .

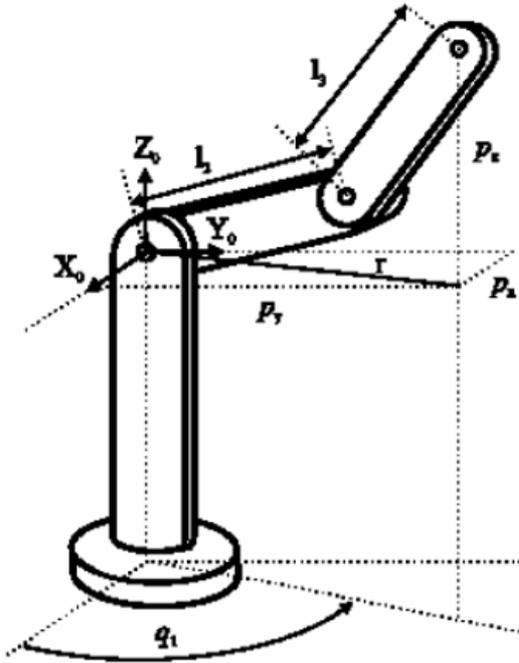


Ilustración 45: Robot de estructura planar con 3 GDL.

$$q_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right)$$

Ecuación 6: Obtención del ángulo de la primera articulación del robot con 3 GDL.

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= p_x^2 + p_y^2 \\ r^2 + p_z^2 &= L_2^2 + L_3^2 + 2L_2L_3 \cos q_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\cos q_3 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}$$

$$\text{sen} q_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}$$

$$q_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2 q_3}}{\cos q_3} \right)$$

Ecuación 7: Obtención del ángulo de la tercera articulación del robot con 3 GDL.

$$\text{Con } \cos q_3 = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3}$$

$$q_2 = \beta - \alpha ; \beta = \tan^{-1} \left(\frac{p_z}{r} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{p_z}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right); \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{l_3 \sin q_3}{a_2 + l_3 \cos q_3} \right)$$

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\frac{p_z}{\pm \sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{l_3 \sin q_3}{a_2 + l_3 \cos q_3} \right)$$

Ecuación 8: Obtención del ángulo de la segunda articulación del robot con 3 GDL.

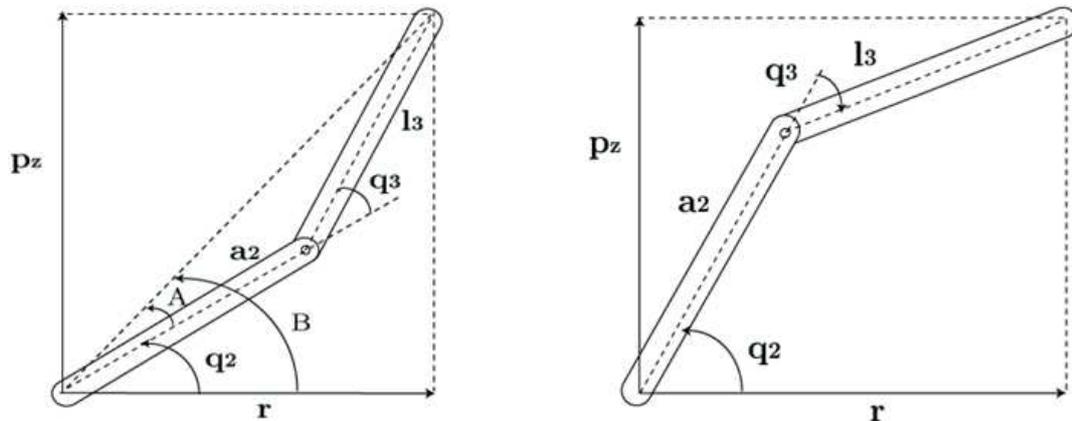


Ilustración 46: Soluciones codo arriba y codo abajo.

Se ha definido antes que, dentro de la posible solución, pueden existir múltiples soluciones, en este caso existen dos posibles soluciones para q_2 y q_3 según si adoptamos el signo de la raíz como positivo o negativo. Se tendría entonces una configuración codo arriba y codo abajo.

3.3.5.3. Matriz de transformación homogénea

Este sistema de resolución consiste en obtener el modelo cinemático inverso a partir del modelo cinemático directo. En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo. Es decir, suponiendo conocidas las relaciones que expresan el valor de la posición y orientación del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquellas las relaciones inversas. Sin embargo, la aplicación de este proceso puede resultar una tarea tediosa y complicada, siendo en muchas ocasiones tan compleja que ha de ser desechada.

Analizando este método mediante un ejemplo, se va a aplicar este procedimiento al robot de tres grados de libertad con una configuración esférica con dos giros y un desplazamiento tal y como se muestran en la imagen.

El robot queda siempre contenido en un plano determinado por el ángulo q_1 .

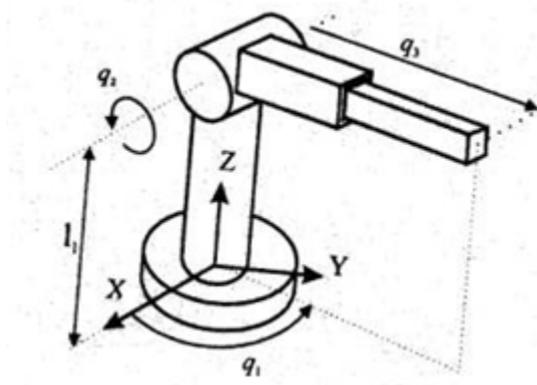


Ilustración 47: Representación planar de robot de 3 GDL.

El primer paso a dar para resolver el problema cinemático inverso, es obtener la solución al problema cinemático directo y obtener T_{ij} correspondiente a este sistema. Es decir, obtener la matriz T que relaciona el sistema de referencia S_0 asociado a la base del brazo junto al sistema de referencia S_3 asociado al extremo del brazo.

Prosiguiendo con el análisis de la cinemática directa se debe parametrizar según los criterios DH, es decir, los criterios del algoritmo Denavit-Hartenberg para la obtención de un modelo matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas S_i ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Entonces, según los criterios de DH con el robot situado en su posición de partida ($q_1 = q_2 = 0$), y los valores de los parámetros de DH, a partir de estos planteamientos vamos a obtener las matrices A y la matriz T.

La expresión de T la tendremos en función de las coordenadas que se relacionan con las articulaciones (q_1, q_2, q_3), y supuesta una localización de destino para el extremo del robot definida por los vectores n, s, a y p, se podría intentar manipular directamente las 12 ecuaciones resultantes de T a fin de despejar (q_1, q_2, q_3), en función de n, s, a y p.

Con este procedimiento directo aparecen ecuaciones trascendentes y se complica bastante el método, es aconsejable seguir el siguiente procedimiento:

Puesto que $T = ({}^0A_1)({}^1A_2)({}^2A_3)$, entonces sabemos que:



$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ A_1 \end{pmatrix} T = ({}^1A_2)({}^2A_3)$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ A_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ A_1 \end{pmatrix} T = ({}^2A_3)$$

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & \alpha_1 \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \sin \theta_i & \alpha_1 \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 9: Matriz de orientación del sistema de coordenadas.

Por tanto, la inversa de esta matriz es la transpuesta.

$[x_i, y_i, z_i]$ es la matriz de orientación del sistema de coordenadas i -ésimo establecido en el elemento i con respecto al sistema de coordenadas de la base. Es la matriz particionada superior izquierda 3×3 de 0T_i .

p_i es el vector de posición que apunta desde el origen del sistema de coordenadas de la base hasta el origen del sistema de coordenadas i -ésimo. Es la matriz particionada superior derecha 3×1 de 0T_i .

$$\begin{aligned} {}^0T_i &= {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{i-1}A_i = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}A_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \\ &= \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & p_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_i & {}^0p_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Para $i = 6$, se tiene la siguiente matriz T :

$$T = \begin{bmatrix} x_6 & y_6 & z_6 & p_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0p_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Definiendo por tanto los siguientes valores:

\mathbf{n} es el vector normal del extremo. Suponiendo un extremo del brazo del tipo de mordaza paralela que es ortogonal a los dedos del brazo del robot.

\mathbf{s} es el vector de deslizamiento del extremo. Está apuntando en la dirección del movimiento del extremo cuando la pinza se abre y se cierra.

\mathbf{a} es el vector de aproximación del extremo. Está apuntando en la dirección normal a la placa de montaje de la herramienta.

\mathbf{p} es el vector de posición del extremo. Apunta desde el origen del sistema de coordenadas de la base hasta el origen del sistema de coordenadas del extremo del brazo.

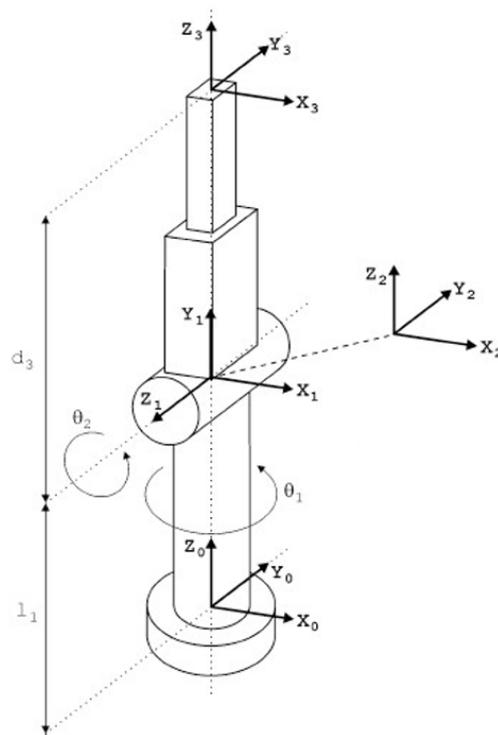


Ilustración 48: Descomposición de ejes de robot de 3GDL

Articulación	θ	d	a	α
1	θ_1	l_1	0	90
2	θ_2	0	0	-90
3	0	d_3	0	0

Tabla 5: Parámetros DH del robot de 3GDL.



$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^1A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_2 & 0 \\ S_2 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_2 = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -S_1 & -C_1S_2 & 0 \\ S_1C_2 & C_1 & S_1S_2 & 0 \\ S_2 & 1 & C_2 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T = {}^0A_3 = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -S_1 & -C_1S_2 & -d_3C_1S_2 \\ S_1C_2 & C_1 & -S_1S_2 & -d_3S_1S_2 \\ S_2 & 0 & C_2 & d_3C_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$$

$$({}^0A_1)^{-1}T = {}^1A_2 {}^2A_3$$

$$\begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_2 & 0 \\ S_2 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C_2 & 0 & -S_2 & -S_2d_3 \\ S_2 & 0 & C_2 & C_2d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Eligiendo el elemento (3,4):

$$S_1p_z - C_1p_y = 0 \Rightarrow \tan \theta_1 = \left(\frac{p_y}{p_x}\right) \Rightarrow$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

Ecuación 10: Obtención del ángulo θ_1 por Matriz de Transformación.

$$({}^0A_2)^{-1}({}^0A_1)^{-1}T = {}^2A_3$$

$$\begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -l_1 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} C_2C_1 & C_2S_1 & S_2 & -l_1S_2 \\ -S_1 & C_1 & 1 & 0 \\ -S_2C_1 & -S_2S_1 & C_2 & -l_1C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Eligiendo el elemento (1,4):

$$C_2C_1p_x + C_2S_1p_y + S_2p_z - l_1S_2 = 0$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} - \frac{C_1p_x + S_1p_y}{p_z - l_1}$$

Ecuación 11: Obtención del ángulo θ_2 por Matriz de Transformación.

Eligiendo el elemento (3,4):

$$-S_2C_1p_x - S_2S_1p_y + C_2p_z - l_1C_2 = d_3 \quad \Rightarrow \quad d_3 = C_2(p_z - l_1) - S_2(C_1p_x + S_1p_y)$$

3.3.5.4. Desacoplamiento Cinemático

Mediante los métodos geométricos y, usando la matriz de transformación vistos previamente, se permite obtener los valores de las tres primeras variables articulables del robot. Estas son las correspondientes a las tres primeras articulaciones próximas al extremo, y aunque también por estos métodos se pueden obtener hasta seis grados de libertad a costa de una mayor complejidad, se puede determinar los otros tres adicionales que pueden faltar. utilizadas para la obtención de las 6 a costa de una mayor complejidad.

Estos tres grados de libertad adicionales cuyos ejes, situados en lo que se podría denominar la muñeca del robot, están situados al final de la cadena cinemática.

El verdadero objetivo, si el cambio en los tres últimos grados de libertad origina un movimiento en la posición final del extremo real del robot, es poder orientar la herramienta del robot libremente en el espacio.

El método de **desacoplo cinemático** separando ambos problemas, posición y orientación, saca partido de este hecho. Para conseguir la posición y orientación deseados final ya dados, se establece las coordenadas del punto de corte de la muñeca del robot,

calculándose como antes los valores de las tres primeras variables articulables (q_1 , q_2 y q_3) y así conseguimos posicionar ese punto. A partir de esos datos y de los de la orientación ya podemos obtener el resto de variables que faltan.

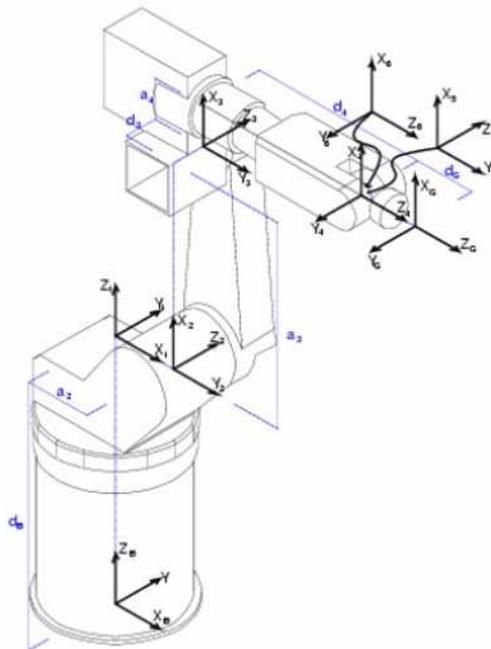


Ilustración 49: Representación gráfica de robot de 6 GDL.

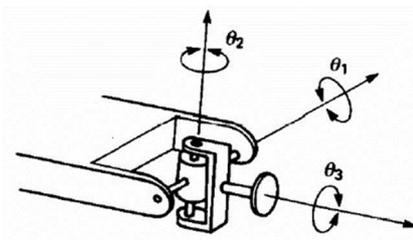


Ilustración 50: Garra superior del robot de 6 GDL.

Se puede resolver de forma explícita los tres grados de libertad que definen la orientación de la garra.

Resumimos con el siguiente algoritmo la cinemática inversa de este tipo de robots manipuladores:



1. Determinar q_1, q_2 y q_3 de tal manera que la muñeca de centro OC tiene coordenadas dadas por:

$${}^0c = 0 - d_6 R \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. Uso de las variables conseguidas en el punto 1, para evaluar 0R_3 .

3. Buscar un conjunto de ángulos de Euler correspondientes a la matriz de rotación.

$$R_6^3 = (R_3^0)^{-1}R = (R_3^0)^T R$$

Parametros Denavit-Hartenberg del robot de la figura.

Articulación	θ	d	a	α
1	θ_1	l_1	0	-90
2	θ_2	0	l_2	0
3	θ_3	0	0	90
4	θ_4	l_3	0	-90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	l_4	0	0

Tabla 6: Parámetros DH del robot de 6GDL.

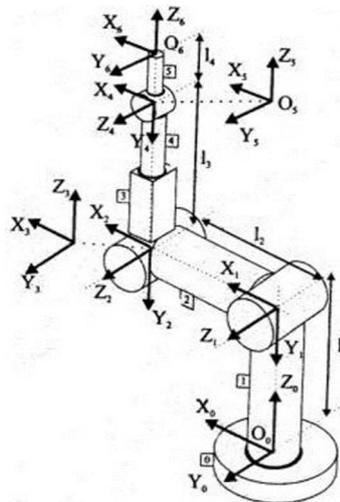


Ilustración 51: Sistemas del Robot de 6 GDL

Utilizando los vectores P_m y P_r es posible, mediante un método geométrico, calcular los valores de q_1 , q_2 y q_3 que consiguen posicionarlo en el punto deseado, ya que estos vectores P_m y P_r van desde el origen del sistema asociado a la base hasta los puntos de la muñeca y extremo del robot. Faltaría por resolver el cómo obtener los valores de q_4 , q_5 y q_6 que dotan al sistema de la orientación deseada.

Para ello se denomina R_6^0 a la submatriz de rotación de T_6^0 se tendrá:

$$R_6^0 = (R_3^0)(R_6^3)$$

Donde R_6^0 es la matriz conocida por la orientación deseada del extremo del robot, y $OR3$ está definida por: $R_3^0 = (A_1^0)(A_2^1)(A_3^2)$, lo será a partir de los valores ya obtenidos de q_1 , q_2 y q_3 .

Por lo tanto:

$$R_6^3 = R_{ij} = \begin{pmatrix} 1 \\ R_3^0 \end{pmatrix} (R_6^3) = (R_6^0)^T$$

Y tendrá sus componentes numéricas conocidas.



Por otra parte, R_6^3 corresponde a una submatriz 3X3 de rotación de la matriz de transformación homogénea T_6^3 , que relaciona el sistema S_3 con el S_6 por lo tanto:

$$R_6^3 = (A_4^3)(A_5^4)(A_6^5)$$

Donde $i-1R_i$ es la submatriz de rotación de la matriz de DH $i-1A_i$, cuyos valores son:

$$\begin{matrix} & R_4^3 & & R_5^4 & & R_6^5 \\ \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 \\ S_4 & 0 & C_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 \\ S_5 & 0 & -C_5 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Luego se tiene que:

$$R_6^3 = \begin{bmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 \\ S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6 & -S_4 C_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 \end{bmatrix}$$

Donde R_{ij} , será por valores numéricos conocidos:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & C_4 S_5 \\ S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6 & -S_4 C_5 S_6 + C_4 C_6 & -S_4 C_5 \\ -S_5 C_6 & S_5 S_6 & C_5 \end{bmatrix}$$

De esas nueve relaciones expresadas se toma las correspondientes a $R_3^1, R_3^2, R_3^3, R_1^3$ y R_2^3

$$R_3^1 = C_4 S_5$$

$$R_3^2 = -S_4 C_5$$

$$R_3^3 = C_5$$

$$R_1^3 = -S_5 C_6$$

$$R_2^3 = S_5 S_6$$

Del conjunto de ecuaciones es inmediato obtener los parámetros articulares:



$$q_4 = \sin^{-1}(R_3^2/R_3^3)$$

$$q_5 = \cos^{-1}(R_3^3)$$

$$q_6 = \tan^{-1}(-R_2^3/R_3^1)$$

Ecuación 12: Conjunto de ángulos cuarto, quinto y sexto del robot de 6GDL.

Este conjunto de expresiones y, teniendo en cuenta que las posiciones de cero son distintas, constituyen la solución completa del problema cinemático inverso del robot articular mediante el desacoplamiento cinemático. [20]

3.4. LEGO MINDSTORMS.

Nombrar la compañía danesa de juguetes Lego es nombrar una de las mayores compañías del sector y mundialmente conocida por sus bloques de plástico interconectables. El nombre LEGO es abreviatura de dos palabras danesas, “leg” y “godt” (cuyo significado es “jugar bien”) que aun siendo puesto este nombre en sus primigenios orígenes en los cuales la firma fabricaba juguetes de madera, ya define la línea ideológica de la empresa, crear juguetes no solo para entretener a los más pequeños, sino para aprender, imaginar, explorar de una manera divertida y educativa.

Ole Kirk Kristiansen, carpintero de profesión, fundó la empresa en 1932. Varió el rumbo de su fábrica de muebles de madera a una fábrica de juguetes de madera destinados a niños y jóvenes, con cierto aire educativo. Pero la historia de la compañía cambiaría para siempre cuando su fundador asistió a una feria industrial en Dinamarca en 1946 y encontró un pequeño bloque de plástico producido por una máquina moldeadora, Kristiansen vislumbró las posibilidades de trabajar con el plástico en lugar de la madera y viendo el potencial de el mismo, adquirió la tecnología.

Desde aquel momento, lo que era una modesta compañía de juguetes de madera iniciaría una ascensión para convertirse en la gran multinacional que conocemos hoy en día, con múltiples líneas de juguetes, acuerdos con otras marcas comerciales como Star



Wars, Harry Potter y demás personajes y sagas de ficción populares, e incluso con líneas dedicadas a los videojuegos y a la animación.

El grupo Lego cuenta también con parques temáticos bajo su marca Legoland. El éxito de la compañía se puede reducir a un simple diseño, una pieza sobre la que se construiría un imperio, el ladrillo LEGO, o en su danés original, el LEGO *Mursten*.

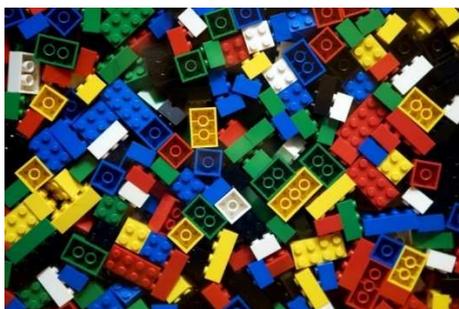


Ilustración 52: Múltiples bloques de LEGO.

Las líneas de juguetes son muy variadas y van desde los pocos meses de edad, con juguetes muy seguros y sin piezas pequeñas, hasta la adolescencia e incluso un poco más allá, con líneas cada vez más temáticas y populares, con personajes del cine, cómics y videojuegos. Entre todas estas líneas hay que destacar una más orientada a despertar la curiosidad sobre cómo funcionan las cosas y como construir elementos móviles, que ha interesado desde que salió a determinado sector de público, en el que podían englobarse ingenieros y apasionados de la técnica, la línea Technic.

Con un enfoque distinto al resto de líneas, la línea Technic se aparta del juguete tradicional y contiene elementos distintos al resto de paquetes LEGO, ya que abarca diseños y elementos que pudiéramos englobar en la rama de la mecánica como en electrónica. Así, estos paquetes de diseños que van, desde excavadoras, camiones grúa, carros elevadores, están compuestos por motores eléctricos, cables, ejes, poleas, levas, pistones o amortiguadores. Todos ellos elementos tecnológicos reconocibles a una escala diminuta y con una función educativa importante.



Ilustración 53: Engranaje, junta Cardan, motor y cable de LEGO. (De Izq. a Der.)

Estos elementos creados de una manera más fidedigna con la realidad, permiten crear vehículos y sistemas con mecanismos a una cierta escala y con funcionalidades reales muy aproximada. La función de esta línea es despertar en los jóvenes la capacidad creativa necesaria y la motivación para poder desear en un futuro trabajar con modelos reales y desarrollar una actividad profesional orientada a la ingeniería y el diseño. Un paso más allá de la línea Technic, buscando introducir aún más los componentes electrónicos y la informática, LEGO empezó a colaborar más a fondo con ambientes educativos superiores y junto a el MIT (Massachusetts Institute of Technology) desarrollaron una nueva línea de lo que vendría a ser un juguete inteligente, Lego Mindstorms. Esta es una línea de juguetes de robótica para niños, que posee elementos básicos de las teorías robóticas, como la unión de piezas y la programación de acciones en forma interactiva.



Ilustración 54: Modelos de LEGO pertenecientes a la línea LEGO Technic.

Lego Mindstorms puede ser usado para construir modelos con piezas manejados y controlados desde un computador, pudiendo construir sistemas autómatas y capaces de tomar decisiones gracias a poder incluir dentro de su memoria programas realizados con el paquete de software de LEGO. La posibilidad de creación con este tipo de entornos de



construcción hace que prácticamente todo puede ser representado con las piezas tal como en la vida real, solo la imaginación es el límite.

Desde su invención en 1998 hasta la actualidad en 2016, ha habido tres generaciones de Lego Mindstorms: el bloque RCX, el bloque NXT y el EV3.

3.4.1. Modelo NXT.

Tradicionalmente la línea Technic de LEGO ya había añadido a sus kits componentes relacionados con la electrónica, con motores, luces, baterías y mandos con hilos, pero la colaboración con el MIT añadió a todos esos componentes el uso de un controlador más avanzado para manejar y controlar los sistemas creados con los bloques y demás componentes móviles y motores. El elemento central sobre el que gira toda esta nueva línea de productos es el llamado “brick”.



Ilustración 55: De Izq. a Der. Distintas versiones del ladrillo LEGO: RCX, NXT y EV3.

Estos “bricks” a cierto nivel, vienen a ser como un pequeño ordenador, pues su estructura es similar. Su parte principal está formada por un microcontrolador o procesador, que en sus últimas versiones ha alcanzado grados de potencia bastante significativos si pensamos en ellos como en un juguete. Tienen la función de una unidad de control para robots que permite crear e imaginar distintos modelos y recreaciones de diseños ya creados, llevando el diseño industrial al mundo de juguete.



Por ello, cada vez más personas se han interesado en estos sistemas, no sólo para la docencia o el ocio, sino incluso para la investigación, sin dejar de lado a los amantes de la robótica a nivel amateur para sus propios proyectos.

El último modelo desarrollado y puesto en el mercado es el Mindstorms EV3. Pero, para este proyecto se ha utilizado la versión anterior, pues es la que estaba disponible en el momento de su realización.

El paquete de LEGO Mindstorms 2.0. está formado por un kit que incluye:

- El brick NXT.
- Sensores de luz color, de ultrasonidos y dos de contacto.
- Tres servomotores
- Cableado compatible.
- Set de construcción similar a la línea Technic.

A continuación, una lista de las características técnicas del procesador principal, el “brick” NXT:

Microprocesador Atmel® 32-bit ARM® processor, AT91SAM7S256 256 KB FLASH 64 KB RAM 48 MHz
Co-procesador: Atmel® 8-bit AVR processor, ATmega48 4 KB FLASH 512 Byte RAM 8 MHz
Unidad de comunicaciones Bluetooth CSR BlueCore™ 4 v2.0 + EDR System Soporte de Serial Port Profile (SPP) 47 KByte RAM Internos



8 MBit FLASH Externos 26 MHz
Comunicación vía USB 2.0 (12 Mbit/s) 4 puertos de entrada con interfaz de 6 hilos y soporte para conexiones AD y DA 1 puerto de alta velocidad, IEC 61158 Tipo 4/EN 50170 compatible Todos los puertos de entrada cuentan con soporte del bus I ² C
Conectores de 6 hilos estándar industrial, RJ12 con ajuste a derechas
Display gráfico LCD de 100 x 64 píxel (blanco y negro) Área de visión de 26 x 40.6 mm
Botones de goma para interacción con el usuario
Altavoz de salida con resolución de 8-bit Soporta tasas de muestreo de 2 a 16 KHz

Tabla 7: Características del "brick" NXT de LEGO Mindstorms.

3.4.2. Motores.

La gama de motores existentes en la línea LEGO Technic es bastante amplia, contando entre sus modelos con aproximadamente 13 tipos diferentes de motor. Estos van desde los pequeños micro-motores hasta el más avanzado de estos, que no es otro que el motor incluido en el set del NXT. Este servomotor posee unas características óptimas en cuanto a respuesta y rendimiento, cuenta asimismo con un juego de engranajes reductores y un “encoder” rotacional en su interior.



Ilustración 56: Motor LEGO incluido en el paquete NXT



El juego de engranajes reductores dota de un par de fuerza elevado para el motor, lo que consigue una buena capacidad para realizar un esfuerzo mayor sin tener que contar con elementos externos como sucedía en modelos anteriores, y lo que es mucho más importante, impidiendo el sobreesfuerzo del motor y el posible perjuicio en su vida útil.

El “encoder” o tacómetro, tiene la función de permitirnos conocer el número de vueltas que ha dado el eje del motor con una precisión de 1 grado. Por tanto, si el motor realiza un giro completo, el tacómetro indicara un incremento de 360 unidades.

3.4.3. Sensores.

En este apartado se va a repasar y enumerar la variedad de sensores disponibles para el LEGO Mindstorms NXT, tanto los desarrollados y fabricados por la propia LEGO como aquellos diseñados, ensamblados y distribuidos por terceros pero que son plenamente compatibles con la plataforma NXT.

3.4.3.1. Fabricados por LEGO

El paquete completo de LEGO Mindstorms NXT incluye cuatro tipos de sensores oficiales:

- **Sensor de contacto o “bumper”:** detecta la presión realizada sobre la punta del sensor. Este sensor es útil para detectar colisiones, presencia de objetos o como mecanismo final de carrera.
- **Luz/Color:** este sensor tiene doble función: A) es capaz de detectar la presencia de luz en un entorno, B) a su vez es capaz de identificar un pequeño rango de colores de los objetos que percibe.
- **Sonido:** es un pequeño micrófono capaz de reaccionar y captar sonidos del ambiente.
- **Ultrasonidos:** permite detectar la presencia de objetos a una cierta distancia. Es capaz de medir las distancias. Este sensor puede realizar las mismas funciones que el sensor de contacto, pero con el añadido de no llegar al contacto físico.



Ilustración 57; Ladrillo LEGO con todos sus sensores y servomotores conectados a la vez.

3.4.3.2. Fabricados por terceros.

Hay empresas y desarrolladores externos, por ejemplo, Hi-Technic, realiza y comercializa con sensores compatibles con el NXT, de entre los cuales destacamos los siguientes:

- **Brújula:** funciona igual que una brújula al uso ya que permite conocer la orientación del robot respecto al norte magnético y traduce la información al lenguaje del robot.
- **Seguidor de infrarrojos:** es capaz de detectar el haz de un emisor en un ángulo de 135°, indicando así mismo la dirección desde la que proviene el haz de luz.
- **Acelerómetro:** muy en uso actualmente en dispositivos electrónicos como “tablets” y “smartphones”, el acelerómetro detecta aceleración en tres ejes y giro en uno.

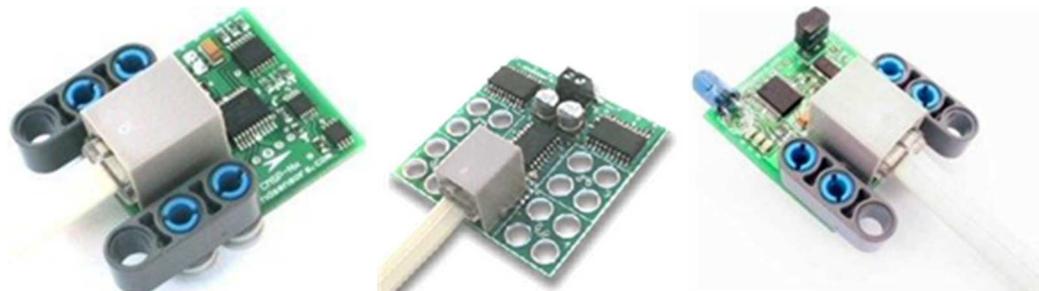


Ilustración 58: Sensores creados por desarrolladores externos a LEGO.

3.2.3.3. Personalizados

Es posible crear sensores propios y personalizados compatibles con el bus I2C.

3.4.4. Comunicaciones

El LEGO MINDSTORMS NXT introduce una mejora importante con respecto a su predecesor el “brick” RCX, ha sustituido la comunicación por infrarrojos, una tecnología a estas alturas discontinuada por la introducción a la comunicación inalámbrica por medio de la tecnología bluetooth. Las características del sistema adoptado son las siguientes:

Capas del sistema de comunicación:

La imagen a continuación muestra las partes de la comunicación entre el bloque de NXT y el software que se maneja desde el PC. Se puede ver que se establece una comunicación full dúplex entre el NXT y el PC, usando o no las comunicaciones cableadas. Hay que recalcar que el NXT es capaz de usar el protocolo SPP, permitiéndole así comunicarse vía bluetooth como si se tratase de un puerto serie normal.

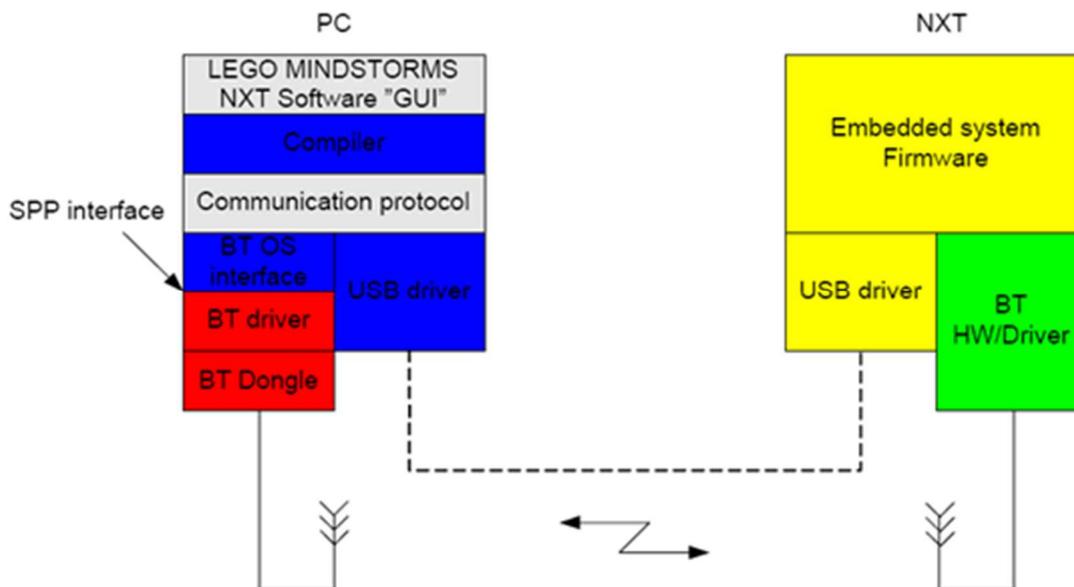


Ilustración 59: Diagrama de bloques de comunicación entre PC-NXT.

Hay que tener en cuenta a la hora de mandar contenido por bluetooth, que este debe respetar un protocolo establecido, pues de no ser así pueden existir problemas cuando se transmiten ráfagas de información.

3.4.5. Software

El código del *firmware* del “brick” es de libre distribución, por lo que se puede adaptar a diferentes sistemas operativos. Este hecho ha provocado una gran acogida por parte del mundo académico y del entorno amateur aficionado a la electrónica y la robótica. Por tanto, numerosos desarrolladores y grupos de programación han desarrollado aplicaciones que controlan los sensores, los motores, las comunicaciones, etc.

Cada lenguaje de programación tiene sus ventajas y sus inconvenientes, no se podría establecer ninguno como el ideal para cada aplicación, igualmente que tampoco existe en la informática un lenguaje de programación universal y valido para todo, ya que cada uno está determinado en función de la aplicación que se quiera darle y de las características requeridas para llevarlo a cabo.



En los siguientes puntos se citarán aproximadamente todos los lenguajes de programación que se utilizan con el paquete Lego Mindstorms para compararlos entre sí y ver qué funciones un lenguaje nos ofrece más facilidades y rapidez que otros.

3.4.5.1 Lenguajes comerciales

- **NXT-G:** En el paquete LEGO MINDSTORMS viene incluido un CD con el software oficial del mismo, aunque se encuentra disponible también en su web siempre en la versión más actualizada. Está basado en Labview, es un lenguaje de programación en un entorno gráfico en el que se diseñan los programas conectando bloques en secuencia. Es principio es sencillo de programar, muy intuitivo y ágil a la hora de componer un programa. Fue realizado junto a National Instruments. Previamente esta empresa desarrolló el lenguaje Robolab que era mucho más parecido al Labview.

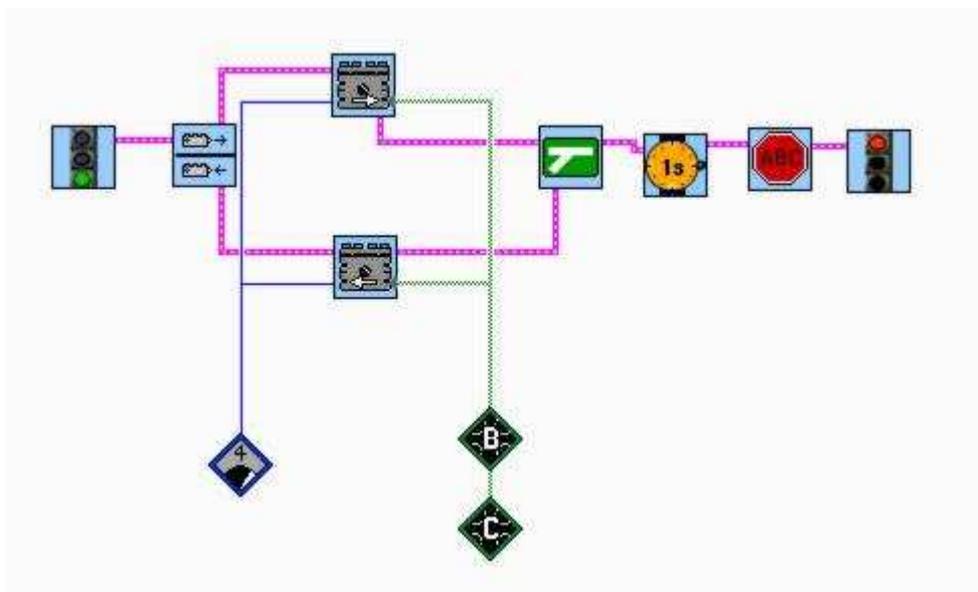


Ilustración 60: Entorno de programación Labview

Es compatible con Mac OS X y Windows. Dispone de dos versiones, LEGO NXT comercial y LEGO NXT educación, básicamente es el mismo paquete de software, aunque tienen algunas diferencias, por ejemplo, la versión educativa está traducida al español, y contiene también un tutorial para aprender las nociones básicas de cómo utilizar los bloques de programación. El software en sí funciona a base de iconos, disponiendo de tres paletas de bloques de programación: la primera es la básica y



prácticamente comprende los bloques a utilizar en el aprendizaje más sencillo; la segunda es la versión completa con todos los sensores y dispositivos, permitiendo utilizar todo el abanico de bloques; en la tercera tendremos los bloques creados por el usuario.

Este software además nos permite saber el estado en todo momento de la posición de los motores y las lecturas de los sensores conectados. Conexión que podremos tener en todo momento ya sea vía USB o por medio del bluetooth, en ese caso de forma inalámbrica. Quizás el problema de este lenguaje es que está destinado a un ambiente puramente educativo y de ocio, con lo que el aprovechamiento de esta herramienta para problemas y desarrollos más complejos se queda corto.

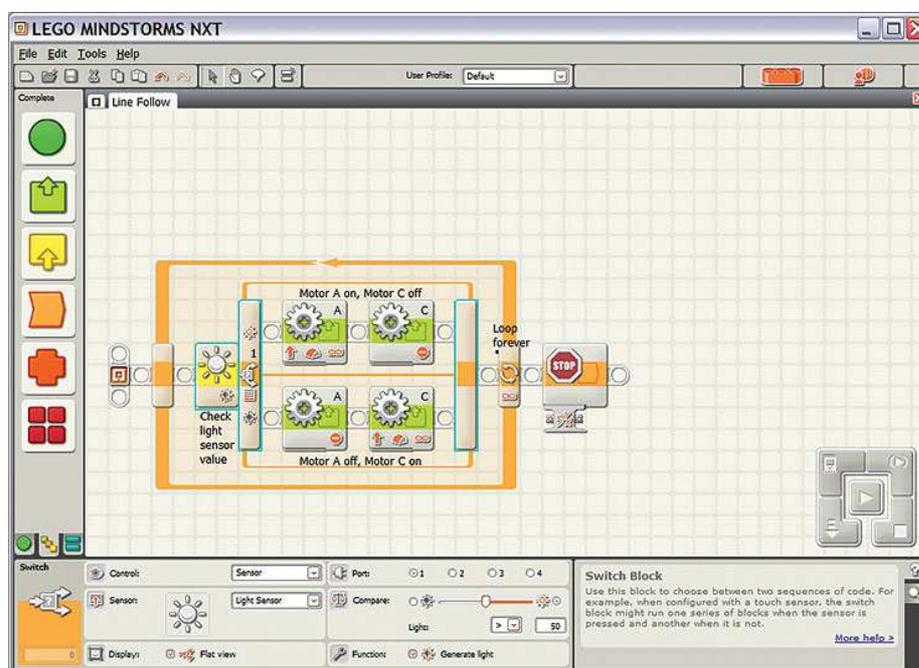


Ilustración 61: Software de programación gráfica NXT-G.

Posteriormente este software se ha ido actualizando, y más aún cuando por la salida al mercado del nuevo modelo de “brick”, este ha venido acompañado de una revisión del software de programación nativo de LEGO, LEGO MINDSTORMS EV3 es la versión más actual del software de programación. Este nuevo software es retro compatible con el “brick” NXT.

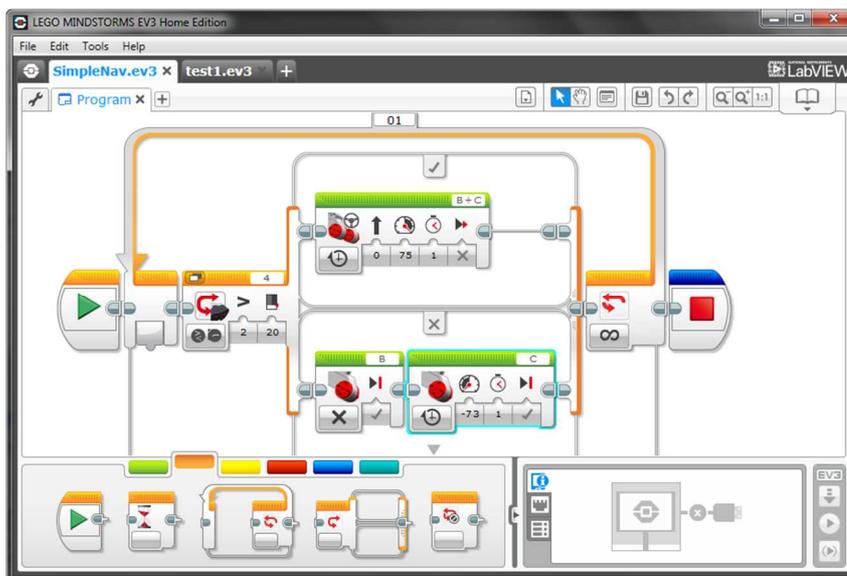


Ilustración 62: Versión más actual del software de programación de LEGO, MINDSTORMS EV3.

- **ROBOTC:** Es un lenguaje de programación basado en el conocido lenguaje de programación C en este caso específicos para robots. Utiliza un firmware algo más rápido que el original. La interfaz de programación es similar a la usada en C, en las que iremos rellenando las líneas de código acorde a las necesidades y especificaciones que queramos darle al robot en cuestión. La aplicación de RobotC incluye ayudas al rellenado de código, una barra lateral donde se describen las funciones y un depurador para verificar y chequear las secuencias de código y así poder comprobar los posibles errores cometidos. Una vez se tenga el código listo en el programa, se traduce a código máquina para introducirlo en la memoria del robot y que sea capaz de ejecutarlo.

3.4.5.2. Lenguajes de libre utilización.

- **BricxCC:** También llamado Bricx Command Center es un ambiente de desarrollo integrado (o IDE, que son las siglas de *Integrated Development Environment* en inglés), desarrollado por John Hansen para el sistema operativo *Windows*, pero de licencia abierta. Desde este entorno se puede programar para NBC (*Next Byte Codes*), NQC (*Not Quite C*) y NXC (*Not eXactly C*) y al contrario que RobotC no necesita utilizar *custom firmware*, ya que se conecta por bluetooth al robot LEGO y es compatible con el *firmware* original.



- **NBC (Next Byte Codes):** NBC es un lenguaje simple con el cual el programador puede comunicarse y así programar el “brick” usando el intérprete “byte-code” que tiene el “brick” NXT. El compilador traduce el programa realizado del código fuente a un código directamente en *bytes*, que puede ser ejecutado directamente con el “brick”. Este lenguaje puede ser editado y controlado desde el software antes visto de BricxCC.
- **NXC:** Estas siglas son las de *Not eXactly C*, es decir, este lenguaje es muy parecido a C, pero no es exactamente C. Desarrollado también por John Hansen, NXC es un lenguaje de alto nivel³, el pre procesado y las estructuras de control con este lenguaje son similares a C, pero después el compilador NXC al igual que NBC, traduce un programa fuente a códigos de bytes para poder ejecutarlos directamente en el “brick”. Al igual que el citado lenguaje, usa el firmware original de LEGO y está disponible para *Windows*, y se puede utilizar en el IDE BricxCC.
- **leJOS NXJ:** lejos son las siglas de *Lego Java Operating System*, entonces es claro afirmar que este lenguaje de programación está escrito en lenguaje Java. Al contrario que algunos programas ya vistos previamente, lejos no utiliza el *firmware* original de LEGO, utiliza de hecho uno propio. Básicamente consiste en una máquina virtual de Java, una interfaz de programación de aplicaciones (o API en sus siglas en inglés) y una herramienta de actualización del *firmware* y descarga de código. Este sistema operativo ocupa prácticamente la mitad de la memoria RAM del NXT. Para programar se puede utilizar el Kit de Desarrollo de Aplicaciones de JAVA (JDK).

³ Un **lenguaje de programación de alto nivel** se caracteriza por expresar el algoritmo de una manera adecuada a la capacidad cognitiva humana, en lugar de la capacidad ejecutora de las máquinas.



3.4.5.3. Otros

Hoy en día existen aún más lenguajes de programación y entornos de programación compatibles para los paquetes de LEGO Mindstorms, entre los que podemos destacar los siguientes: **pbLua**, **lejos Oseek** y también **ICON**, como lenguajes de programación.

Cabría mencionar también que se puede desarrollar *software* para controlar el “brick” de LEGO desde el *software* matemático de **MATLAB** (*MATrix LABORatory*) y desde **Simulink**, el entorno gráfico de programación visual que funciona sobre MATLAB.



CAPÍTULO 4: BRAZO ROBÓTICO PARA LIMPIEZA DE PLACAS SOLARES



4. BRAZO ROBÓTICO PARA LIMPIEZA DE PLACAS SOLARES

4.1 Introducción

Como se ha descrito anteriormente, el objetivo primordial de este proyecto, no es otro que la construcción de un robot autómatas para la ejecución de la limpieza de una o varias placas solares. La problemática de las pérdidas por suciedad en los paneles solares, nos anima a buscar una solución en la automatización de esa limpieza y así poder mejorar el rendimiento atribuible a la suciedad acumulada en espejos o placas solares.

El origen se encuentra en la disminución de la potencia de un generador fotovoltaico por la deposición de polvo y suciedad en la superficie de los módulos fotovoltaicos. Cabría destacar dos aspectos:

- A) Disminución de la corriente y tensión entregada por el generador fotovoltaico por la presencia de una suciedad uniforme.
- B) Aumento de las pérdidas de *mismatch*.⁴ La presencia de suciedades localizadas (como puede ser el caso de excrementos de aves) puede generar variación en las potencias generadas.

Para la construcción física del robot, se barajó en un primer momento crear un robot basado en *arduino* con piezas realizadas en metacrilato o incluso impresas mediante impresión 3D, adquiriendo el resto de componentes comunes en el mercado electrónico, pero se ha optado por desarrollarlo al final con el paquete LEGO Mindstorms NXT 2.0, ya que el Departamento de Informática de la E.I.M.I.A disponía de dos paquetes de la citada plataforma, y dicho paquete contiene todos los elementos necesarios para poder desarrollar el proyecto.

Básicamente, LEGO Mindstorms NXT 2.0 es una plataforma para el diseño y desarrollo de robots, que sigue la filosofía DIY (Do It Yourself, “Hágalo usted mismo”)

⁴ Pérdidas de mismatch (o de conexión) son pérdidas energéticas originadas por la conexión de módulos fotovoltaicos de potencias ligeramente diferentes para formar un generador fotovoltaico.



de la marca LEGO, armar y construir todo tipo de objetos con la sencillez de unir sus bloques interconectables.

Aunque pueda parecer a primera vista que esta plataforma es un sencillo juego de robótica, la plataforma LEGO MINDSTORMS, ha adquirido un interés ya constatado en entornos educativos de cualquier índole. Desde primaria hasta niveles universitarios, pasando por la secundaria y módulos formativos especializados, el carácter didáctico del paquete educativo de LEGO, se utiliza para impulsar el desarrollo cooperativo ente lo alumnos y profesores, usando técnicas de aprendizaje basado en proyectos.

El carácter lúdico y de entretenimiento, de este paquete también se utiliza como herramienta para introducir a los alumnos de primaria y secundaria, los conceptos básicos de programación a través de actividades interactivas con el paquete LEGO. También en enseñanza secundaria en una aproximación al mundo de la ingeniería. Sin embargo, es en el entorno del mundo universitario donde está causando más impacto y aceptación, debido a que proporciona múltiples campos donde puede ser utilizada y explorada en proyectos más complejos a la par que didácticos, ya que es una plataforma potente y con un coste reducido.

4.2 Diseño del Brazo Robótico Móvil.

El diseño del brazo robótico debe conformarse en base a las necesidades funcionales de los objetivos marcados al inicio. Debe ser capaz de realizar dos movimientos diferentes e ir alternándolos según las condiciones del momento y ubicación en cada caso.

Hay dos movimientos necesarios para conseguir el correcto funcionamiento:

- 1) **Movimiento de avance paralelo a las placas:** el objetivo de limpiar toda una hilera de placas colocadas en serie a lo largo de una línea horizontal, debería ser cumplido por un movimiento de desplazamiento horizontal que permitiera esa limpieza por medio del otro movimiento que se desarrollará conjuntamente.



2) **Movimiento de limpieza con el brazo articulado:** para efectuar la limpieza se requiere un brazo articulado que sea capaz de recorrer la superficie inclinada de un panel solar. Este movimiento debe ser capaz de ir, dentro de su recorrido, desde la parte superior del panel a la parte inferior del modo más uniforme y vertical posible.

Estos movimientos del robot deben, mediante software, ser capaz de coordinarse en función de las condiciones físicas del sistema posicional de la serie de placas. Se debe construir un robot que sea capaz de realizar dichos movimientos y sea capaz de portar en su estructura el brazo robótico y ser capaz de desplazarse.

El objetivo tanto estructural como de funciones es el siguiente:

Estructura	Funciones
Diseñar estructura capaz de portar un brazo robótico con estabilidad.	Capaz de desplazarse sobre la superficie paralelamente a la línea de paneles.
Disponer de sistema de desplazamiento al menos en dos direcciones.	Capaz de realizar movimientos con el brazo en el plano perpendicular al panel.
Buena relación masa-volumen.	Detectar cuando empezar y terminar la limpieza.
Amplitud de movimiento del brazo robótico.	Desplazarse entre barridos de limpieza y entre placas.

Tabla 8: Objetivos y funciones del brazo robótico limpiador.

Para cumplir estos objetivos y poder realizar estas funciones se va a analizar desde las partes que compondrán este robot, hasta la evolución del desarrollo buscado. Se describirán las fases por las que ha pasado el diseño, solventando los problemas encontrado y remarcando las diversas soluciones dadas a estos problemas.



4.2.1 Componentes del Robot

El componente más importante de todo el robot es el microprocesador, al que LEGO le ha añadido una carcasa. Este microprocesador, conocido en su conjunto como “brick”, se conforma además con una pantalla y botones, para poder interactuar y ver acciones y comandos. Tanto arriba como debajo de la carcasa encontramos la conexión de sensores y actuadores que son muy sencillas de utilizar, por simple presión en cualquiera de las puertas y en cualquier posición, conectamos un sensor o un motor sin dificultad, uniéndolos con cables y clavijas muy similares a las utilizadas “routers” e instalaciones de telefonía.

Las piezas de Lego tienen múltiples formas y tamaños, lo que nos permite construir diversas estructuras, usando los bloques como “ladrillos”, “vigas”, “palancas”, “tirantes”, “poleas”, “engranajes”, etc. Mediante un PC, se realiza la programación del “brick”, usando diferentes programas y lenguajes. Mediante esta plataforma tenemos la posibilidad de construir varios tipos de robots y programarlos, pudiendo tener múltiples variantes de los mismos, controlados o autónomos.

Se decidió diseñar un **robot autónomo** en este proyecto, ya que era fundamental que el control estuviera integrado en el propio robot, es decir, los programas de ejecución se encuentran embebidos en el propio robot, en este caso en la memoria del “brick”.

En este proyecto, conformaremos el movimiento del robot mediante el lenguaje de programación nativo del paquete **LEGO MINDSTORMS EV3**, ya que también es compatible con la versión NXT 2.0. y es una versión mejorada y más completa del anterior software. En él se puede programar gráficamente, mediante bloques de acciones, cualquier programa que queramos introducir en la memoria del brick de LEGO.

Esta plataforma nos ofrece una serie de ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- ❖ **La facilidad de montaje y desmontaje** de sus componentes. Ya que las uniones entre las piezas son sencillas, rápidas e intercambiables. Teniendo una gran versatilidad y posibilidades de diseño.



- ❖ **La comunidad de desarrollo en Internet es muy amplia**, hay multitud de trabajos, guías y todo tipo de información en foros especializados, entidades educativas e incluso soporte oficial.
- ❖ La **posibilidad de añadir ampliaciones** con bloques independientes y packs de ampliación oficiales e incluso compatibles fabricados por terceros
- ❖ Al tener una gran comunidad detrás y dada la versatilidad y ser un sistema abierto, hay lugar a **múltiples posibilidades en el apartado de la programación**, ya que es posible manejar y programar el “brick” con múltiples lenguajes de programación.
- ❖ Muy **indicado para entornos educativos**, desde colegios a universidades, pues se puede aprender de forma fácil tanto mecánica y electrónica, como informática y programación.

Desventajas:

- ❖ Al igual que una de sus ventajas es la facilidad y rapidez de montaje gracias a los bloques de piezas. También se puede tornar como desventaja el propio montaje de los mismos ya que las estructuras formadas pueden ser desarmados por sencillos golpes pues las **uniones no son del todo duraderas y el propio desgaste de movimientos debilita las fijaciones**.
- ❖ Hay que tener en cuenta la disposición de la parte donde se ubica la batería del “brick”, pues con uso de la alimentación por pila conllevaría la apertura de la tapa que las contiene para sustituirlas. Como existe, y se le ha dado uso de la batería recargable de Lego, aun **hay que tener en cuenta en el diseño de dejar vía libre para poder conectar a la red la toma de corriente del citado brick**.
- ❖ Otro problema que sucede por el propio diseño del robot es la relación masa-volumen. Ya que **una construcción demasiado liviana se vencería por el propio**



movimiento del robot. Se debe tener en cuenta para el diseño los posibles movimientos que surgirán y la relación de estos con la estructura del robot, pues debemos pensar en estabilizar correctamente la estructura con amplio margen para evitar caídas o volcados que deterioren el montaje.

- ❖ **Precio.** Obviamente siendo un paquete de desarrollo con limitadas piezas y componentes, está claro que el precio aun siendo elevado, puede ser poco atractivo para según que usos. Para determinados proyectos está claro que sería más económico la adquisición de otros materiales para realizarlos. Pero al ser una plataforma dedicada en gran parte al campo de la didáctica y enseñanza, se sobreentiende que es un producto con múltiples usos y reutilizaciones para uno o varios proyectos. Desde ese punto de vista el precio ajustándonos a la relación calidad-precio estaría bien justificado.

El paquete LEGO Mindstorms contiene:

- El bloque NXT: el cerebro controlado por ordenador del robot Mindstorms.
- Sensor de tacto: permite al robot sentir y reaccionar al entorno mediante el tacto.
- Sensor de color: puede detectar luz y diferenciar colores.
- Sensor de ultrasonidos: permite al robot medir distancias y reaccionar al movimiento.
- Servomotores: asegura los movimientos del robot con precisión controlada.



Ilustración 63: Paquete comercial de LEGO Mindstorms NXT 2.0.



El bloque NXT

El bloque NXT es la pieza fundamental del LEGO MINDSTORMS, ya que en ella se encuentra el procesador y la memoria donde se encuentra toda la parte lógica y electrónica que permite la mayoría de las acciones del robot, almacenándose los programas que se pueden cargar en su memoria interna, y guardándose allí el *firmware* básico para el control de los distintos dispositivos que se pueden conectar al bloque.



Ilustración 64: Partes del bloque NXT

Para ello, como ya se dijo anteriormente en este documento, el “brick” está compuesto por un microprocesador ARM-7 de 32 bits, el AT91SAM7S256 de Atmel. Este microprocesador de arquitectura Risc, incluye 256 KB de memoria flash (no volátil), 64 kB de RAM (volátil) y una velocidad de funcionamiento de 48 MHz.

Posee cuatro botones en el frontal, para navegar por la interfaz y poder manejar los programas y sensores, poder elegir los programas instalados, configurarlos y ejecutarlos. También se puede ver en la pantalla, el estado de los sensores o crear pequeños programas sin necesidad de utilizar el ordenador y programas adicionales. El botón de color naranja, tiene las siguientes funciones: Encendido, confirmación de acción y comenzar (ON, ENTER y START, en inglés). Las flechas de color gris indican las direcciones donde moverse en los menús y el rectángulo gris oscuro es para retroceder y limpiar la pantalla (GO BACK y CLEAR respectivamente).



Como puertos de E/S (entrada y salida), el “brick” tiene 8 en total, siete de ellos se unen mediante conectores muy similares a los de tipo telefónico. Tienen 6 hilos, pero con la ranura a la derecha en vez de en el medio como el del teléfono, lo que impide utilizar clavijas estándar y tener que utilizar las exclusivas LEGO. El puerto que falta es el conector de USB con el que se puede establecer una conexión con un PC y software compatible.

Los sensores que usaremos en este proyecto son los siguientes:

Sensor de Tacto



Ilustración 65: Sensor de tacto de LEGO Mindstorms

El sensor de contacto permite detectar si el “brick” al que está conectado ha tocado con la parte exterior y móvil del sensor o no algún objeto que se encuentre en su trayectoria inmediata. Al tocar una superficie, una pequeña parte retráctil se contrae, permitiendo que una pieza dentro del bloque cierre un circuito eléctrico, comience a circular energía, provocando así una variación de energía de 0 a 5 V que indicará que el sensor de tacto ha sido activado.

En este proyecto se barajó utilizar este sensor en una versión previa del montaje, para comprobar cuando ha tocado la pala de limpieza la placa y saber cuándo deja de tocarla, se descartó por la problemática que surgía a la hora de localizar el lugar en la pala de limpieza para no interferir en los procesos de la misma.

Sensor de Ultrasonidos

El sensor de ultrasonidos es capaz de detectar un objeto y medir la distancia a la que se encuentra, tanto en pulgadas como en centímetros, hasta una distancia de 2,5 m con una precisión de +/-3 cm. Este sensor funciona igual que como lo hace un radar o un



sonar. Envía ondas de sonido en una frecuencia muy alta y mide el tiempo que el "eco" (el rebote de las ondas) de sonido tarda en regresar al sensor.



Ilustración 66: Sensor de ultrasonidos de LEGO Mindstorms

Utilizando el mismo principio del eco, el sensor es capaz de recibir la información de los distintos objetos mediante la proyección y recogida del sonido cuando este choca con algún elemento dentro del campo de detección. El sensor funciona bastante mejor cuando las señales ultrasónicas que recibe viene de superficies lisas, grandes y estáticas. Por el contrario, los objetos pequeños, curvos o suaves, como pelotas, pueden ser muy difíciles de detectar.

En nuestro proyecto recibe un papel fundamental, ya que es el sensor que se utiliza para medir las distancias de las placas y la profundidad de las mismas, determinando el tipo de la placa y, por medio de los bloques de programación específicos que se verán en el apartado del software, será este sensor el que marque las rutinas a seguir según sea un caso u otro.

Servomotores

Como ya hemos visto los motores de Lego Mindstorms no son motores convencionales, sino motores conocidos como servos, **¿cuál es la diferencia?**

La diferencia es que en un motor eléctrico convencional se le aplica energía al motor y este empezará a girar dependiendo de la cantidad de energía aplicada. Pero esto nos trae un problema. La dificultad de controlar la cantidad de energía aplicada, sobre todo si esta proviene de baterías que pueden estar nuevas o ya gastadas.

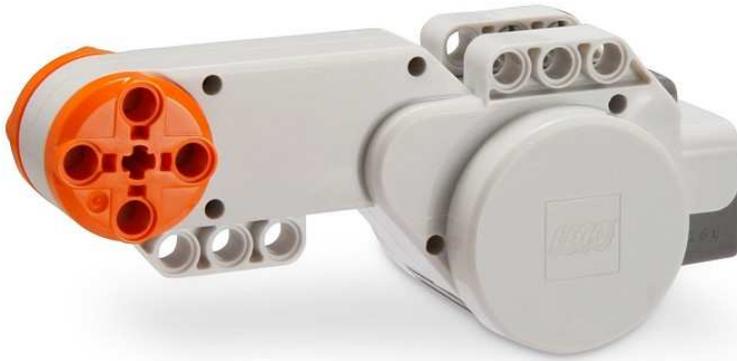


Ilustración 67: Servomotor de Lego Mindstorms

Ahora bien, los servos además de incluir un motor eléctrico convencional también incluyen un sensor de posición. Este sensor nos permite saber a qué velocidad se está moviendo nuestro motor, y corregirla si es necesario. Además, podemos saber exactamente cuántos grados ha girado el motor en todo momento. Con esto tenemos un control muy preciso del movimiento de nuestro robot.

En este proyecto usaremos el máximo permitido por el “brick” de Lego, usaremos tres servomotores, uno para el carro móvil y dos para el brazo articulado.

Equipo adicional utilizado

Como hemos visto, una de las desventajas es el elevado consumo de baterías, cuando se usan pilas convencionales del tipo AA y las limitaciones a la hora de construir el robot, por el inconveniente de tener que desmontar y volver a montar parte de la estructura del robot para su reposición. Este inconveniente se solucionó con la adquisición de la batería de litio-ion recargable diseñada para el bloque Mindstorms NXT y su cargador



Ilustración 68: Batería y cargador para el "brick" de LEGO Mindstorms



4.2.2. Versiones del robot.

A continuación, se describirán los distintos montajes que se han ido probando en un desarrollo progresivo para encontrar el montaje y la disposición que nos de la mejor solución al problema propuesto de la limpieza de una placa solar, y que mejor se adapte a las condiciones vistas al inicio de este capítulo.

Mediante pruebas previas y remarcando las ventajas e inconvenientes de cada una de las versiones iremos mostrando los distintos desarrollos y montajes de las versiones del robot limpiador.

4.2.2.1 Robot limpiador con doble procesador (dos “bricks”).

Para el primer montaje se pensó en la posibilidad viable de que al tener dos packs de Lego Mindstorms, un “brick” fuera destinado al movimiento del carro y otro “brick” al movimiento de brazo exclusivamente.



Ilustración 69: Robot limpiador con doble “brick” (de perfil)

En un primer momento se seleccionó esta posibilidad pues al tener dos “bricks” se dispondría de una configuración con el doble de puertos con lo que poder colocar más



servomotores que utilizando solo uno de los “bricks” disponibles, pues cada “brick” dispone de tres puertos para servomotores y cuatro para sensores.

Con esta configuración la disposición sería de la siguiente forma:

brick A (carro)	brick B (brazo)
<ul style="list-style-type: none"> - 2 servomotores realizando la función motora para el desplazamiento en todas direcciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - 3 servomotores para manejar los tres ejes del brazo robot - 1 sensor de tacto

Tabla 9: Configuración de los elementos de cada "brick" en el prototipo.

La parte del carro se compone de dos servomotores que se disponen a modo de tracción delantera del carro, y junto a piezas de lego formamos un entramado que sirve como estructura para mantener estable la parte superior. En la parte trasera del chasis se introducen las ruedas traseras a modo de eje trasero conformando la planta del carro y base de todo el robot. Para estabilizarla parte delantera y con vistas a incorporarla en un carril guiador se dispuso una quinta rueda más avanzada que las tractoras.

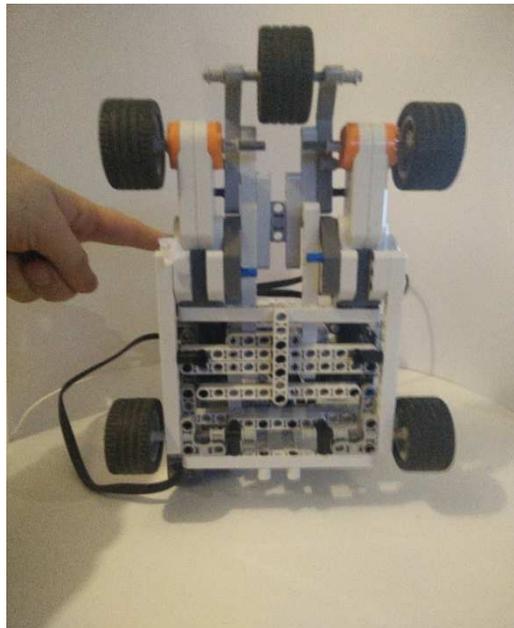


Ilustración 70: Robot limpiador con doble "brick" (desde abajo)



Ilustración 71: Robot limpiador con doble "brick" (frontal)

En la vista frontal podemos distinguir tres partes diferenciadas:

- Base del carro.
- Bloque de "bricks".
- Brazo articulado.

Con este montaje el par de bloques en oposición al brazo articulado permitía un equilibrio en todas las fases de movimiento, aun con el brazo totalmente opuesto y en posición paralelo a la horizontal.

En la parte de la pala de limpieza lleva un sensor de tacto para realizar la función de comprobador de proximidad sobre las placas a limpiar, funcionaría a modo de interruptor para iniciar las rutinas

de limpieza.

Este diseño **fue descartado** por diversos motivos:

- 1) Tenía el gran inconveniente de la **imposibilidad de comunicación y sincronización de los dos "bricks"** entre ellos. La sincronización por tiempo entre las distintas tareas que manejaba cada uno daba lugar muchos errores en el funcionamiento del autómata.
- 2) **Todos los movimientos debían ser automáticos y prefijados.** Cualquier variación en el sistema de manera externa conllevaba al fallo del proceso de limpieza, ya que des coordinaba la secuencia prefijada.
- 3) **La utilización de solo un sensor se quedaba corta para poder determinar la presencia de una placa.**



Montaje con un solo “brick”.

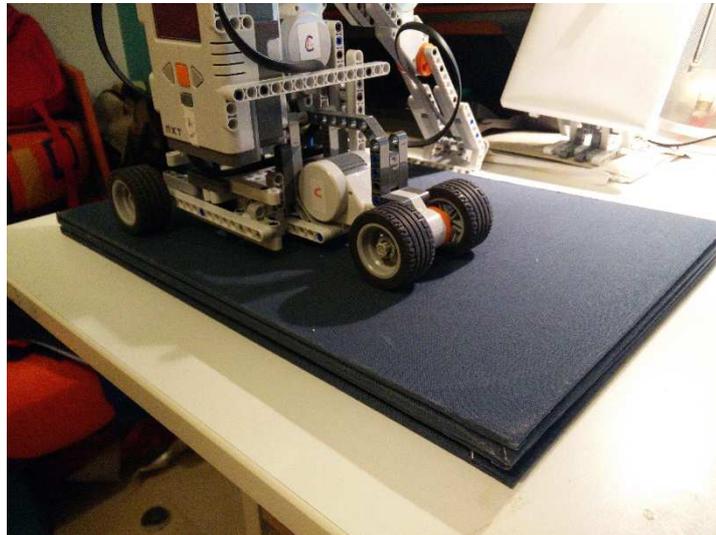


Ilustración 72: Robot con un solo "brick"

Buscando la simplificación y la solución del mayor problema del diseño previo, se decidió por probar un diseño diferente que eliminara uno de los “bricks”, y al realizarlo, por consiguiente, se debía descartar el uso de los cinco servomotores usados previamente y pasar a tres, que es lo máximo que permite por “brick”.

La configuración pasaría a ser la siguiente:

- “Brick” A (robot limpiador).
- Puerto A: Servomotor A; Función: Motor del carro.
- Puerto B: Servomotor B; Función: Eje superior del brazo.
- Puerto C: Servomotor C; Función: Eje inferior del brazo.

El cambio de pasar de contar con dos “bricks” a contar solo uno, nos reduce notablemente el número de elementos, por tanto, el diseño se simplifica y disminuye el tamaño. Como también se ha cambiado el brazo y ha pasado de tener tres servomotores a dos, también ha cambiado su configuración y habría que simplificar el movimiento.

La parte del chasis de la base ha variado al sustituir los dos servomotores por uno solo, siendo la configuración parecida a un triciclo, pero con doble rueda en el servomotor tractor.



La gran ventaja de este diseño es que soluciona el problema de la comunicación entre “bricks”, y con este bloque en singular, podemos incluir en el mismo programa todo el proceso de limpieza.

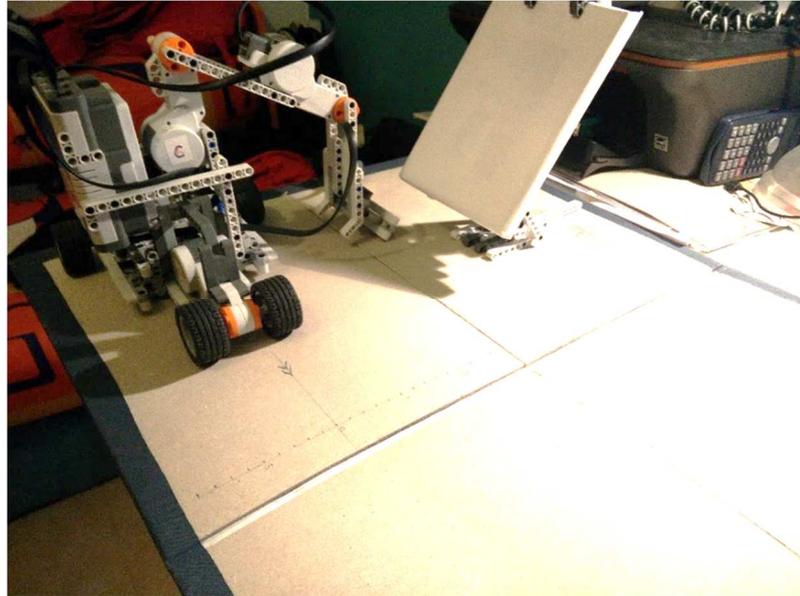


Ilustración 73: Robot con un solo "brick" sobre campo de pruebas.

A estas alturas de montaje, se diseñó una base en la que probar el prototipo, y la realización de una maqueta para hacer las funciones de placa solar para el banco de pruebas y test que vamos a ver en el punto siguiente.

Las dimensiones de la base de pruebas son 75 x 52 mm. Se compone de cuatro láminas de cartón contra colado, unidos con cola blanca de carpintero sobre una lámina de tela de encuadernar, fabricando una tabla muy similar a los tableros de juegos de mesa de gran calidad. Es plegable y resistente incluso al vertido de fluidos, condición necesaria para la siguiente modificación que vamos a ver en el diseño.

Este diseño todavía no es válido por diversos motivos:

- 1) Aún solucionando el problema de la comunicación entre dispositivos, el programa sigue siendo demasiado automático, **pues el movimiento programado** se realiza acorde a las dimensiones espaciales tanto de la placa como del robot, y **puede ser dar lugar a errores**. Carece de sensores de navegación y proximidad y estos



pueden darle más control y precisión al movimiento del robot y de las fases de limpieza. Se solucionará añadiendo el Sensor de Ultrasonidos.

- 2) **Carece de sistema hidráulico para realizar la limpieza de la placa.** La utilización de algún tipo de depósito de agua para facilitar la limpieza es fundamental para simular el funcionamiento buscado como actualmente se realiza con pértigas y otros sistemas de limpieza en placas solares.
- 3) **Presenta algún problema de estabilidad** al usar el brazo articulado. Pues aun siendo el brazo más corto que la versión anterior, al haber perdido también uno de los contrapesos y reducir las dimensiones en general, al realizar movimiento con el brazo extendido presenta ciertos balanceos estructurales.

4.2.2.3. Mejoras al robot de un solo “brick”:

Una vez adoptando la solución de usar un único “brick” para el control de todo el autómeta, se decidió por usar un único programa para controlar todo el proceso. Como hemos visto en el apartado anterior del segundo diseño, únicamente había que pulir ciertos problemas tanto en el *software*, para controlar mejor la toma de decisiones y secuencias; como en el *hardware*, para incorporar un sistema de limpieza con fluido y mopa de limpieza.

La incorporación de un depósito para el líquido detergente, añadiendo un recipiente plástico fijado a modo de cesto con dos ruedas de apoyo. Se incorpora el movimiento de humedecer la mopa de limpieza antes de cada pasada y a la par se mejora la estabilidad general. También se envuelve la parte de la pala de limpieza con tejido absorbente a modo de bayeta de limpiar.

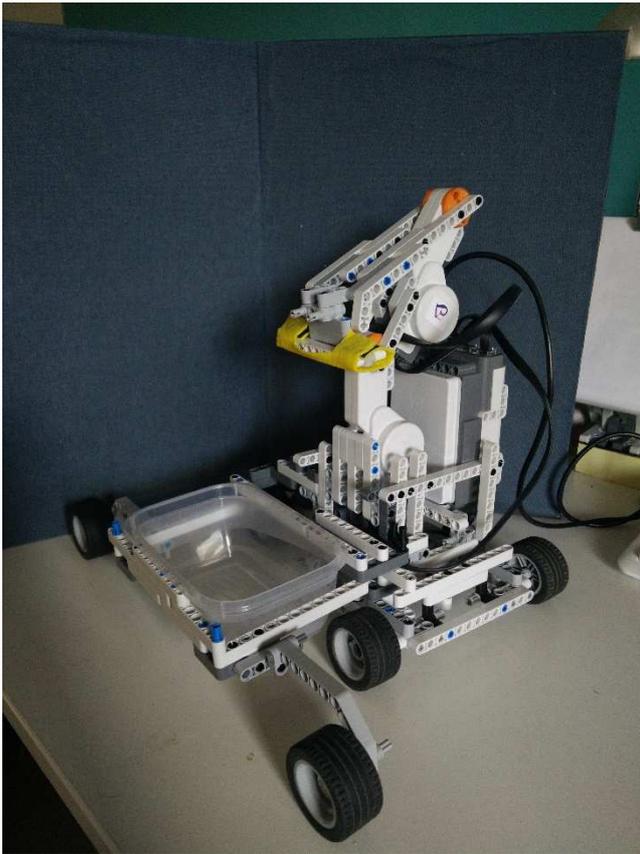


Ilustración 74: Robot limpiador de un solo "brick" con depósito y mopa.

La segunda mejora es la **incorporación del Sensor de Ultrasonido en la parte superior del brazo articulado**. Se coloca después del servomotor B para estar lo suficientemente cerca de la parte de la pala y lo necesario para no humedecerse cuando la pala de limpieza se deposite en el líquido detergente.

Esta incorporación es determinante pues marcará la pauta a la hora de programar con el entorno de Lego Mindstorms EV3.

También hay que remarcar la incorporación de una esponja adherida a la mopa de limpieza para realizar un barrido más eficiente por la superficie de la placa, ya que tiene una capacidad de absorción de líquido mejor y evita goteos innecesarios, dejando a su paso una superficie homogénea de líquido detergente.

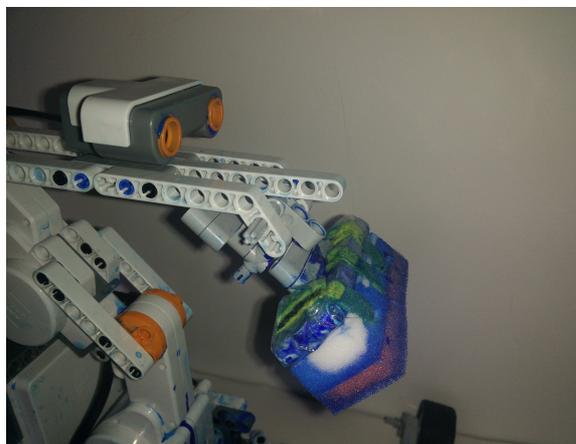


Ilustración 75: Diseño mejorado de la mopa de limpieza.



Este diseño será el adoptado para realizar las pruebas definitivas por el buen resultado en ensayos previos, y por contener las características buscadas para hacer frente a la tarea que nos marcamos como objetivo.

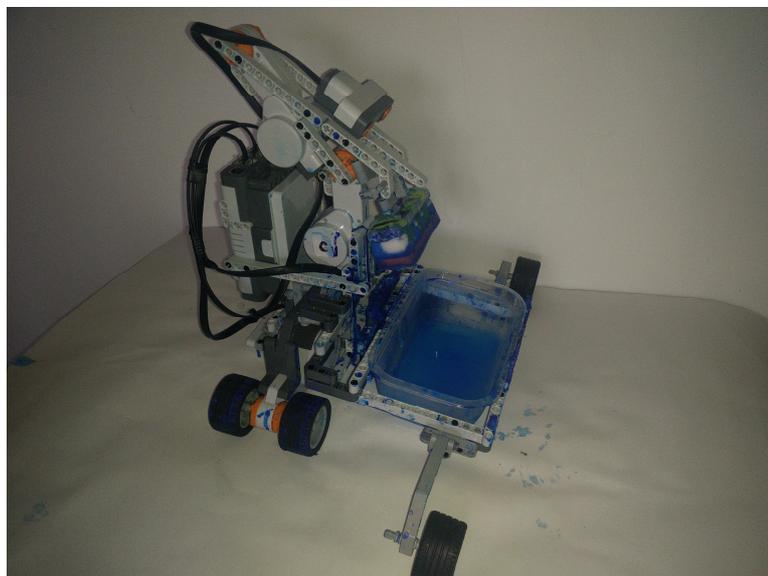


Ilustración 76: Vista general del Robot limpiador definitivo después de pruebas.

4.2.3. Representación gráfica 3D del modelo definitivo.

Para poder realizar unas posteriores explicaciones, tanto de la parte matemática, como de la programación del robot y la explicación de sus movimientos, se va a realizar una representación a escala y detallada del modelo usado para el objetivo de este proyecto.

Se ha utilizado para este fin el *software* Lego Digital Designer, pues en sus librerías tiene cargado todas las piezas y partes que componen este robot, excepto los añadidos como el depósito de líquido limpiador y la esponja de la pala de limpieza. En dicho programa podemos representar a escala todas las piezas y uniones realizadas con total precisión. Es muy útil para realizar esquemas de montaje e instrucciones para posteriores usos y montajes.

Una vez realizado el montaje digital de todas y cada una de las piezas el resultado sería este:

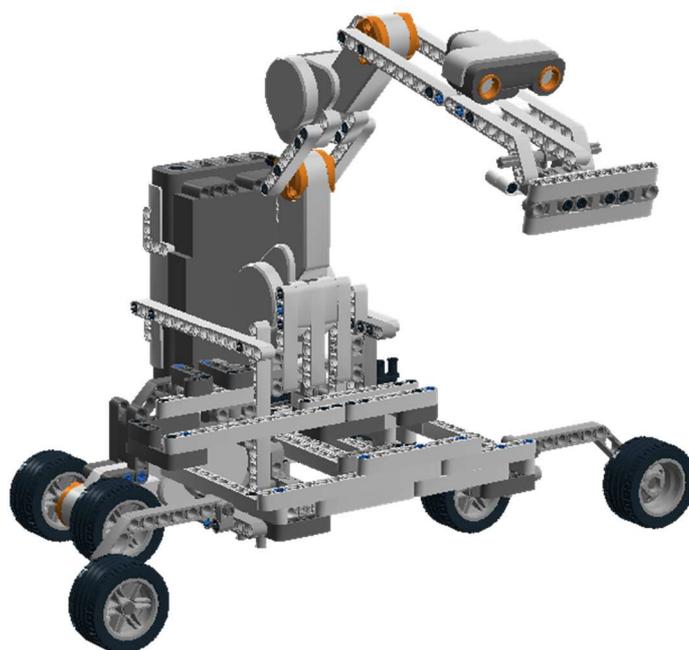


Ilustración 77: Representación 3D por Lego Digital Designer del modelo final de robot (vista frontal)

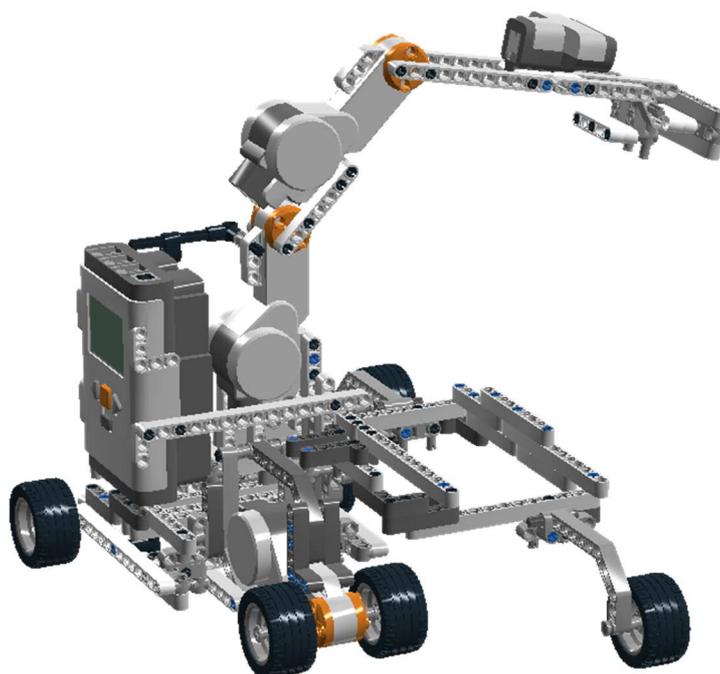


Ilustración 78: Representación 3D por Lego Digital Designer del modelo final de robot (vista trasera)

Para dar nombre a todas las partes del robot que se verán de aquí en adelante se va a proceder a nombrar y enumerar las diferentes partes de la estructura y componentes del robot:

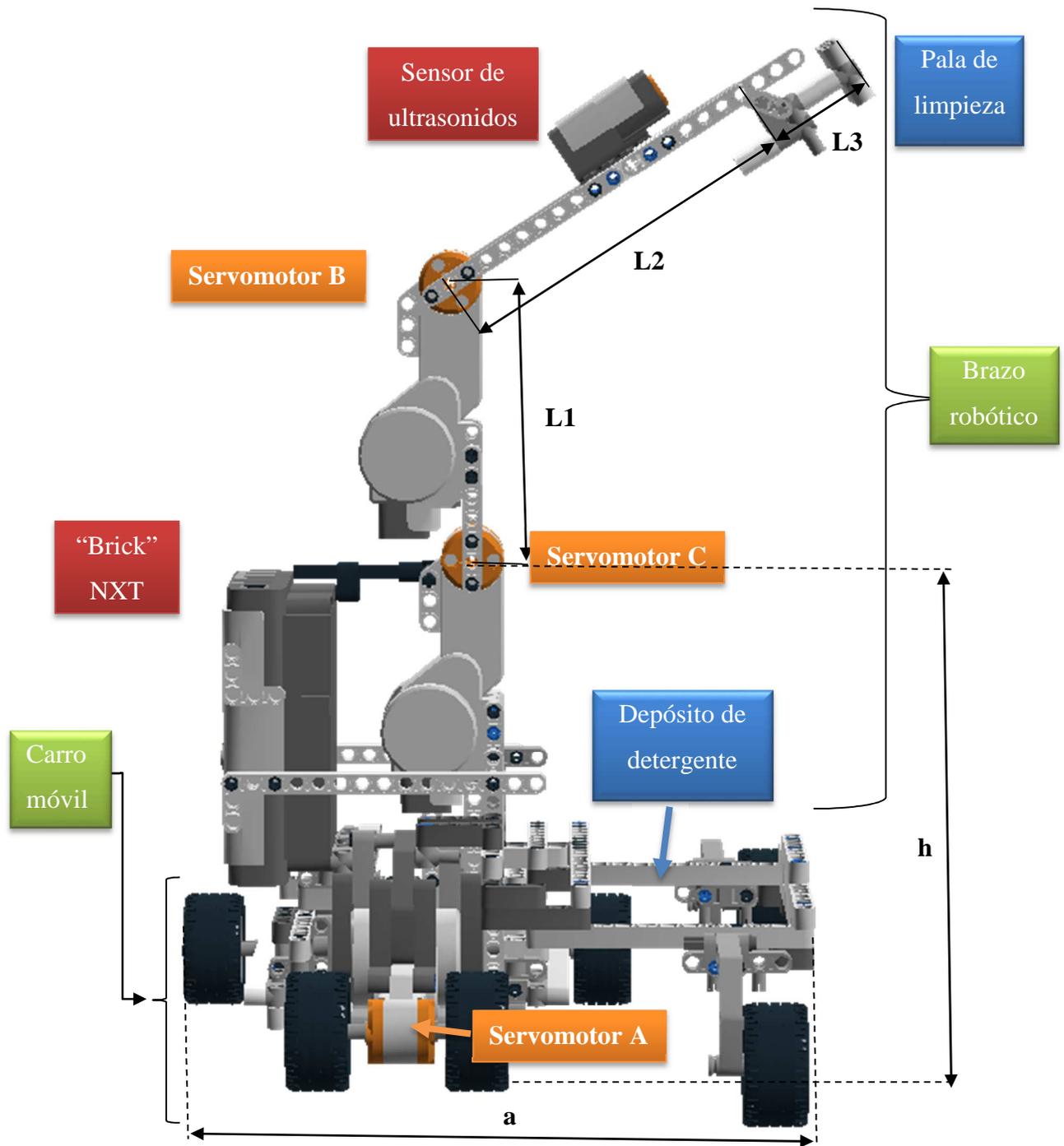


Ilustración 79: Esquema general del brazo robótico móvil.

DIMENSIONES		
a (base)		245 mm
h (altura)		179 mm
L1		105 mm
L2		130 mm
L3 (con esponja)		60 mm

Tabla 10: Tabla de dimensiones finales del robot.



4.3 Análisis matemático del movimiento del brazo robótico.

En el apartado del estado del arte se ha hablado superficialmente sobre el uso de la cinemática inversa a la hora de estudiar el movimiento y los parámetros del mismo que debemos hacer para, desde un punto final conocido y conociendo las dimensiones de nuestro robot, conseguir esos parámetros y coordenadas que necesitamos hacer para ese desplazamiento.

En el diseño del robot que hemos visto en el punto anterior, se tuvieron en cuenta dos consideraciones básicas: (a) con el fin de asegurar una estructura adecuadamente rígida y estable, las extremidades que conforman el brazo se diseñaron lo más cortas posible y (b) con el fin de disminuir el balanceo y la inclinación del efector final con respecto de la base, se situó el módulo de “brick” lo más alejado y perpendicular posible del eje del brazo para ejercer de contrapeso.

4.3.1. Control de la cinemática y trayectorias de movimientos.

Como se ha visto en el apartado de cinemática inversa (ver 3.3.5), a la hora de afrontar la problemática de buscar la solución, o soluciones, de movimientos que cumplan con lo requerido por el extremo efector del brazo, se pueden utilizar varios métodos para ese propósito.

Debido a que este modelo creado con el material disponible de LEGO, no ha necesitado más que dos articulaciones en el brazo, ejecutadas por dos servomotores incluidos en el paquete, podremos afrontar esta solución, utilizando el método de transformación homogénea.

Se analizará primero la cinemática directa del brazo para hallar sus parámetros y, una vez hallados, se usará la cinemática inversa para obtener los ángulos que deberán adoptar los servomotores para realizar los movimientos que se quieren usar a la hora de recorrer la superficie de la placa a limpiar.

Inicialmente se analizará la cinemática directa enfocada al movimiento del brazo robot, como pilar junto con la programación de las secuencias con el software como la parte fundamental de este proyecto.



Ilustración 80: Vista lateral de prototipo final ejecutando ensayo de limpieza usando tinta para señalar las zonas donde hay contacto en los barridos.

En primer lugar, se establecerá la descripción analítica del movimiento espacial del brazo robótico, basándose en las propiedades físicas del prototipo diseñado y montado.

Para empezar a realizar el análisis de la cinemática directa del brazo, lo primero es establecer los parámetros Denavit-Hartenberg (parámetros DH), que se presentan por convención en una tabla. Esta tabla proporciona la información necesaria para realizar los cálculos cinemáticos correspondientes a cada grado de libertad del brazo robot, en este caso, al ser un brazo sencillo, únicamente contaremos con dos grados de libertad que analizaremos como si de un plano se tratase para simplificar todos los cálculos.

Articulación	θ	d	a	α
1	θ_1	0	L_1	0
2	θ_2	0	L_2	0
3	0	d_3	0	0

Tabla 11: Parámetros DH del brazo robot limpiador.



Se quiere buscar una matriz general que englobe todas las características de nuestro sistema, por tanto, podemos unir las matrices anteriores con la siguiente expresión:

$$A = A_1 * A_2$$

Ecuación 14: Producto de las matrices de las articulaciones en una matriz.

Para facilitar la lectura y comprensión se adaptarán las siguientes abreviaturas y simplificaciones:

$$\cos\theta_1 = C_1$$

$$\cos\theta_2 = C_2$$

$$\sin\theta_1 = S_1$$

$$\sin\theta_2 = S_2$$

Ecuación 15: Simplificación de senos y cosenos.

$$A = \begin{bmatrix} C_1C_2 - S_1S_2 & -C_1S_2 - C_2S_1 & 0 & L_1C_1 + L_2C_1C_2 - L_2S_1S_2 \\ C_1S_2 + C_2S_1 & C_1C_2 - S_1S_2 & 0 & L_1S_1 + L_2C_1S_2 + L_2C_2S_1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 16: Matriz resultante de la unión de las dos matrices de las articulaciones del robot.

Se busca encontrar la posición del efector final del brazo después de mover las articulaciones siendo el punto (X, Y) un punto situado en el plano, las coordenadas de ese punto de la posición final del efector están reflejadas en las posiciones $A_{1,4}$ y $A_{2,4}$ de la matriz anterior.

Si se centra el eje coordenado del origen podemos concluir que las coordenadas (X, Y) son las siguientes expresadas en estas dos ecuaciones:

$$X = L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_1\cos\theta_2 - L_2\sin\theta_1\sin\theta_2$$

$$Y = L_1\sin\theta_1 + L_2\cos\theta_1\sin\theta_2 + L_2\cos\theta_2\sin\theta_1$$

Ecuación 17: Ecuaciones de posición de las coordenadas (X,Y)

Sustituyendo este modelo lógico por el modelo físico sustituyendo los valores de las medidas reales de las longitudes de los segmentos del brazo por las constantes L_1 y L_2 .

Obtendríamos entonces las siguientes expresiones:

$$L_1 = 130 \text{ mm}; L_2 = 160 \text{ mm}$$

$$X = 130 \cdot \cos\theta_1 + 160 \cdot \cos\theta_1\cos\theta_2 - 160 \cdot \sin\theta_1\sin\theta_2$$

$$Y = 130 \cdot \sin\theta_1 + 160 \cdot \cos\theta_1\sin\theta_2 + 160 \cdot \cos\theta_2\sin\theta_1$$

Ecuación 18: Ecuaciones de posición de las coordenadas (X,Y) con los valores reales.



4.3.1.2. Cinemática inversa.

Una vez obtenida la expresión mediante la cinemática directa, podemos expresar en forma vectorial el resultado obtenido con un sistema de ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación 19: Expresión en forma vectorial del sistema de ecuaciones de posición.

Si utilizamos las identidades trigonométricas se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

Ecuación 20: Expresión en forma vectorial simplificada por identidades trigonométricas.

Los valores de X e Y son conocidos, pues al usar la cinemática inversa conocemos las coordenadas donde termina el efector, y como también conocemos los valores físicos de L_1 y L_2 , solo deberíamos despejar los valores angulares que tomarían las dos articulaciones, θ_1 y θ_2 .

Si se opera:

$$X^2 + Y^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos \theta_2$$

$$\cos \theta_2 = \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}$$

Ecuación 21: Obtención del ángulo θ_2 por medio de la matriz transformada.

Una vez conocido el valor de θ_2 se puede encontrar el valor de θ_1 geoméricamente. Para ello se hace uso de la descripción gráfica y del teorema del seno de tal forma que:

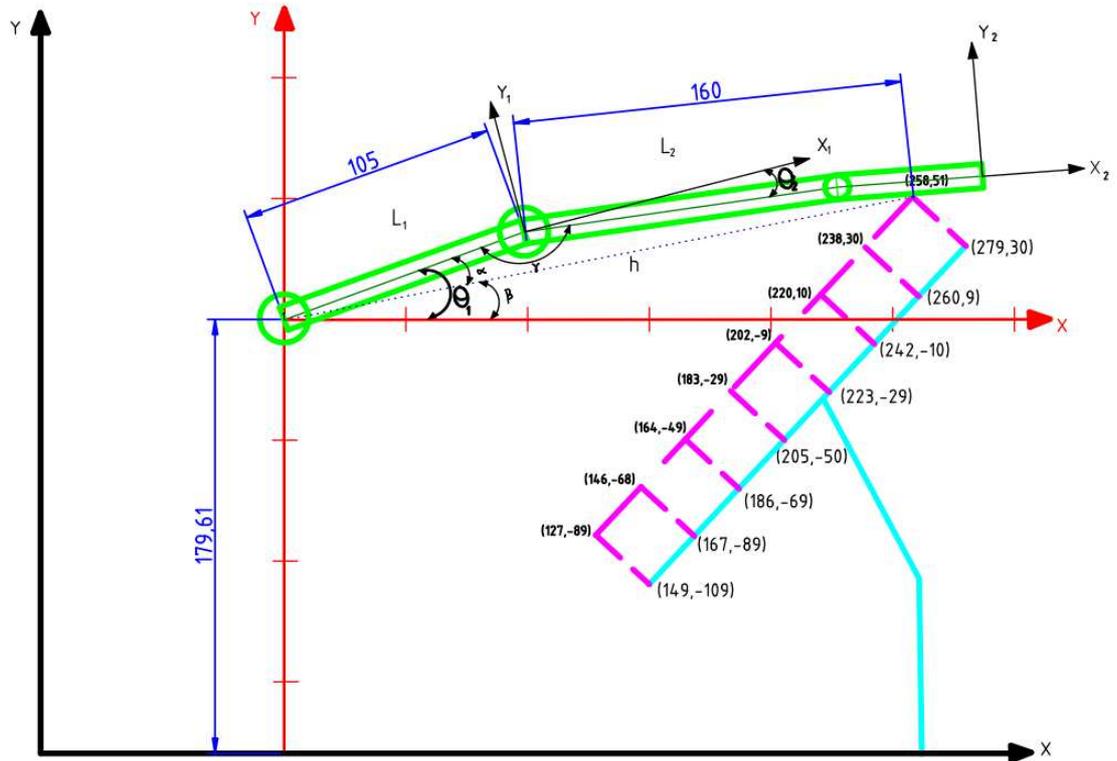


Ilustración 82: Esquema del brazo con los ángulos de las extremidades,

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

$$\frac{L_2^*}{\sin\alpha} = \frac{h}{\sin(180-\theta_1)}; \alpha = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180-\theta_1)}{h}; \text{ siendo h la hipotenusa}$$

$$h = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}}$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

Ecuación 22: Obtención del ángulo θ_1 por medio de metodos geométricos.

Puesto que se ha obviado el ultimo eje del brazo, ya que este no está motorizado, a la hora de realizar, se supone una línea imaginaria. Así se hallarán los ángulos



requeridos dándole a su vez la libertad de movimiento a la pala limpiadora, así se logra una homogeneidad y flexibilidad a la hora de descender.

También a L_2 se le añaden 30 mm extra a la hora del cálculo para otorgarle margen y para coincidir con la línea imaginaria, nombrando a esa magnitud ahora como L_2^* .

Se ha dividido la superficie a limpiar en 8 puntos, dos de ellos el punto inicial y el punto final de la pala. Por cada punto se van a utilizar las expresiones obtenidas de los ángulos y como se conocen los valores de X,Y, L_1 y L_2 , se van a obtener los ángulos buscados.

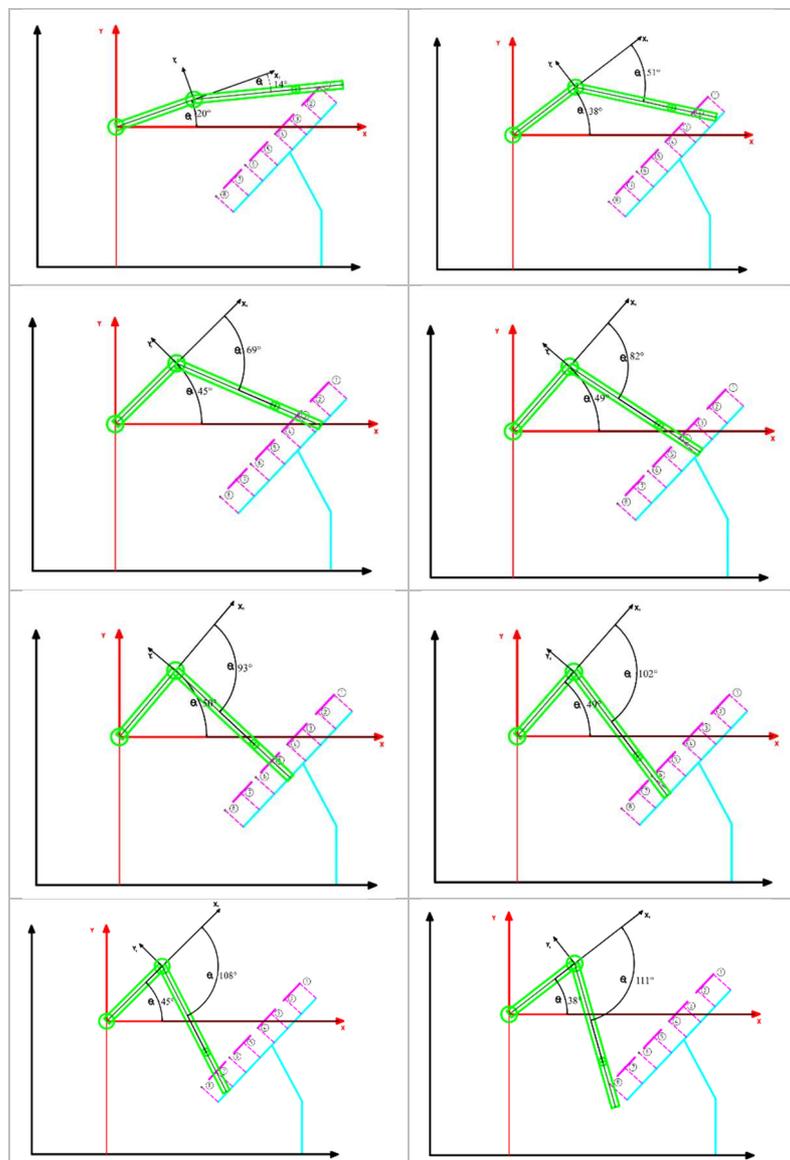


Tabla 12: Mosaico de movimientos de limpieza en la placa realizados con LibreCAD.



Punto 1. Situado en la parte más alta de la placa.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	258	51

Tabla 13: Constantes y variables del punto 1 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{258^2 + 51^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 14^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 14)}{\sqrt{(258^2 + 51^2)}} + \tan^{-1} \frac{51}{258} = 20^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 20^\circ \\ \theta_2 &= 14^\circ \end{aligned}$$

Ecuación 23: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 1 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

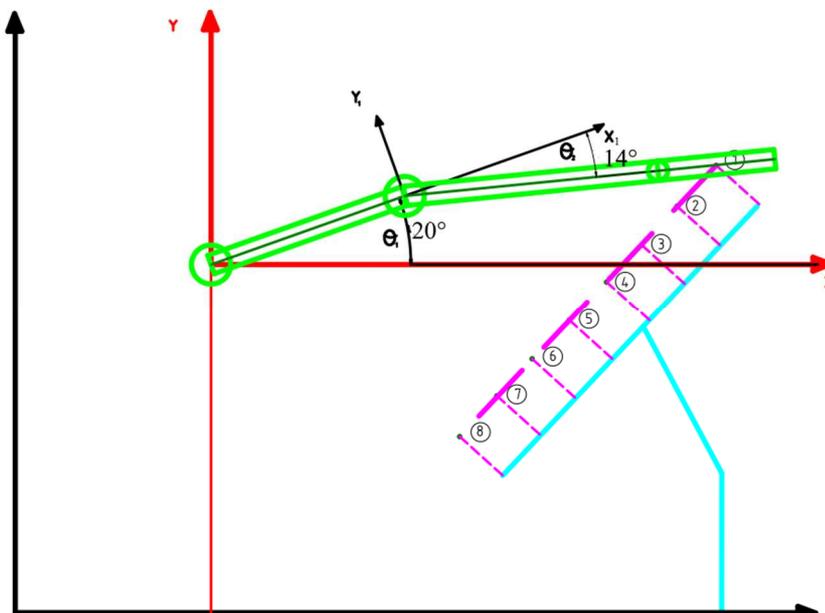


Ilustración 83: Representación gráfica del punto 1 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa.

Los ángulos gráficamente se corresponden con los cálculos realizados matemáticamente.

Punto 2.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	238	30

Tabla 14: Constantes y variables del punto 2 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{238^2 + 30^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 51^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 51)}{\sqrt{(238^2 + 30^2)}} + \tan^{-1} \frac{30}{238} = 38^\circ \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 38^\circ$$

$$\theta_2 = 51^\circ$$

Ecuación 24: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 2 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

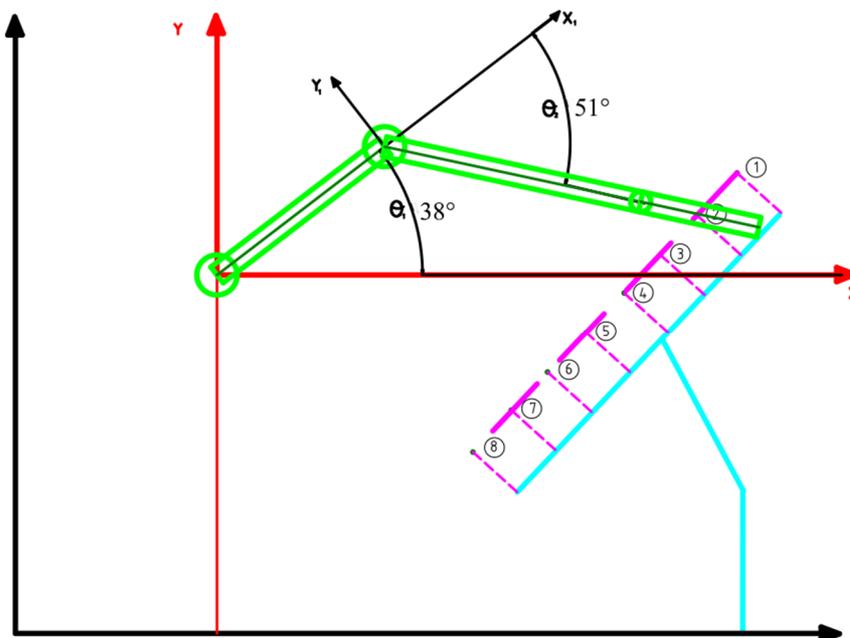


Ilustración 84: Representación gráfica del punto 2 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa



Punto 3.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	220	10

Tabla 15: Constantes y variables del punto 3 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{220^2 + 10^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 69^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 69)}{\sqrt{(220^2 + 10^2)}} + \tan^{-1} \frac{10}{220} = 45^\circ \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 45^\circ$$

$$\theta_2 = 69^\circ$$

Ecuación 25: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 3 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

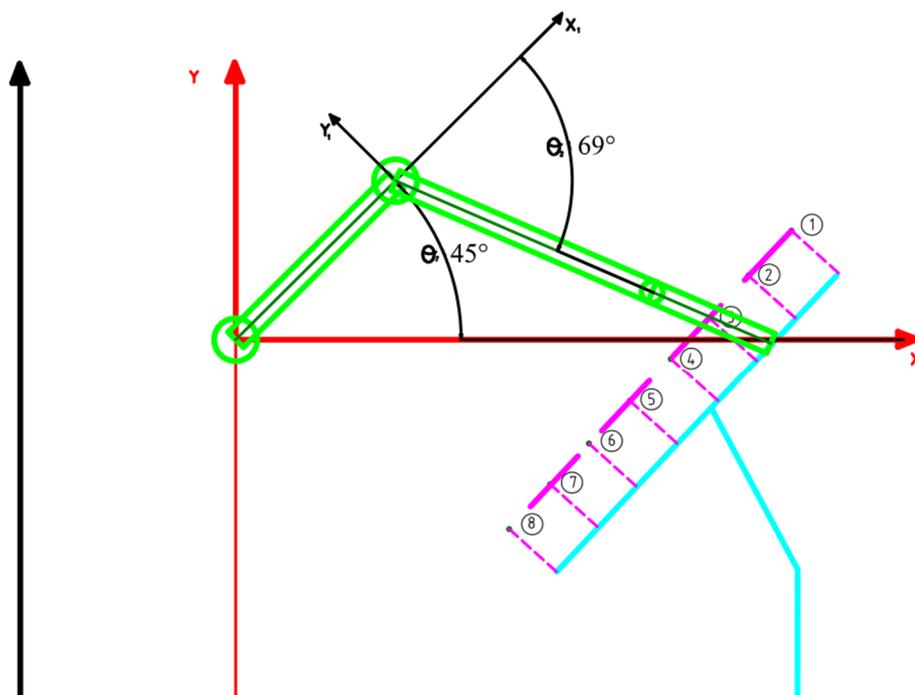


Ilustración 85: Representación gráfica del punto 3 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa

Punto 4.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	202	-9

Tabla 16: Constantes y variables del punto 4 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{202^2 + (-9)^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 82^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 82)}{\sqrt{(202^2 + (-9)^2)}} + \tan^{-1} \frac{(-9)}{202} = 49^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 49^\circ \\ \theta_2 &= 82^\circ \end{aligned}$$

Tabla 17: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 4 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

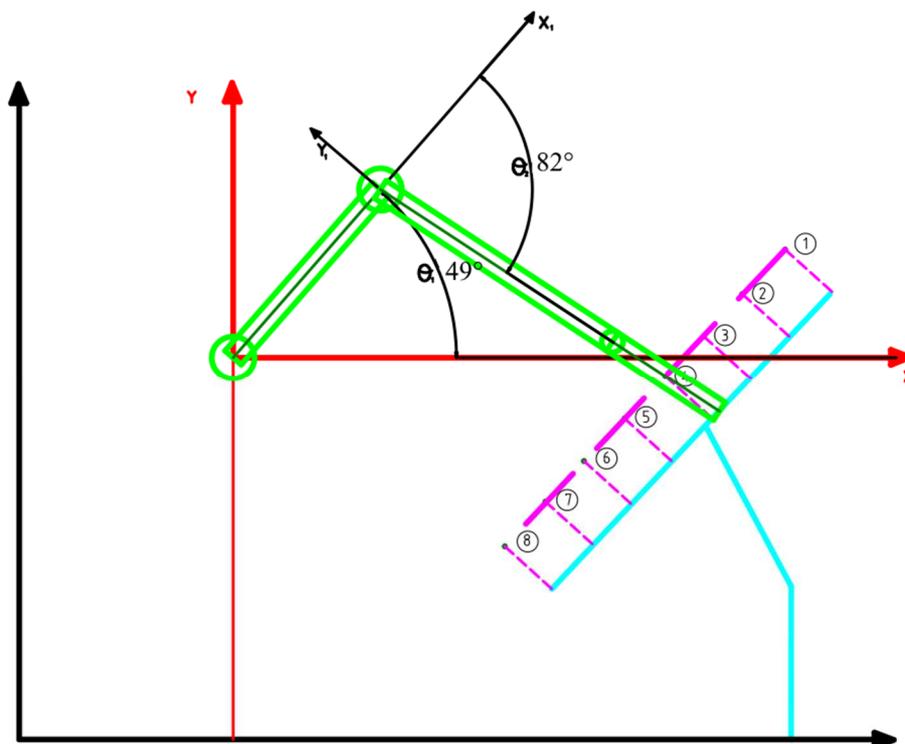


Ilustración 86: Representación gráfica del punto 4 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa

Punto 5.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	183	-29

Tabla 18: Constantes y variables del punto 5 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{183^2 + (-29)^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 93^\circ$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 93)}{\sqrt{(183^2 + (-29)^2)}} + \tan^{-1} \frac{(-29)}{183} = 50^\circ$$

$$\theta_1 = 50^\circ$$

$$\theta_2 = 93^\circ$$

Ecuación 26: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 5 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

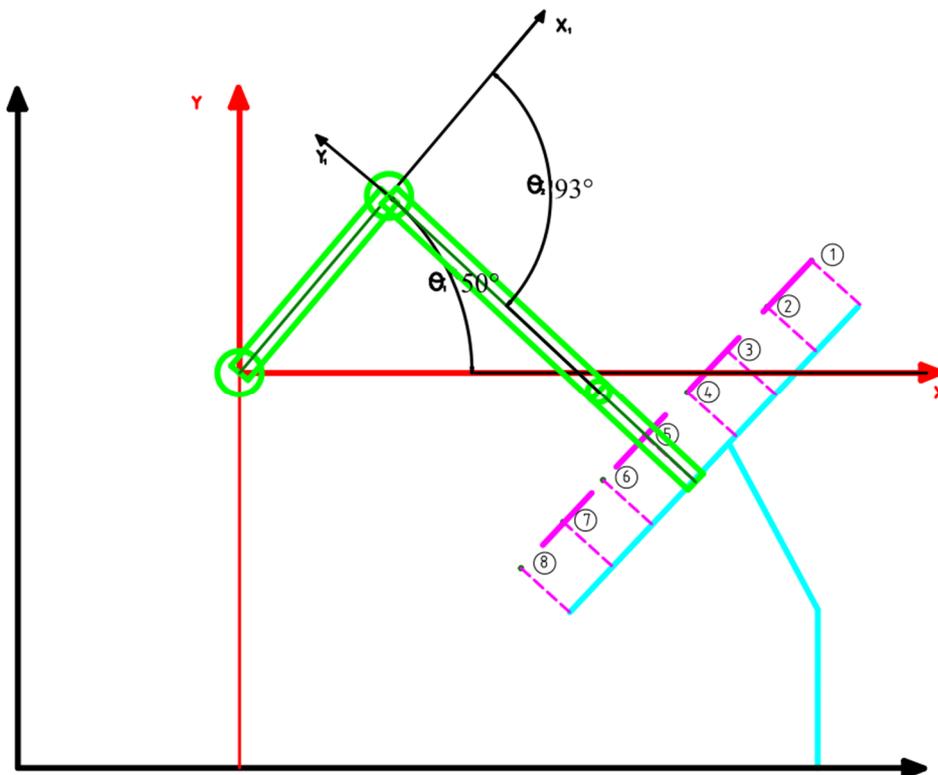


Ilustración 87: Representación gráfica del punto 5 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa



Punto 6.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	164	-49

Tabla 19: Constantes y variables del punto 6 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{164^2 + (-49)^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 102^\circ$$

$$\theta_1 = \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 102)}{\sqrt{(164^2 + (-49)^2)}} + \tan^{-1} \frac{-49}{164} = 49^\circ$$

$$\theta_1 = 49^\circ$$

$$\theta_2 = 102^\circ$$

Ecuación 27: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 6 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

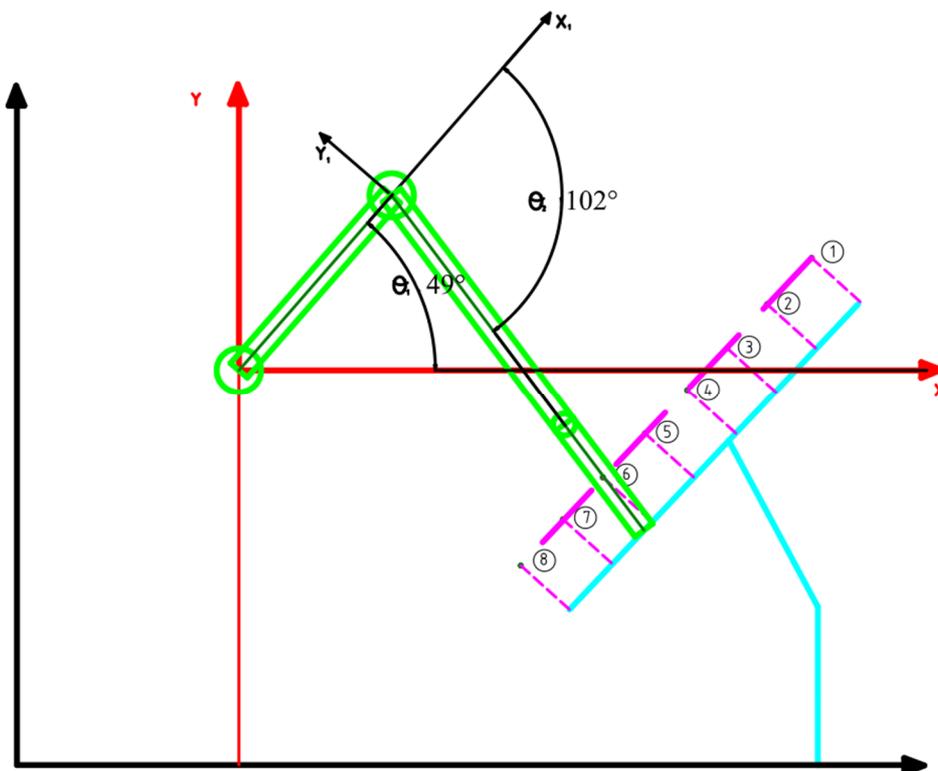


Ilustración 88: Representación gráfica del punto 6 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa



Punto 7.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	146	-68

Tabla 20: Constantes y variables del punto 7 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

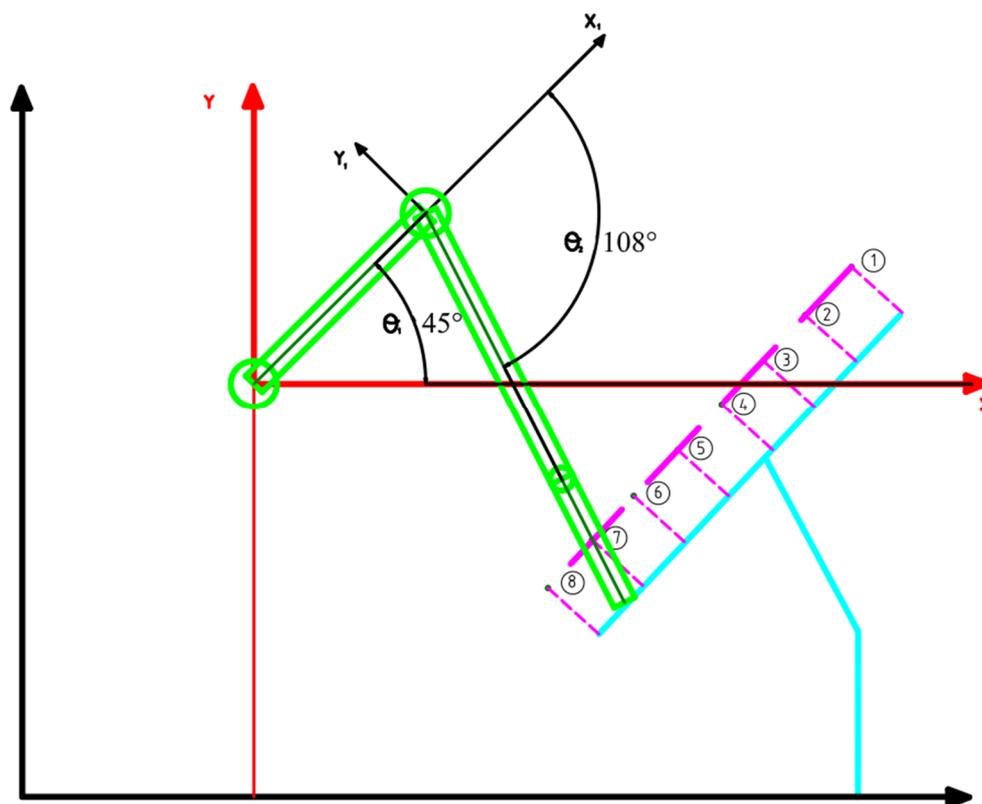
$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{146^2 + (-68)^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 108^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 108)}{\sqrt{(146^2 + (-68)^2)}} + \tan^{-1} \frac{(-68)}{146} = 45^\circ \end{aligned}$$

$$\theta_1 = 45^\circ$$

$$\theta_2 = 108^\circ$$

Ecuación 28: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 7 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.



Ecuación 29: Representación gráfica del punto 7 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa



Punto 8. Punto final, el situado al final de la placa por la parte inferior.

Constantes		Variables	
L_1	L_2^*	X	Y
105	160	127	-89

Tabla 21: Constantes y variables del punto 8 del análisis cinemático del movimiento al recorrer la superficie de la placa.

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - L_1^2 - L_2^{*2}}{2 \cdot L_1 \cdot L_2^*} = \cos^{-1} \frac{127^2 + (-89)^2 - 105^2 - 160^2}{2 \cdot 105 \cdot 160} = 111^\circ$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \alpha + \beta = \sin^{-1} \frac{L_2^* \sin(180 - \theta_2)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + \tan^{-1} \frac{Y}{X} \\ &= \sin^{-1} \frac{160 \cdot \sin(180 - 111)}{\sqrt{(127^2 + (-89)^2)}} + \tan^{-1} \frac{(-89)}{127} = 38^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 38^\circ \\ \theta_2 &= 111^\circ \end{aligned}$$

Ecuación 30: Obtención de los valores angulares de las articulaciones en el punto 8 del análisis cinemático de la limpieza de la placa.

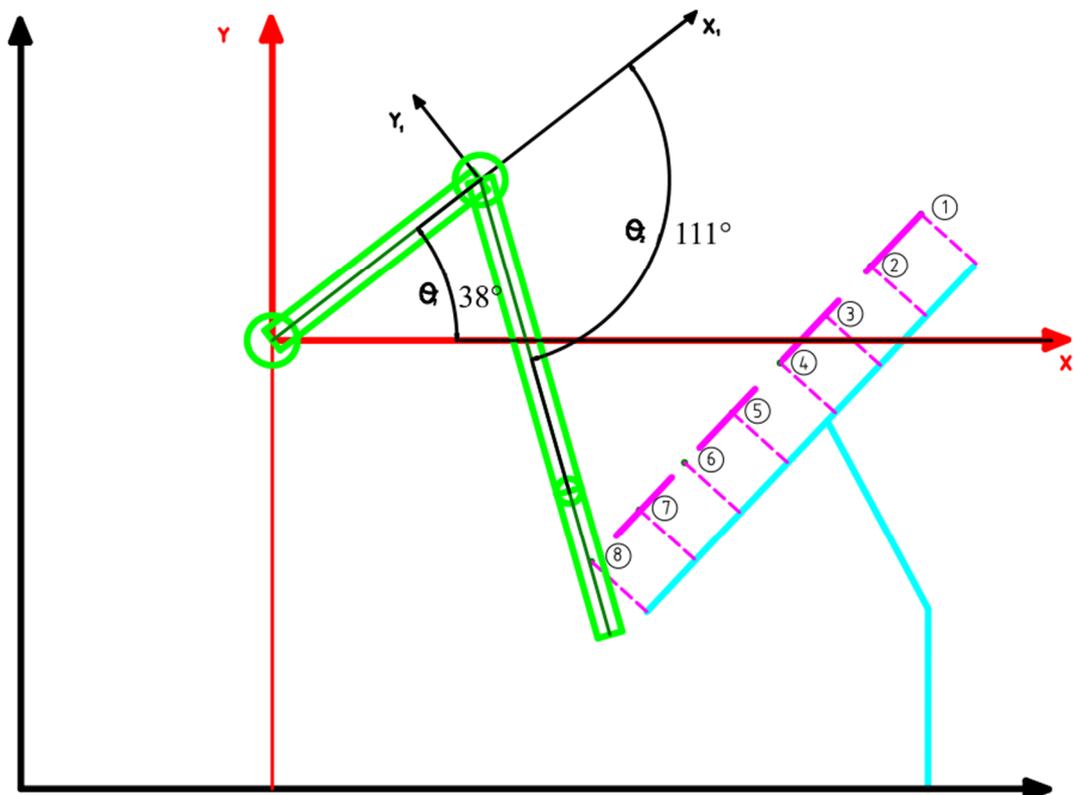


Ilustración 89: Representación gráfica del punto 8 en el análisis cinemático de la limpieza de la placa



Se puede observar que todos los gráficos realizados con CAD obtienen unos ángulos iguales a los obtenidos por el método matemático.

Para visualizar la secuencia de ángulos escogidos se aúnan todos en una tabla para facilitar la lectura y comprobación. En la siguiente tabla se pueden ver todos los ángulos y a partir de ellos se puede establecer el incremento o decremento de ángulos en las articulaciones para mover el brazo acorde a lo analizado con la cinemática inversa.

Punto	Valor de X (mm)	Valor de Y (mm)	θ_1 (grados)	θ_2 (grados)
1	258	51	19	14
2	238	30	38	51
3	220	10	45	69
4	202	-9	49	82
5	183	-29	50	93
6	164	-49	49	102
7	146	-68	45	108
8	127	-89	38	111

Tabla 22: Coordenadas y ángulos resultantes mediante cinemática inversa.



4.3.1.3. Otros movimientos a analizar.

Para el resto de movimientos necesarios también se puede hacer un pequeño estudio cinemático valiéndose de las mismas herramientas ya expuestas.

Se toma como posición estándar la postura que toma el robot al inicio y en reposo entre acciones, tal y como se indica en la siguiente representación:

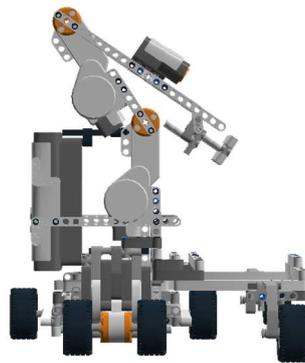


Ilustración 90: Representación 3D de la posición estándar de reposo del robot.

Movimiento de carga de líquido detergente.

Para poder limpiar la superficie correctamente se decidió usar algún líquido para ser más eficiente en la limpieza. Como este proyecto no necesita de un complejo sistema hidráulico, directamente se añadió al diseño un recipiente rectangular que contendrá el líquido.

Se necesita entonces un movimiento, previo a la limpieza, que partiendo de su posición inicial baje la esponja de la pala de limpieza y la impregne del líquido. Como el camino más corto, entre el punto inicial correspondiente al extremo de L_2 y la parte central por encima del recipiente, es la línea recta, se va a suponer un recorrido en una imaginaria línea para hacer el movimiento lo más sencillo posible.

Como ya se han explicado el origen de las expresiones y el modo de calcular los ángulos, se exponen directamente los resultados del cálculo de los ángulos que deben adoptarse para recorrer el camino de la posición inicial al depósito de líquido.

Constantes		Variables		
L_1	L_2	Puntos	X	Y
105	130	1	38.5	5.5
		2	66.5	-42.5
		3	90.8	-30.8

Tabla 23: Constantes y variables del análisis cinemático del movimiento de recogida de líquido.

Los ángulos resultantes aplicando las ecuaciones (21 y 22) son los siguientes:

Puntos	θ_1	θ_2
1	38.5	5.5
2	66.5	-42.5
3	90.8	-30.8

Tabla 24: Ángulos escogidos a adoptar por las articulaciones para que el brazo robot pueda introducirse en el recipiente.

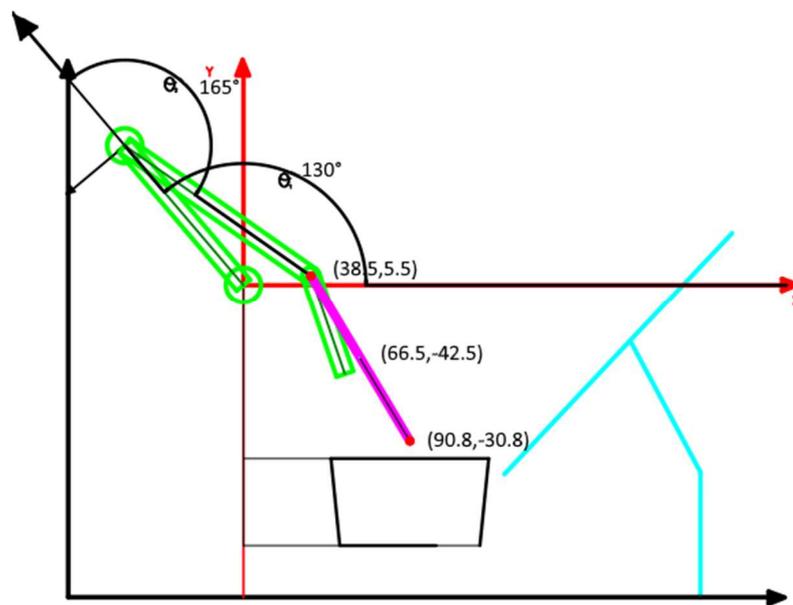


Ilustración 91: Posición estándar en reposo coincidente con el punto 1 del movimiento de recogida de líquido.

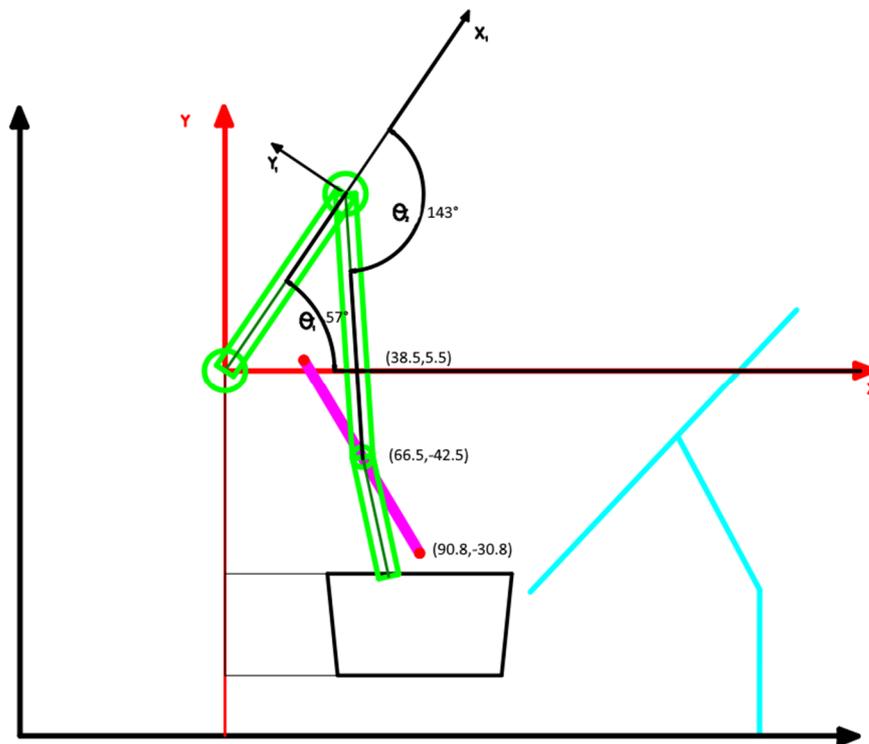


Ilustración 92: Posición del punto 2 del movimiento de recogida de líquido.

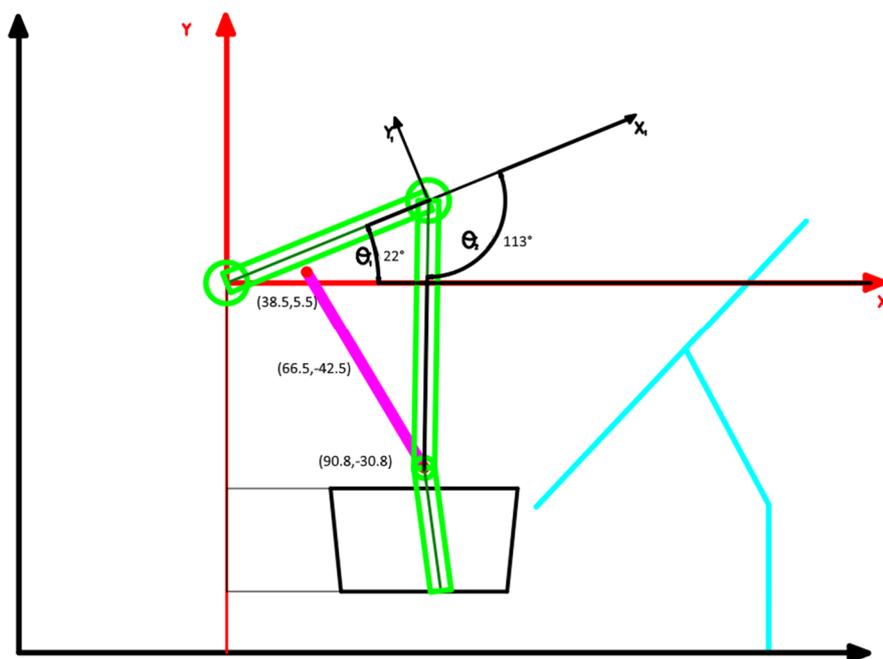


Ilustración 93: Posición final de los ángulos en el punto 3 de la recogida de líquido.



Aproximación a la parte superior de la placa.

Otro movimiento indispensable sería la aproximación desde la posición estándar a la parte superior de la placa para iniciar la limpieza. Al igual que en el movimiento de recogida de líquido se va a tomar como camino a recorrer el más sencillo, la línea recta.

Al igual que en el movimiento anterior se van a exponer directamente los resultados por evitar la repetición de las mismas expresiones, puesto que las ecuaciones serán las mismas (ecuación 21 y 22).

Para estimar la posición final, al igual que en el análisis de la limpieza de la placa, se va a suponer 30 mm extras en la parte L_2 y una línea imaginaria paralela a la superficie para dejar espacio a la parte libre de la pala de limpieza para poder desplazarse más suavemente y con margen sobre la superficie de la placa. Por tanto, nuevamente tenemos que $L_2^* = 160$ mm.

Constantes		Variables		
L_1	L_2^*	Puntos	X	Y
105	160	1	61.5	-9
		2	258	51

Tabla 25: Constantes y variables del análisis cinemático del movimiento de aproximación a la parte superior de la placa..

Los ángulos resultantes aplicando las ecuaciones (21 y 22) son los siguientes:

Puntos	θ_1	θ_2
1	130	165
2	20	14

Tabla 26: Ángulos que deben adoptar las articulaciones para efectuar el movimiento de aproximación a la parte superior de la placa.

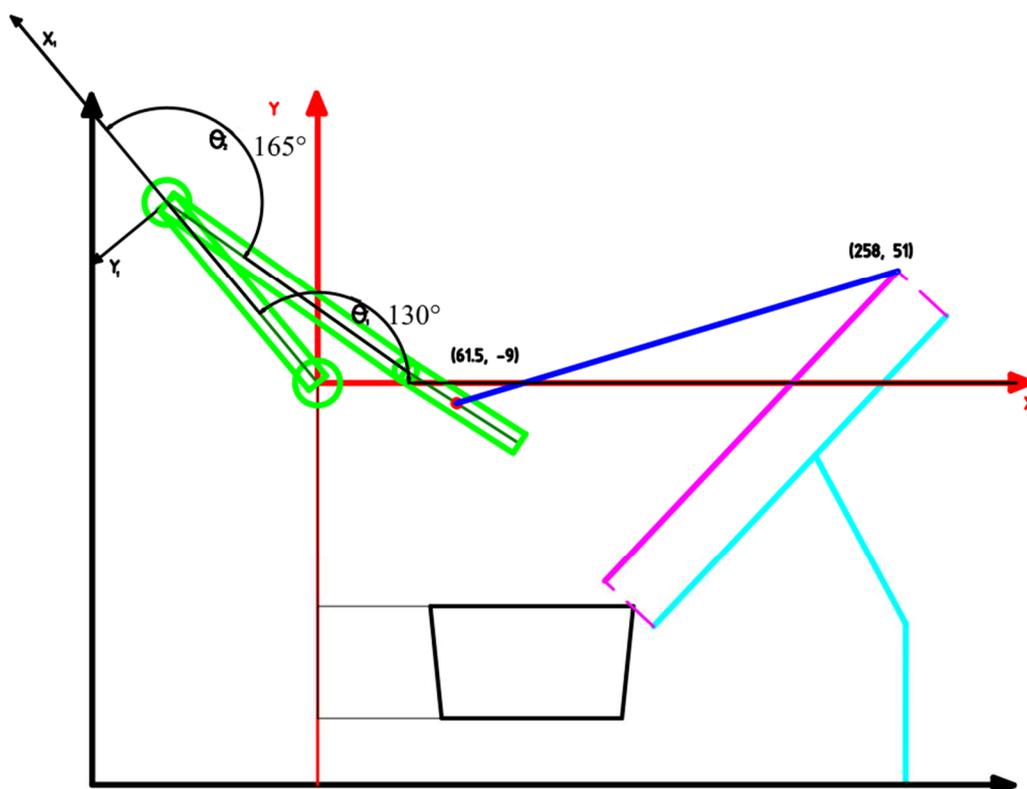


Ilustración 94: Representación de la posición estándar previa al desplazamiento hacia la parte superior de la placa.

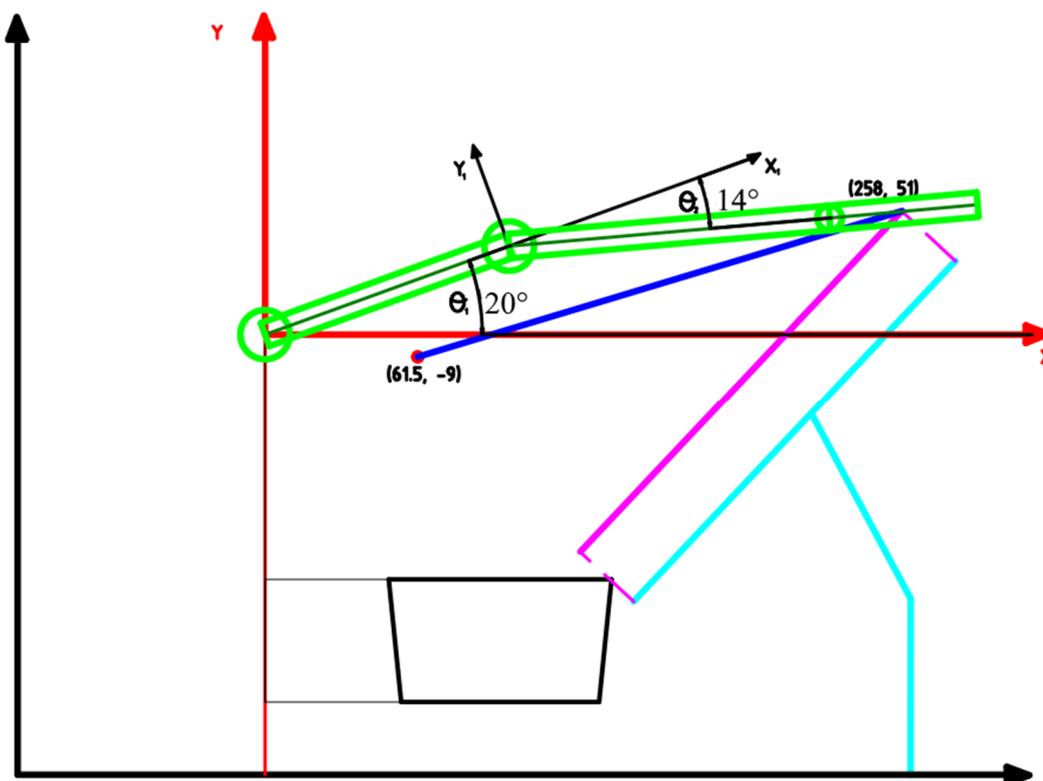


Ilustración 95: Representación de la posición final en el desplazamiento hacia la parte superior de la placa.



Cabe destacar una vez finalizado el análisis cinemático mediante este sistema, que a la hora de llevarlo a la práctica presenta irregularidades que se corresponden a la falta de precisión en los servomotores y a las variaciones angulares de cada uno de los movimientos, que aún siendo pequeñas pueden generar un error que se va acumulando durante los procesos. Por ello a la hora de introducir los grados en cada uno de los servos para realizar dichos movimientos, se van a modificar en la medida de lo posible para poder realizar correctamente estos movimientos. De todo ello se hablará en el apartado de la programación en el punto siguiente.



4.4 Software

Como se ha visto en el apartado de estado del arte, existe una gran diversidad de entornos de programación que permiten construir programas para los robots LEGO MINDSTORMS en diferentes lenguajes de programación. Existen herramientas para programar los controladores en prácticamente cualquier lenguaje de alto nivel, incluyendo algunos de los más extendidos: C, C++, Java, Ada, .NET (C#, Visual Basic), LabVIEW, Python, Ruby, MATLAB, etc. Además, existen lenguajes de programación específicos que están basados en lenguajes de programación estándar y que añaden algunas características específicas facilitando la programación de los controladores.

Entre estos lenguajes de programación predominan los lenguajes textuales NQC, NXC y RobotC, basados en código C y NXT-G que se trata de un lenguaje de programación gráfico basado en LabVIEW.

Además de la amplia gama de lenguajes de programación disponibles, una característica importante de la programación de los robots LEGO es la gran cantidad y calidad de entornos de programación disponibles. En muchos casos, se pueden programar los robots LEGO desde entornos que se utilizan a nivel profesional, como Visual Studio .NET, Eclipse, LabVIEW o muchos de los entornos que soporten el compilador y herramientas GCC. La programación con estos entornos de programación se realiza desde un PC con Windows / Linux desde donde se utilizan herramientas para crear los programas, cargarlos en la CPU e, incluso en algunos casos, se permite depurarlos.

Por último, otra característica interesante es la portabilidad de plataformas industriales, como OSEK, originariamente diseñado para proporcionar una arquitectura estándar de *software* para las diferentes ECUs del automóvil, a las CPUs LEGO Mindstorms. Esta plataforma, que se conoce con el nombre de nxtOSEK incluye el sistema operativo, una pila de comunicaciones y un protocolo para la administración de redes, proporciona un sistema operativo de tiempo real que gestiona el funcionamiento



del dispositivo en el que está implantado. Para ello dispone de estas herramientas, tareas, eventos, alarmas, etc. Un entorno de este tipo resulta especialmente interesante para la enseñanza de conceptos avanzados de programación orientados a las áreas de los dispositivos empotrados y comunicaciones.

4.3.1 Programación con NXT-G

El lenguaje NXT-G proporciona un sencillo entorno gráfico de programación, en el que la programación se realiza conectando bloques en secuencia, insertándolos y entrelazándolos entre sí.

Este lenguaje tiene la ventaja de no tener que utilizar, herramientas o *toolbox*, pues al ser un programa propietario de LEGO se carga directamente en el bloque. Se consigue una mayor velocidad en el procesado de la información y una mayor velocidad de reacción en los movimientos del propio robot.

De esta forma, se elaboró el siguiente programa, al que llamamos “cleanbrick”, que consigue que el robot, de manera automática, avance y mueva el brazo guiado por su sensor de ultrasonido. Esto resuelve la idea inicial de usar dos “bricks”, que tenía como principal problema la comunicación entre ellos y la sincronización entre el movimiento de avance y el de limpieza.

Para poder realizar el programa adecuado a nuestras necesidades, aparte de basarnos en el estudio cinemático, hay que tener presente las limitaciones tanto de *hardware* como de *software*. Y se verá que habrá que modificar ciertos parámetros y características de los fundamentos teóricos para hacer la parte práctica realmente efectiva.

La explicación de la programación, al ser un entorno de programación gráfico se va a realizar mediante ilustraciones del propio programa en el que se detallan las acciones y los movimientos, acompañado de explicación y justificación de los mismos.

Para facilitar la comprensión de los movimientos y de los componentes que lo realizan se va a hacer referencia a la ilustración 79.

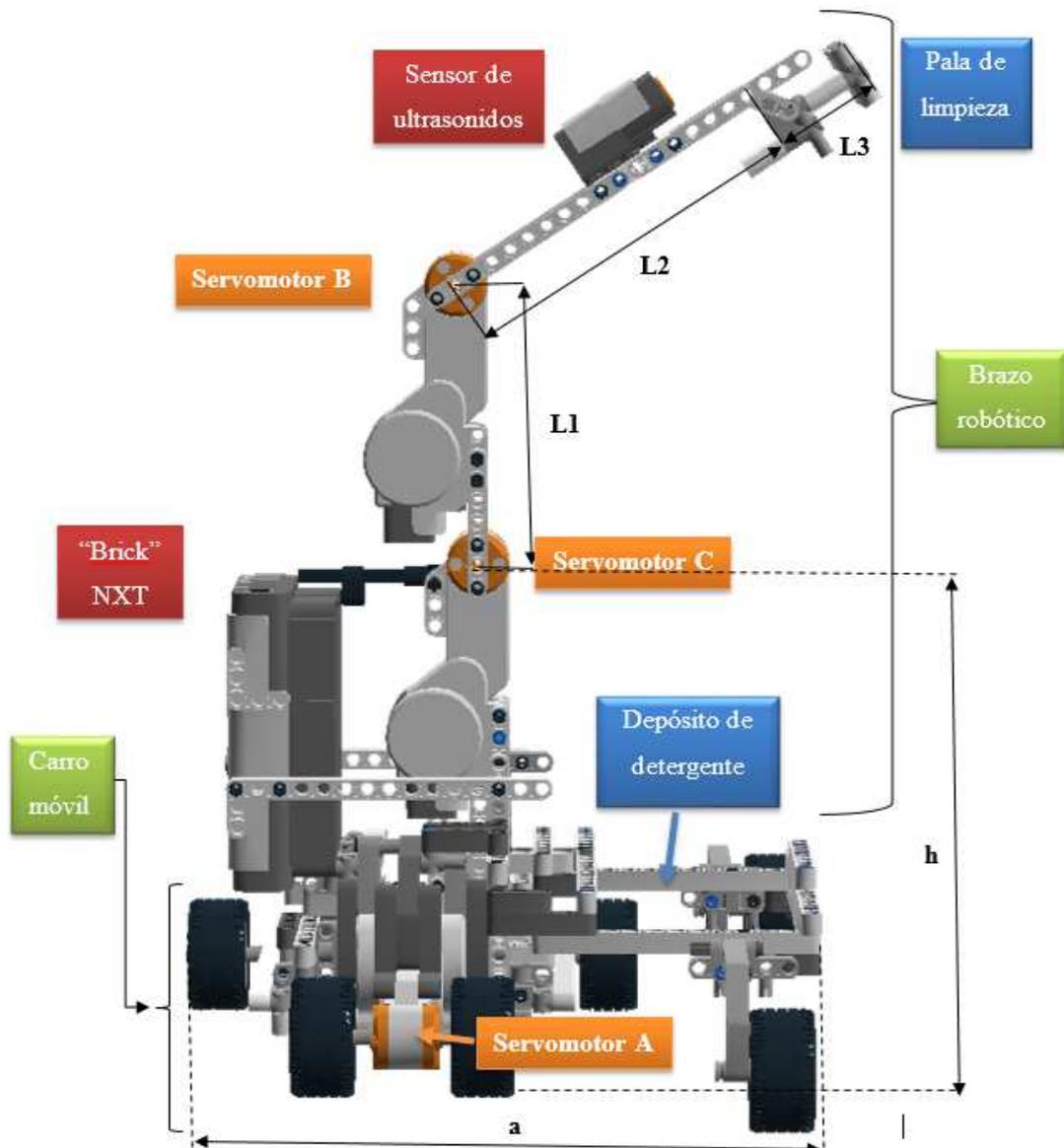


Ilustración 96: Referencia a la ilustración 79 a modo de recuerdo sobre la estructura general del robot.

El programa desarrollado con el *software* nativo de Lego Mindstorms responde a cubrir las necesidades que se han planteado anteriormente. Se necesita un movimiento de avance hacia una placa, que esta sea detectada y se inicie el segundo movimiento, la limpieza de la misma.

También se ha de solucionar el problema sobre la actuación de la limpieza en tipos distintos de placas, pues se han diseñado para este proyecto dos tipos distintos de placas, una en vertical y otra en horizontal.



Se debe establecer también la distancia a la cual ha de trabajar el robot, pues esta distancia es fundamental para establecer los puntos en los que el detector de ultrasonidos al detectar, por arriba o por debajo de esa medida. Por las características del entorno de trabajo creado para el desarrollo práctico del robot, se establece como distancia de trabajo a la distancia entre el servo C y la mitad de la placa, 220 mm.

Para la realización del programa se pensó en una primera instancia el uso de múltiples bloques que fueran describiendo cada uno de los movimientos del robot. Esto conllevaba a crear con el entorno EV3 un programa demasiado largo, pues para cada placa necesitaría múltiples bloques y repetirlos una y otra vez.

Como se conocen los objetivos que se quiere cumplir, se puede crear una cadena de secuencias las cuales son imprescindibles para conseguirlo, y ayudará a construir un programa que cumpla con lo buscado, por tanto, los puntos que se deben realizar son los siguientes:

Cadena de secuencias:

-
- 1. Inicio de programa.**

 - 2. Arranque de carro hasta encontrar una placa perpendicular al sensor ultrasónico.**

 - 3. Carga de detergente en pala de limpieza**

 - 4. Posicionar el sensor para búsqueda de placa en vertical.**

 - 5. Búsqueda vertical de punto más alto de la placa.**

 - 6. Posicionamiento de la pala en el punto más alto**

 - 7. Limpieza en vertical y hacia abajo con la pala sobre la superficie de la placa.**

 - 8. Desplazamiento horizontal y si sigue habiendo detección de placa repetir puntos 3-7 hasta que no se detecte.**

 - 9. Repetir en bucle hasta N-1 veces, siendo N el número de placas en serie en la misma fila.**

Tabla 27: Cadena de secuencias realizadas por el programa del robot.



Esta cadena de secuencias se podría incluir en el programa usando los bloques de programación e ir placa a placa construyendo el programa visualmente, pero como se puede imaginar llevaría a un programa tan grande como placas se dispusieran. Por tanto, la solución a ello es la inclusión de un sistema de bucles de repetición que simplifiquen el programa y sobretodo que lo acorten.

Constará de dos bucles, uno dentro de otro, que realizan una búsqueda de placa en un avance horizontal sobre el campo solar. Al encontrar una placa con el sensor de movimiento el carro se detiene y comienza la secuencia de carga de material de limpieza.

Una vez empapada la esponja de la pala de limpieza, el brazo inicia la secuencia de búsqueda de la parte superior de la placa, este proceso como el anterior de búsqueda de placa en el avance horizontal, es automático, pues depende exclusivamente del sensor de ultrasonido montado en el brazo limpiador.

Detectada la parte superior de la placa, el sensor de ultrasonido determina si es una placa en posición horizontal o vertical, y se inicia la secuencia de limpieza acorde a uno u otro tipo de placa según se dé el caso.

Al finalizar la primera pasada, el carro debe avanzar y debe iniciarse de nuevo el proceso anterior de recogida de líquido, detección de la parte alta de la placa y de nuevo otro barrido. Si al avanzar la distancia que llamaremos, distancia de paso, el sensor no detecta la presencia de la placa, significa que la labor de limpieza ha terminado y de nuevo debe ponerse en búsqueda de otra placa.

Como el desarrollo y comprensión de los bucles puede dar lugar a errores, se puede definir cada uno de los puntos y estados por los que se va a pasar, y las elecciones y caminos que se tomarán, según los valores tomados por el sensor de ultrasonido.



Diagrama de transición de estados:

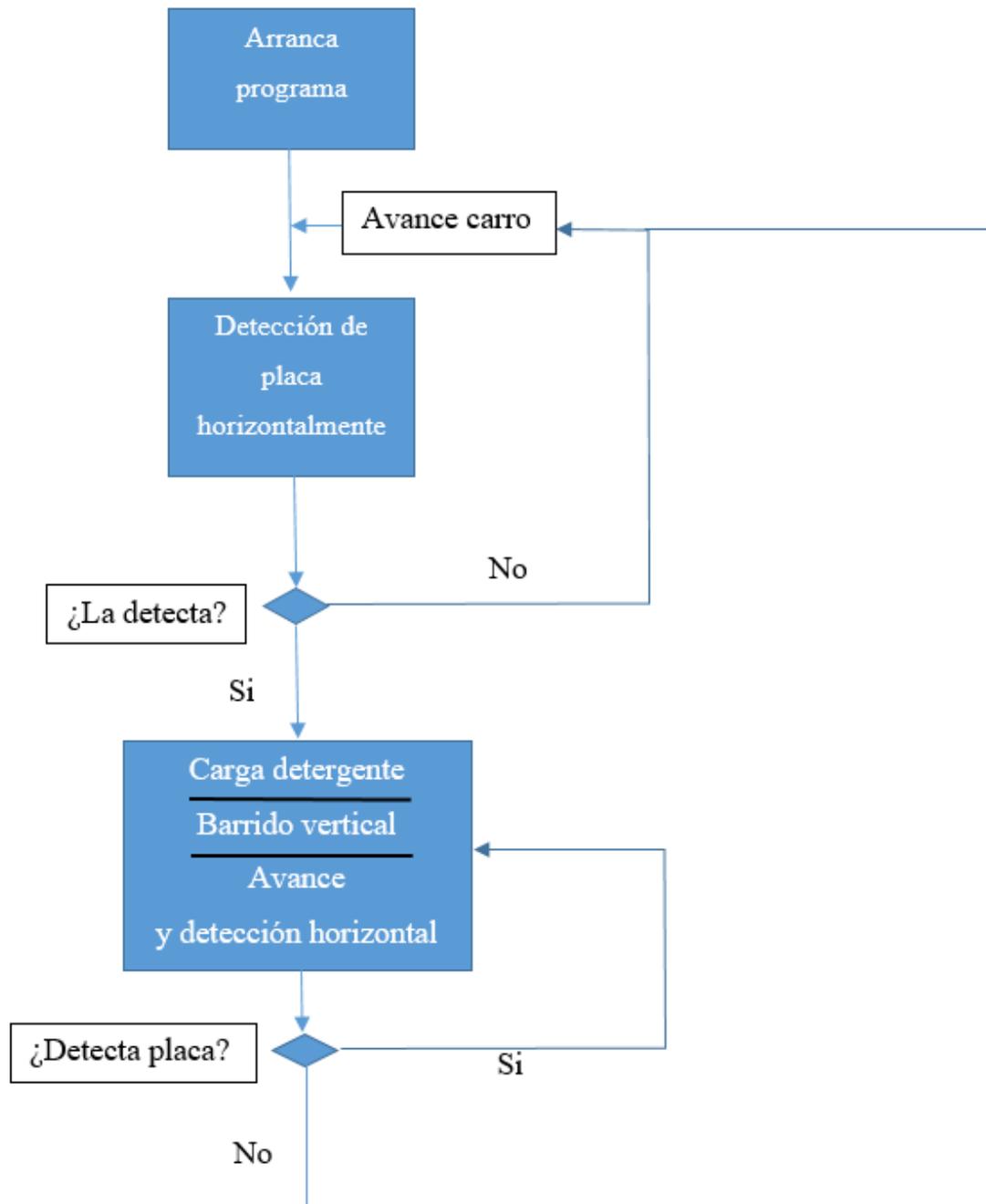
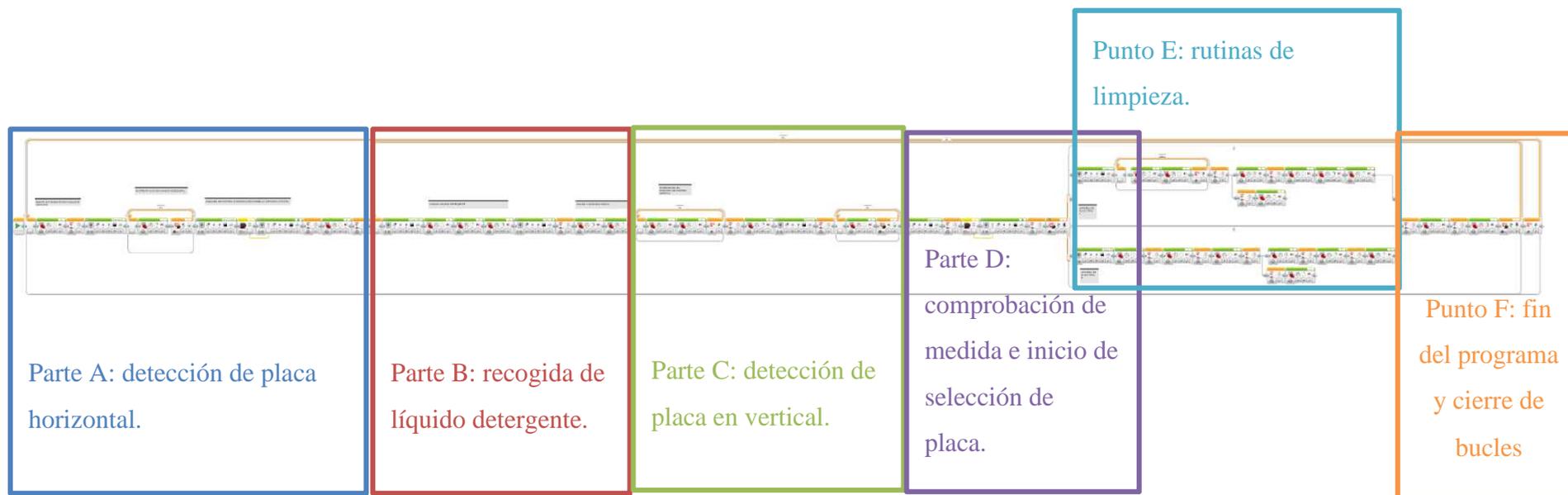


Ilustración 97: Diagrama de estados del robot durante el proceso de búsqueda de placa y limpieza en bucle.

Como ya se conocen tanto los problemas y las soluciones, a grandes rasgos, que se han adoptado, se puede pasar a analizar y comprender la estructura general del programa creado para el robot y las partes de las que se compone.



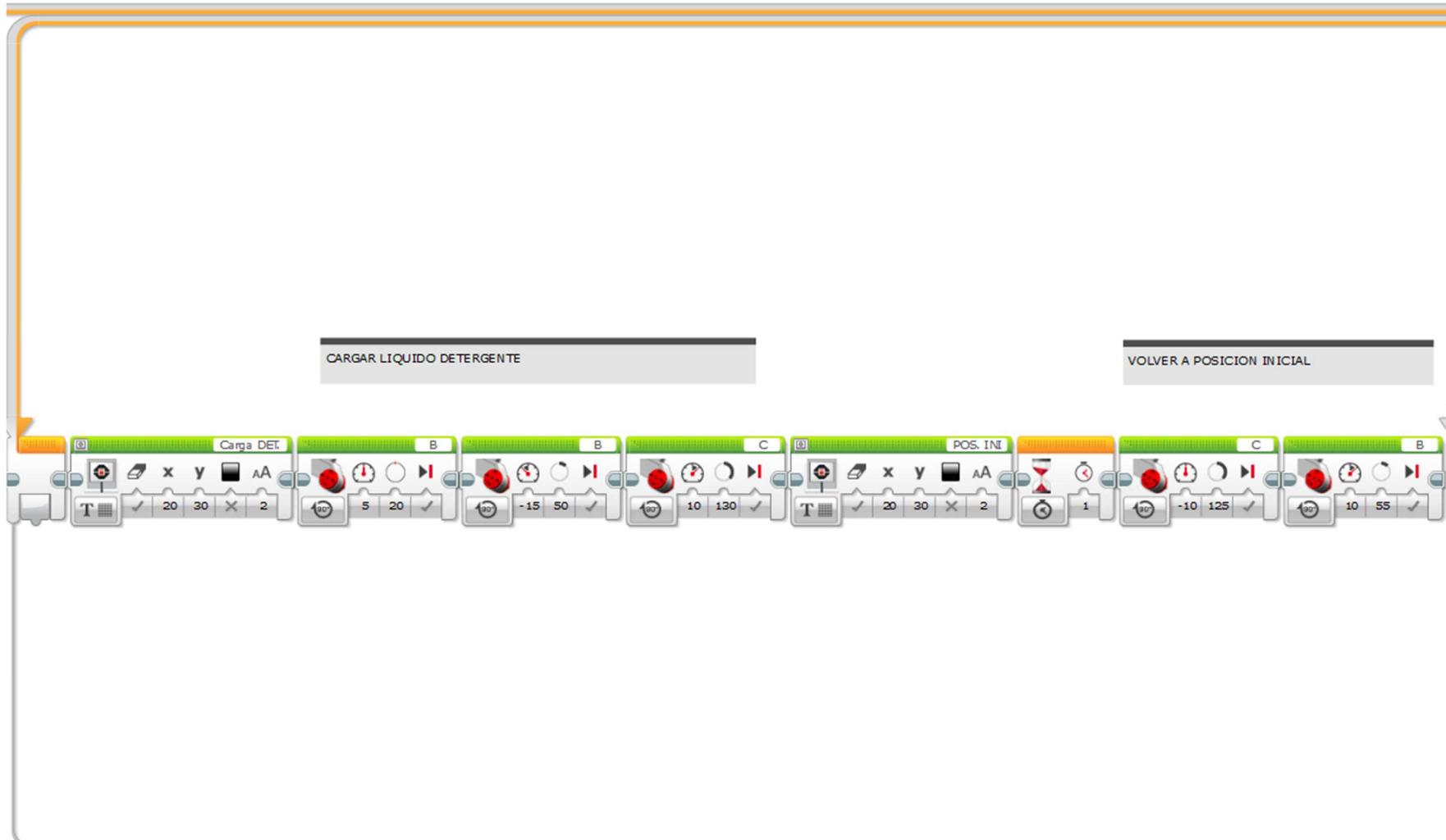
Programa “cleanbrick” y sus partes diferenciadas:



A continuación, se van a ver en detalle cada una de las partes que componen el programa y se va a detallar su composición, la elección de las acciones tomadas para conseguir cumplimentar la tarea de limpieza de la manera más exitosa posible.

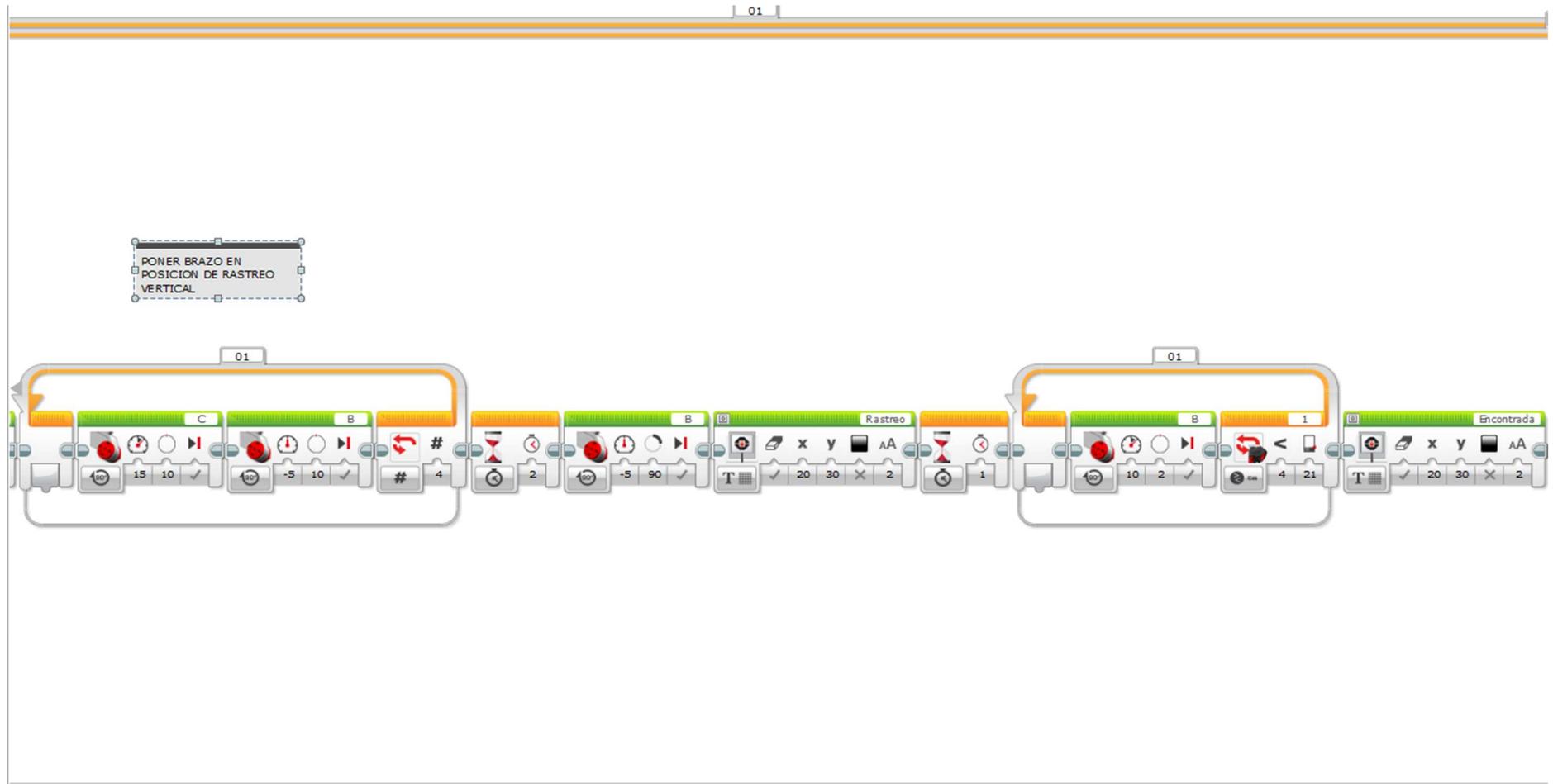


Parte B: recogida de líquido detergente.



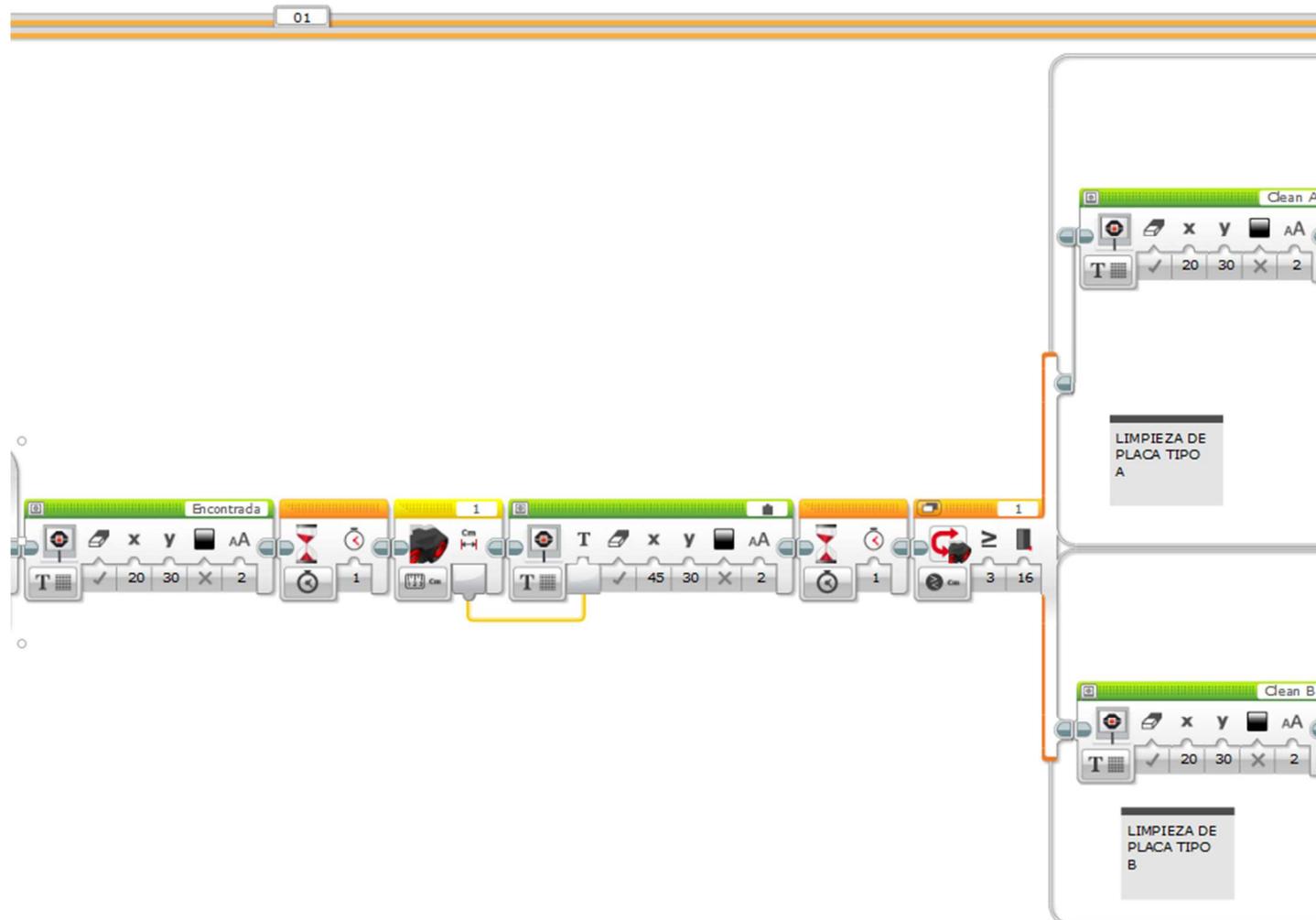


Parte C: detección de placa en vertical.



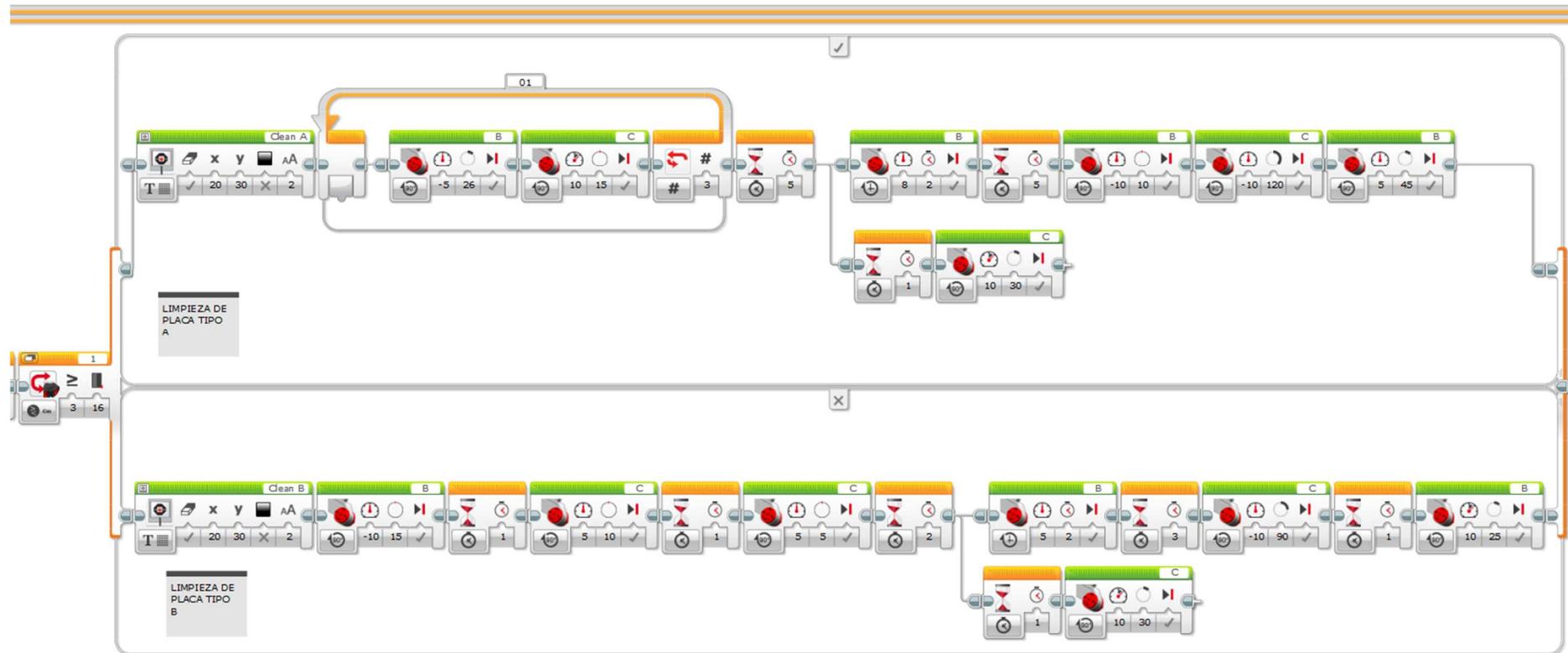


Parte D: comprobación de medida e inicio de selección de placa.



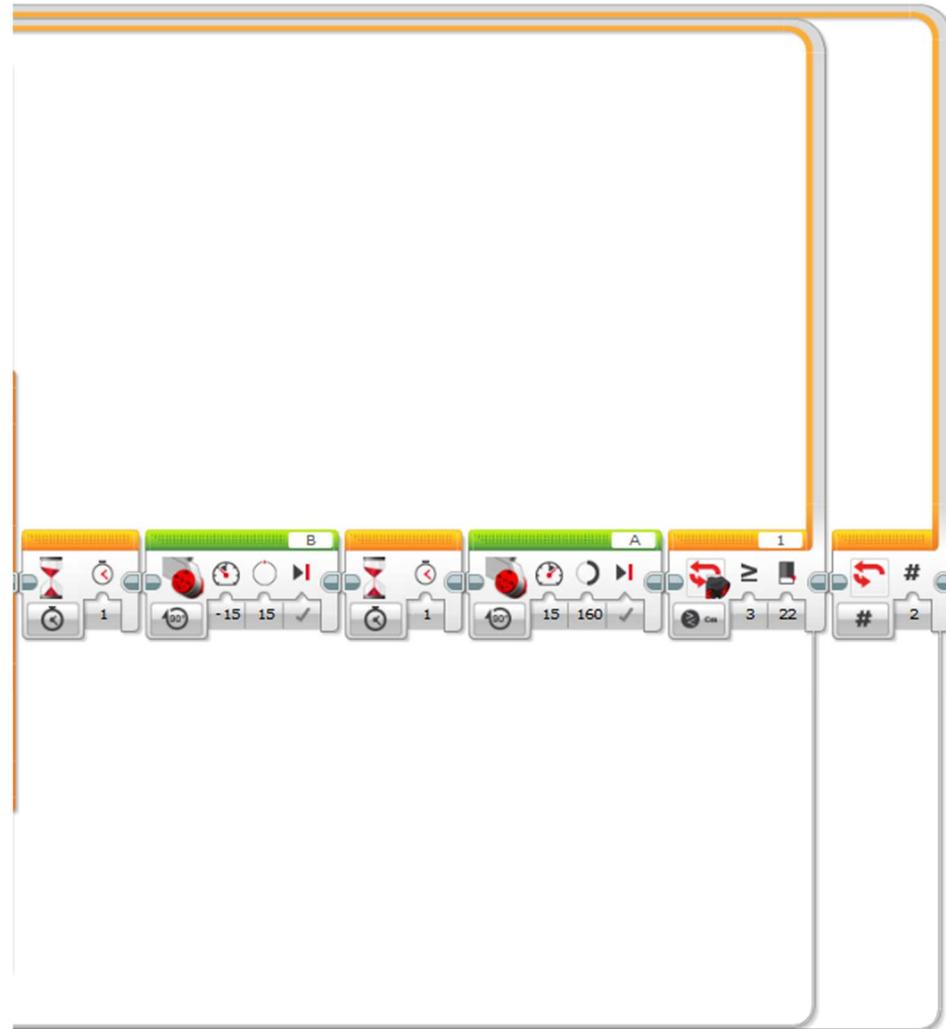


Punto E: rutinas de limpieza.





Punto F: fin del programa y cierre de bucles





Antes de analizar más en profundidad la composición de cada una de las partes que conforman este programa, se han de detallar y determinar los criterios de signos y ángulos que se introducirán en los parámetros de los bloques de programación.

Existen dos magnitudes que se pueden introducir en el modo “por grados” de los bloques de los motores en el *software* de programación.

- a) Fuerza: toma valores desde 1 a 100, se corresponde con el par motor del servo de Lego. Siendo 1 un valor de fuerza muy pequeño, pero más preciso y 100 el mayor pero más impreciso. Debe tenerse en cuenta la masa que se debe mover, pues un par pequeño no podría con una masa muy grande.
- b) Grados: toma valores de 1 a 360, se corresponde con toda la circunferencia. Ya que los servomotores son capaces de girar los 360° en cualquier dirección, únicamente siendo limitados por inclusiones de estructuras en los mismo, como es el caso de este diseño.

Muy importante establecer el criterio de signos respecto a las agujas del reloj, conformándose de la siguiente manera:

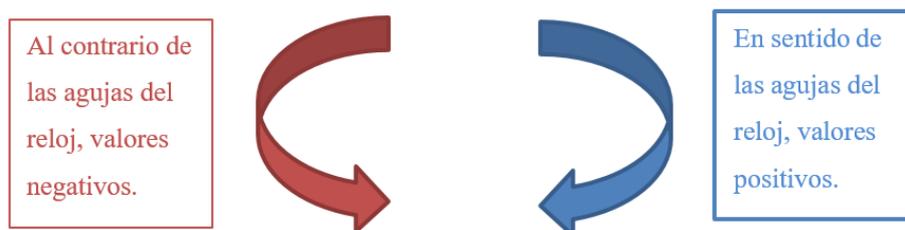


Ilustración 98: Criterio de signos en ángulos y par motor para introducir en bloques de programación.

También se ha de tener en cuenta cuando se vaya a introducir un ángulo, que los ángulos correspondientes a la segunda articulación, los ángulos calculados de θ_2 se ha de introducir su complementario al calculado, es decir, $180-\theta_2$.



Parte A: arranque de programa y detección de la placa en horizontal.



En el arranque el programa antes de comenzar a avanzar, el servomotor B incrementa los grados iniciales en 20° hacia arriba, para favorecer las lecturas del sensor de ultrasonido.

Ilustración 99: Parte a: movimiento de incremento 20° del servo B en el arranque.

Este movimiento se contrarrestará varias veces a lo largo del programa para poner y quitar de la posición inicial al brazo. Esto ayuda a favorecer las lecturas y reducir los errores de lectura del sensor, pues en la posición estándar al apuntar mucho hacia abajo da lugar a más errores.



Ilustración 100: Parte a: movimiento contrario al incremento de 20° para volver a la posición inicial.

Una vez el brazo se encuentra en posición de búsqueda, el servomotor A se acciona dentro de un bucle creado con la intención de que el movimiento de avance se repita una y otra vez y solo se interrumpa cuando el sensor de Ultrasonido detecte a una placa en su perpendicular, es decir, justo enfrente del mismo.

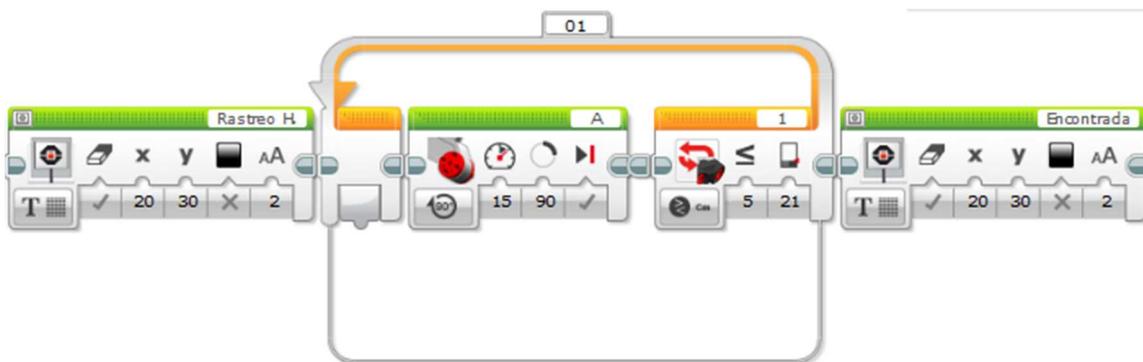


Ilustración 101: Parte a: bucle de búsqueda horizontal de placa.

El motor A girará con una fuerza de 15 según indica su bloque y con un movimiento de 90°, que se repetirá constantemente hasta que el bucle se detenga como hemos dicho antes. Este movimiento se ha decidido poner así, porque se vio en las



pruebas, que un avance corto pero repetitivo da lugar a menos errores en la lectura del ultrasonido, que con sentencias largas de avance.

Una vez el sensor detecta que hay una placa a menos de la distancia que fijamos como de zona de trabajo, es decir a 210 mm, este se detendrá, podremos visualizar con el control de medida cual ha sido. Después generará una pausa, que dará pie a la siguiente sentencia de la cadena de nuestro programa de limpieza.

Parte B: recogida de líquido detergente.

Una vez parado el carro de avance al detectar en el paso anterior, el brazo robot inicia los movimientos para descender e impregnar la parte superior del brazo que contiene la pala de limpieza con la esponja.



Ilustración 102: Parte B: movimiento de bajada para humedecer con líquido la esponja de la pala de limpieza.

El primer movimiento que se realiza en este paso, es el de volver a bajar el servomotor B para que se coloque de nuevo en la posición inicial. Una vez en su posición estándar de rastreo el servo B incrementa en 50° para después descender con el movimiento del servo C 130° y colocar la parte superior del brazo en el cubilete de limpieza. La elección de estos ángulos se corresponde con los calculados en el estudio previo de la cinemática inversa de los movimientos del robot.

Tanto la parte de descenso, como la de subida desde el cubilete de limpieza son bastante similares, pues el movimiento es simétrico y opuesto.



Ilustración 103: Parte B: movimiento de subida a posición inicial una vez humedecido la esponja de la pala de limpieza.

Únicamente se ha ajustado debido a las imperfecciones del par motor de los servomotores de Lego, pues son imprecisos y poco uniformes, además al iniciar la subida el peso del brazo es ligeramente mayor, y utilizar un movimiento parejo pero inverso al subir producía el atasco del motor al querer girar más que su limitación física.

Parte C: detección de placa en vertical.

Si en la parte A es el sensor de ultrasonido el encargado de determinar cuándo parar el avance del carro para empezar las secuencias restantes en esa placa. Ahora ejercerá una función similar y detectará en un barrido vertical, a que altura se encuentra el punto más alto de la placa en su posición vertical.

Para iniciarlo, el brazo deberá posicionarse a una distancia intermedia a la calculada en el movimiento de aproximación analizado mediante cinemática inversa y, una vez ahí subir a un punto muy elevado.

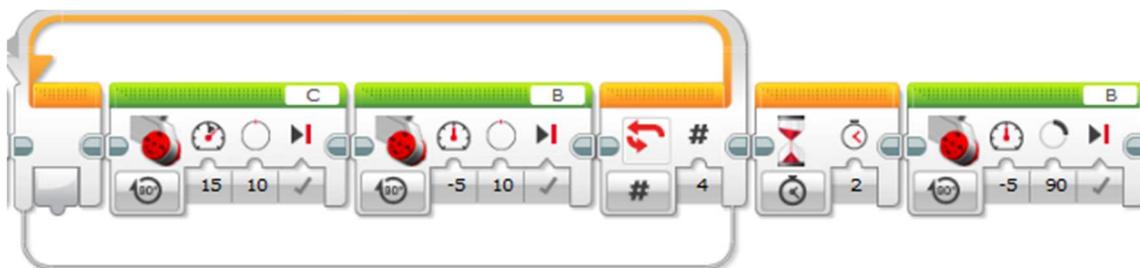


Ilustración 104: Bucle de subida desde la posición inicial para colocarse en posición de barrido vertical.

Como se ha visto en el análisis del movimiento de aproximación visto previamente, si desde la posición inicial tenemos los ángulos θ_1 y θ_2 con valores de 130° y 35° (aunque el valor calculado de θ_2 es 165°) y el destino es la parte superior.



Pero como para hacer estas pruebas y los posteriores ensayos, se ha añadido una placa distinta, por lo que se tiene en el banco de pruebas una en vertical y otra en horizontal. Para ello este movimiento se va a detener a mitad de camino y se va a iniciar un barrido vertical para determinar si es una o es otra, y actuar en consecuencia.

Por tanto, se ha escogido un bucle para subir el brazo a una posición intermedia para conseguir una mayor precisión, ya que subiendo poco a poco se consigue menor error y que prácticamente todas las repeticiones sean iguales, para así tener una medida desde el mismo punto siempre.

Una vez ahí el servo B realiza un movimiento de 90° para poder realizar un barrido desde una altura superior a la posible parte alta de la placa.

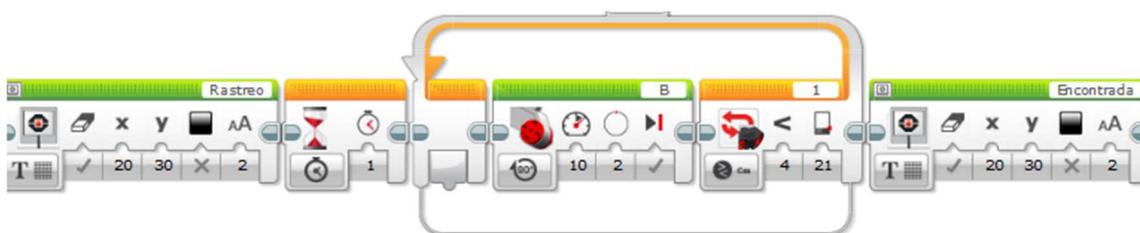


Ilustración 105: Parte C: bucle de búsqueda vertical de parte superior de la placa.

Para realizar una búsqueda, al igual que en el punto A, se va a usar un bucle continuo que finalice cuando corte por una distancia prefijada. Conforme está definido nuestro sistema conocemos que cuando el sensor detecte un objeto a menos de 210 mm, este será la parte más alta de la placa, pues al no ir muy rápido en el descenso no habrá lugar a errores.

Parte D: comprobación de medida e inicio de selección de placa.

Cuando el bucle de búsqueda de placa en vertical ha encontrado la parte superior de una placa, con esta medida, que se va a comprobar y visualizar en pantalla, vamos a realizar un bloque *switch*.

El *switch*, o bloque interruptor, es un contenedor que puede contener dos o más secuencias de bloques de programación. En este caso son dos secuencias. Una vez que el

sensor de ultrasónico tome una medida, esta será comparada con un dato predefinido, si este es mayor o igual que el dado realizará un caso, y si es menor realizará el otro.

Cuando el sensor de ultrasonido ha determinado que hay un objeto a menos de 21 cm de distancia mientras trazaba una circunferencia hacia abajo, generada por el movimiento del servo C, el brazo se detiene y el sensor realiza una nueva medición, esta vez como prueba al comienzo del bloque llamado Interruptor.

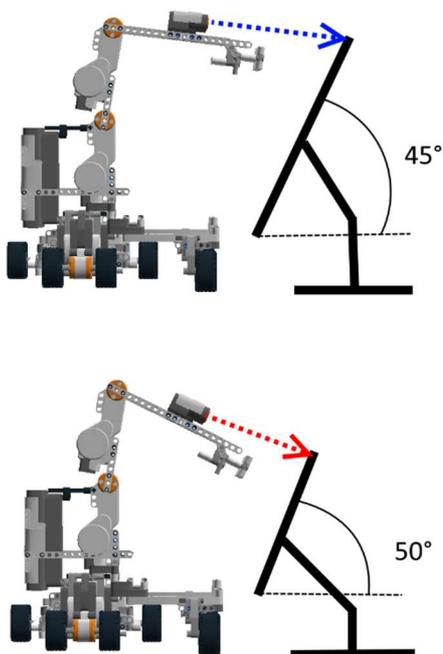


Ilustración 106: Perfiles cuando el sensor de ultrasonidos mide y compara las profundidades de las placas.

El bloque interruptor es un contenedor que puede contener dos o más secuencias de bloques de programación. En este caso son dos secuencias. Una vez que el sensor de ultrasónico tome una medida, esta será comparada con un dato predefinido, si este es mayor o igual que el dado realizará un caso, y si es menor realizará el otro.

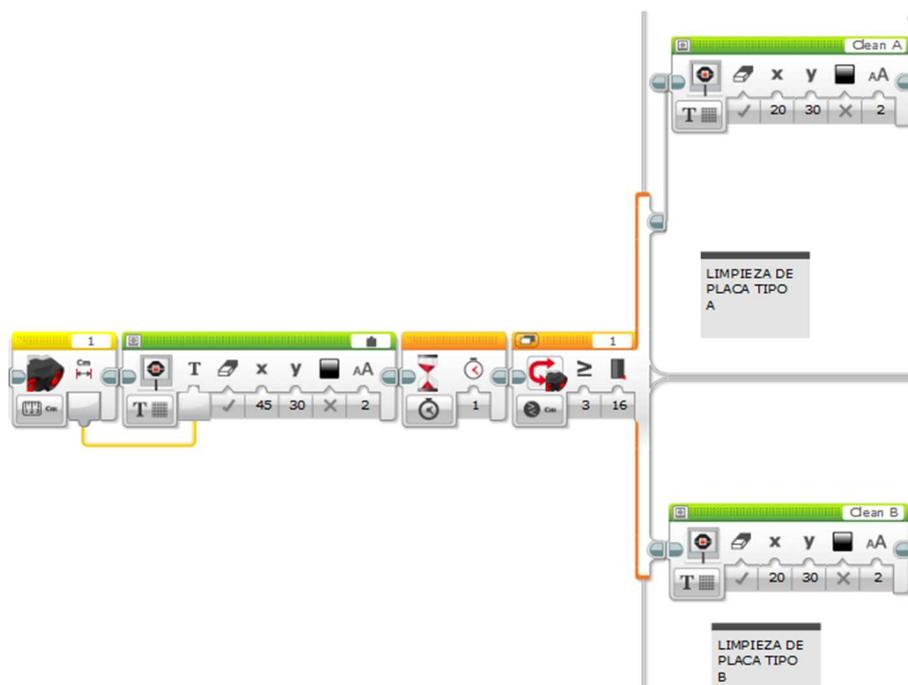


Ilustración 107: Parte D: lectura de profundidad de la parte alta de la placa y comienzo del switch diferenciador.



De inicio, cuando el sensor ultrasónico hace la medición en la parte más alta de la placa, esta medición se compara con el valor que hemos dado al bloque Interruptor. Este valor es 16. Si la placa en su punto más alto está a 16 cm o más (siendo menor de 21 claro), el interruptor optara por realizar el caso superior, que se denomina verdadero.

Punto E: rutinas de limpieza.

Como en esta versión del programa diseñado se ha incluido la posibilidad de limpiar dos tipos de placas, y como se ha visto en el punto anterior se tienen dos únicas posibilidades, se han incluido dos rutinas distintas, aunque bastante similares, de limpieza.

Cabe destacar que para el tipo de placa que hemos realizado un estudio más detallado en los análisis cinemáticos, no se ha incluido el movimiento resultante de ese análisis. En la práctica, ese movimiento punto por punto descendente producía saltos y discontinuidades en la limpieza. Las pruebas previas al desarrollo de estas rutinas han dado como fruto una limpieza por caída de la pala ayudada por un par de movimientos de las articulaciones.

Características placa tipo A:	Características placa tipo B:
- 200 x 140 mm	- 120 x 200 mm
- Altura desde el suelo: 60 mm	- Altura desde el suelo: 80 mm
- Inclinación: 45°	- Inclinación: 50°

Tabla 28: Características de los dos tipos de placas a limpiar.

Limpieza de placa Tipo A

Una vez determinado el tipo de placa por el bloque interruptor, se necesita llegar a la parte superior de la placa y hacer un barrido vertical por toda la superficie, y posteriormente volver a la posición inicial.

La primera parte de la secuencia es un bucle de movimiento de los servomotores C y B, que simplifican el movimiento reiterativo de posicionamiento en la parte más alta



de la placa. Un movimiento alternado de uno y otro servo causa menos perturbaciones en la estabilidad de la base del carro y del inicio del brazo.

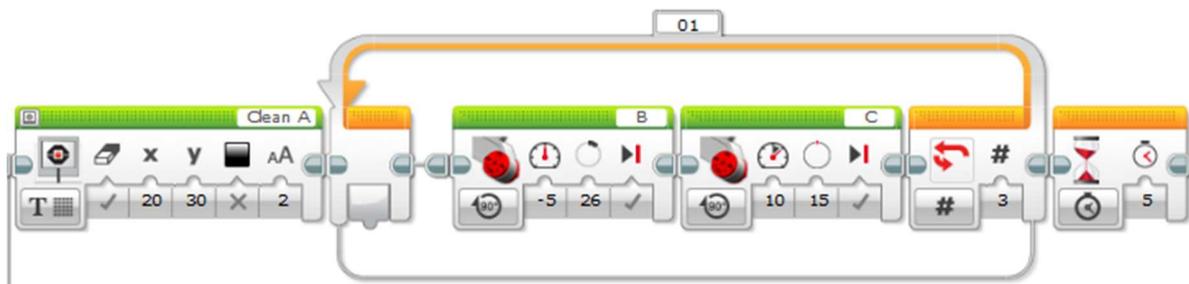


Ilustración 108: Parte E: movimiento de subida para llevar la pala de limpieza a la parte superior de la placa.

Una vez que la pala de limpieza y su esponja está ubicada en la parte más alta de la placa, se inicia la secuencia de limpieza con una pasada vertical hacia abajo, con una acción del servomotor B activado a potencia 5, muy suave, durante 2 segundos.

Este se coordina con un movimiento de 30° a potencia 10 para finalizar la limpieza de la parte baja. Ya se ha explicado porque optó por esta coordinación y como se ajustaba a un movimiento más fluido que el determinado por el estudio de cinemática inversa.

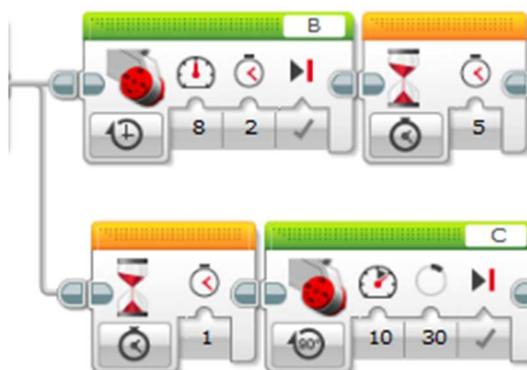


Ilustración 109: Parte E: movimiento de barrido vertical coordinado entre articulaciones para pala tipo A.

Para finalizar, una vez ha llegado al final del barrido en la placa, cuando vuelve la pala de limpieza con la esponja al cubilete del detergente, se inicia una recogida del brazo robot similar a la realizada en la fase de carga del detergente, con la finalidad de devolver al brazo a su posición inicial.



Ilustración 110: Parte E: movimiento de retorno hacia la posición inicial después del barrido en placa tipo A.



Limpieza de placa Tipo B

Cuando el sensor de ultrasonido da un valor inferior a los 16 cm estipulados, se pone en marcha la secuencia de módulos de la placa Tipo B, que al estar más cercana al sensor conlleva que es más baja y se debe aplicar otra rutina distinta de limpieza, la cual nos llevara una elevación menor por lo que se va a realizar un bucle de posicionamiento como la vez anterior sino una aproximación suave y cercana a la parte más alta de la placa.



Ilustración 111: Parte E: movimiento de posicionamiento en la parte alta de la placa tipo B.

La aproximación como se ve en la ilustración 111, se realiza con pequeños grados y pausas entre los movimientos de los servomotores del brazo robot, pues la placa está cercana.

Una vez posicionada en la parte más alta de la placa, la pala deberá recorrerla en un movimiento vertical y hacia abajo por toda la superficie de la manera más homogénea posible.

Al igual que en el Tipo A, se opta por un movimiento uniforme del servomotor B de dos segundos de duración, con una sincronización del servo C con respecto al B con un ajuste de un segundo para tener uniformidad en el desplazamiento hacia abajo. Como se aprecia en la imagen adyacente el servo C se mueve con una fuerza 10 y 30° en el sentido de las agujas del reloj, para así ayudar al movimiento del servo B en el desplazamiento hacia abajo de la placa, cubriendo así toda la superficie de la misma.

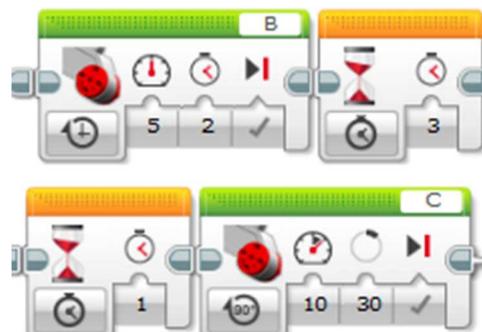


Ilustración 112: Parte E: movimiento coordinado entre las articulaciones para barrido vertical placa tipo B



De la misma forma que el movimiento final de la rutina de limpieza de la placa Tipo A termina con una secuencia de bloques realizando un retroceso hacia la posición inicial del brazo robot, esta rutina para la placa Tipo B sucede de manera similar.



Ilustración 113: Parte E: movimiento de retorno a la posición inicial de la placa tipo B.

Punto F: fin del programa y cierre de bucles

Una vez finalizado el primer barrido en vertical de la placa en cuestión finalizamos el interruptor y el carro realiza un avance corto para desplazarse hacia la derecha, y es entonces que se toma una nueva medida de distancia por ultrasonido en la posición estándar del brazo, si esa medida resulta mayor que la estipulada se daría por terminada la limpieza pues se entendería que el sensor está apuntando donde no se encuentra placa y por tanto debería empezar y reiniciar el programa de búsqueda de la misma.

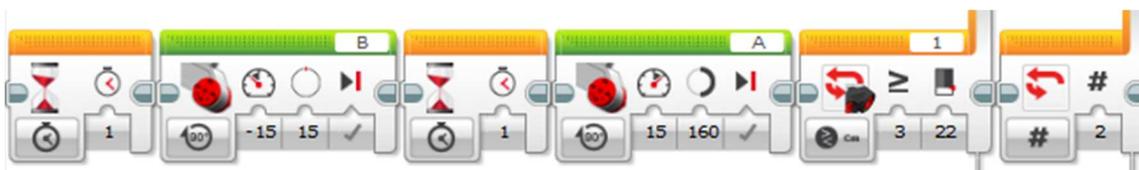


Ilustración 114: Parte F: avance y fin de bucles y programa.

En oposición, si el sensor de ultrasonido detecta una distancia menor a 22 se reinicia el bucle de limpieza y comenzaría de nuevo a recoger detergente, a detectar si es una placa Tipo A o Tipo B y a realizar una pasada vertical por la superficie de la placa.

El primer bloque que se refiere al servomotor B realiza una elevación de la parte que sostiene al sensor de ultrasonido para cometer el menor error posible, se eleva 15° sobre la posición inicial para asegurar una mejor lectura.



Después realiza un avance de 160° sobre el servomotor A, que es el que mueve el carro y es entonces cuando realiza la lectura, y como ya hemos comentado antes si supera, o iguala, la distancia predefinida cerraría el bucle y continuaría con la secuencia camino a la repetición del bucle mayor, el que engloba todo el programa.

Si finaliza el bucle de limpieza, la secuencia iría camino de la repetición total para que se pudiera de nuevo en modo búsqueda de placa y así sucesivamente. En los ensayos realizados con el prototipo, este bucle general del programa, únicamente lo hemos repetido una vez (marcando con un 2 en la casilla correspondiente), ya que solo hemos preparado dos placas para probar el funcionamiento del robot limpiador.

Si extrapoláramos el diseño del prototipo a una planta solar con una distribución lineal y por filas, deberíamos marcar tantas repeticiones como número de placas en serie en la misma línea. Igualmente, en ese caso se debería incluir un retroceso si dispusiéramos un limpiador por fila, o incluir como hemos visto en apartados anteriores, la incorporación de un rail por el que se iría desplazando entre filas el robot limpiador y así abaratar costes y poder disponer de un sistema único para toda la planta.



CAPÍTULO 5: RESULTADOS



5. RESULTADOS

A la hora de mostrar la eficacia de la limpieza de las placas, ante la imposibilidad de usar auténticas placas solares y poder ensuciarlas de un modo acorde a la realidad, se ha optado por realizar un estudio sobre el ejercicio inverso, es decir, sobre mediante un líquido colorante, ensuciar la placa para comprobar si la pala de limpieza y su esponja recorren completamente toda la superficie del panel solar a escala.

Como líquido que haga los usos de detergente que ensuciará en lugar de limpiar, se usará una mezcla homogénea de agua y tempera de color (azul o negro) para cubrir la superficie a modo de brochada e pintura. Se ha procurado que no tenga una consistencia ni muy densa, pues aumentaría mucho el peso y dificultaría las pasadas; ni poco densa, pues escurriría demasiado y dificultaría la impregnación en la superficie, lo que no da información de por donde ha pasado y no pasado la pala.

Los test consisten en realizar una serie de repeticiones sobre el campo de pruebas, exactamente diez repeticiones, tomar muestras fotográficas y evaluar cada impregnación con una malla superpuesta de la que se sacaran conclusiones porcentuales.

Se van a realizar cuatro test distintos, dos por cada tipo de configuración, ya que usaremos un campo con dos placas iguales y un campo con una de cada clase. Y también realizaremos por cada uno de ellos, la misma prueba, pero con una distancia de paso entre barridos distinta. Esto último aumentara las pasadas por cada placa a costa de ralentizarlo.

Se espera de estos test sacar unos resultados que nos indiquen el porcentaje de superficie recorrida por cada una de las placas y en condiciones distintas, que sería extrapolable a saber qué porcentaje de limpieza se podría obtener en un campo solar aumentando con ello el rendimiento de la instalación.

5.1 Test de suciedad para placa tipo A y tipo B a 60 mm de paso.

Para el primero de los test, se van a usar dos placas de dimensiones e inclinaciones distintas, en las que el robot pondrá a prueba la eficacia del programa previamente creado y automáticamente intercambiará el tipo de limpieza según la placa que detecte.

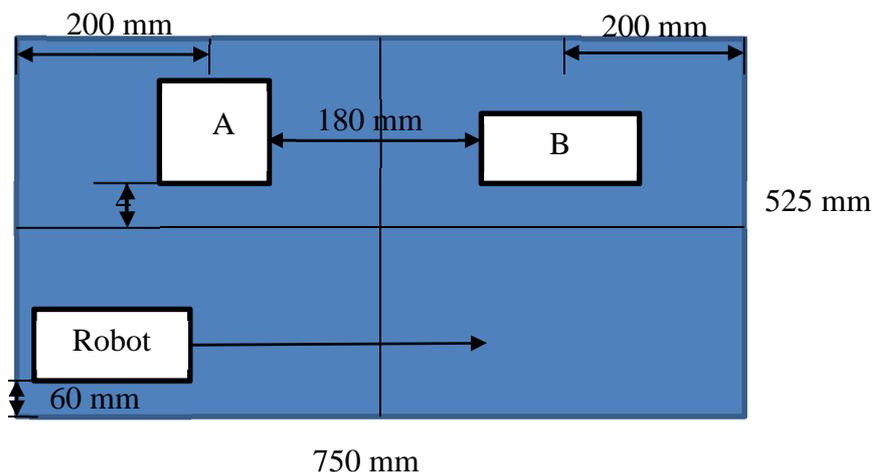


Ilustración 115: Esquema de disposición de test 1.

Características placa tipo A:	Características placa tipo B:
- 200 x 140 mm	- 120 x 200 mm
- Altura: 60 mm	- Altura: 80 mm
- Inclinación: 45°	- Inclinación: 50°

Tabla 29: Características de las placas del Test 1.

Se tomaron **20 muestras fotográficas** de 10 pruebas de limpieza del mismo sistema, manteniendo constante el paso y avance de las pasadas de limpieza y el movimiento entre placas, se compararon los tiempos, los posibles fallos y sobretodo el porcentaje de superficie limpiada (ensuciada en el caso de estos test). En el programa se mantendrá la distancia de paso en las rutinas de limpieza de **60 mm cada avance después de un barrido**.

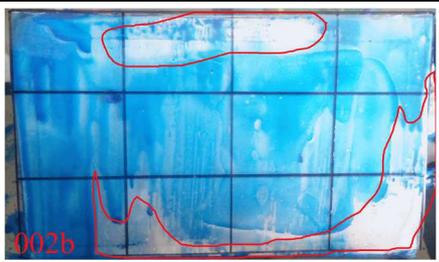
Para calcular el porcentaje de superficie recorrida se **divide cada placa en 12 celdas** idénticas, superponiendo en la placa impregnada de pintura colorante una lámina de acetato con las subdivisiones ya marcadas acorde al tamaño de cada placa.

El porcentaje del mismo lo calcularemos con una sencilla media aritmética del sumatorio por separado de cada una de las celdas, expresando el resultado en forma decimal. Para ello utilizaremos la ecuación 31, que consta de una media aritmética del porcentaje dividido por cien de cada una de las celdas, para así hallar la media global de cada placa.

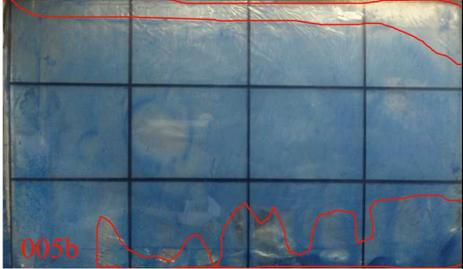
$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\%_i}{12} = \frac{\%_1}{12} + \frac{\%_2}{12} + \frac{\%_3}{12} + \dots + \frac{\%_{12}}{12}$$

Ecuación 31: Media aritmética de los valores de porcentaje cubierto de superficie de los test.

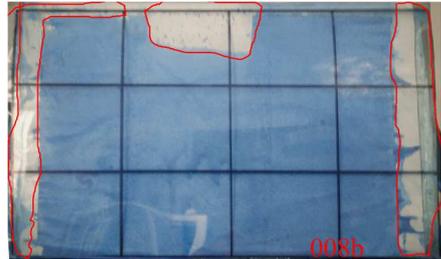
Las imágenes y porcentajes obtenidos son los siguientes:

1	 <p>001a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>001b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.95$
2	 <p>002a</p>	 <p>002b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.63$



	$\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.95$	
3	 <p>003a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.87$
4	 <p>004a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 <p>004b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$
5	 <p>005a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 <p>005b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.79$



<p>6</p>	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.87$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.83$
<p>7</p>	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$
<p>8</p>	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.98$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.75$

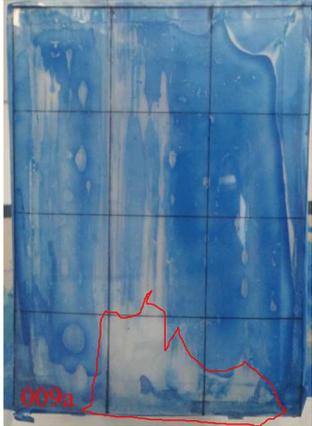
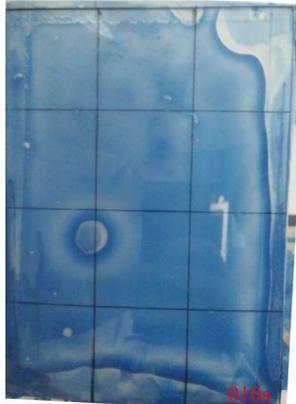
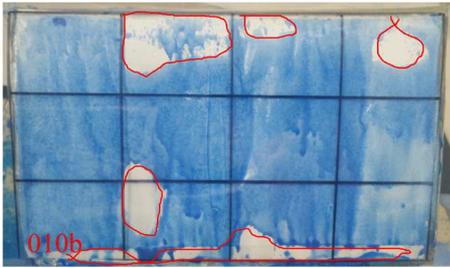
<p>9</p>	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.9$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.95$
<p>10</p>	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.80$

Tabla 30: Imágenes del Test 1.

Tabla de resultados:

N	Nº de barrido A/B	t	%A	%B
1	3/4	3'35''	100	95
2	3/4	3'41''	95	65
3	3/4	3'52''	100	87
4	3/4	3'45''	100	100
5	3/4	3'50''	100	79
6	3/4	3'46''	83	87
7	3/4	3'47''	100	97
8	3/4	3'42''	98	75



9	3/4	3'50''	90	95
10	3/4	3'46''	100	80

Tabla 31: Resultados del Test 1.

Obteniendo una media de limpieza del **91,3%** de superficie limpiada en **3 minutos y 45 segundos de media.**

En este primer test con unos resultados mejores de los esperados se puede decir que son bastante positivos, y salvo algunas interrupciones en barridos y alguna problemática correspondiente a la consistencia del líquido colorante, son bastante homogéneos y con un porcentaje muy alto de superficie recorrida.

Hay que destacar que la placa tipo A presenta mejores resultados que la placa tipo B, pues muchas veces cambio de una placa a otra genera cierta desviación y hace que la pala no pose bien en la parte superior y falle en algunas ocasiones. Se deben obviar también ciertas imprecisiones a la hora de colocar la plantilla con la malla pues distorsiona levemente la pintura adherida a la placa.

Muchos de los errores generados se relacionan con irregularidades en las lecturas del sensor de ultrasonidos, pues tiene un margen de error no despreciable y muchas veces no detecta cuando debiera, a destiempo o sencillamente no detecta lo que debería. Se entiende que con un sensor más preciso estos errores serian subsanados.

5.2 Test de suciedad para placa tipo A y tipo A con 60 mm de paso.

Para este segundo test, se han usado dos placas de dimensiones e inclinaciones iguales, al igual que en muchas plantas solares. Se vuelve a poner a prueba la eficacia del programa previamente creado y automáticamente volverá a limpiar una placa de similares características una tras otro guiado por el sensor de ultrasonidos.

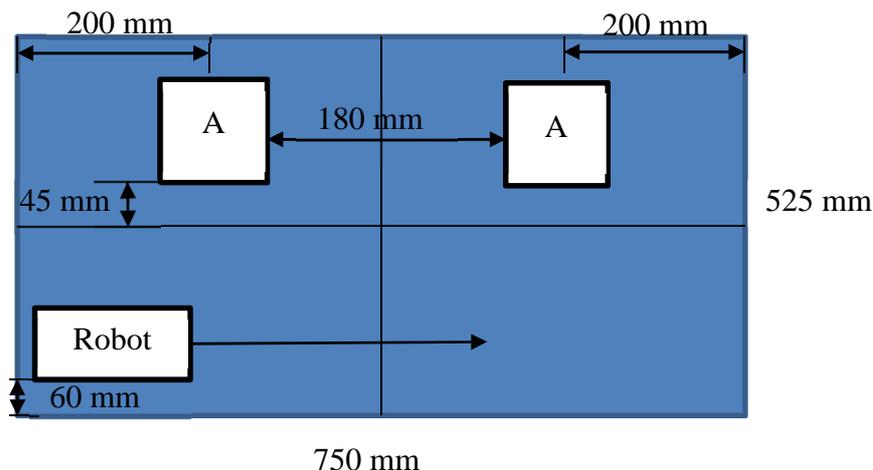


Ilustración 116: Esquema de disposición de test 2.

Características placa tipo A:
- 200 x 140 mm
- Altura: 60 mm
- Inclinación: 45°

Tabla 32: Características de las placas del Test 2

Se tomaron nuevamente **20 muestras fotográficas** de 10 pruebas de limpieza del mismo sistema, manteniendo constante el paso y avance de las pasadas de limpieza y el movimiento entre placas, se compararon los tiempos, los posibles fallos y sobretodo el porcentaje de superficie limpiada (ensuciada en el caso de estos test). En el programa se mantendrá la distancia de paso en las rutinas de limpieza de **60 mm cada avance después de un barrido**.

Para calcular el porcentaje de superficie recorrida **se divide cada placa en 12 celdas** idénticas, superponiendo en la placa impregnada de pintura colorante una lámina de acetato con las subdivisiones ya marcadas acorde al tamaño de cada placa.

Igual que antes el porcentaje del mismo lo calcularemos con una sencilla media aritmética del sumatorio por separado de cada una de las celdas, expresando el resultado en forma decimal.

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\%_i}{12} = \frac{\%_1}{12} + \frac{\%_2}{12} + \frac{\%_3}{12} + \dots + \frac{\%_{12}}{12}$$

Las imágenes y porcentajes obtenidos son los siguientes:

1	 <p>001a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12}^i = 1$	 <p>001b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12}^i = 0.83$
2	 <p>002a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12}^i = 0.91$	 <p>002b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12}^i = 0.73$



<p>3</p>	 <p>003a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.87$	 <p>003b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.85$
<p>4</p>	 <p>004a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>004b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$
<p>5</p>	 <p>005a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>005b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.95$



<p>6</p>	 <p>006a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.9$	 <p>006b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.66$
<p>7</p>	 <p>007a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 <p>007b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$
<p>8</p>	 <p>008a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$	 <p>008b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$

9	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.92$
10	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.95$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$

Tabla 33: Imágenes del Test 2.

Tabla de resultados:

N	Nº de barrido A/B	t	%A	%B
1	3/3	3'25''	100	83
2	3/3	3'17''	91	75
3	3/3	3'22''	85	87
4	3/3	3'25''	100	100
5	3/3	3'29''	100	95
6	3/3	3'36''	90	66
7	3/3	3'29''	100	100



8	3/3	3'36''	100	100
9	3/3	3'31''	100	92
10	3/3	3'27''	95	100

Tabla 34: Resultados del Test 2.

Obteniendo una media de limpieza del **92,95%** de superficie limpiada en **3 minutos y 26 segundos de media.**

Este segundo test con dos placas iguales mejora los resultados ligeramente de superficie que el anterior. Atribuible en gran parte a que al ser dos placas idénticas y ser el movimiento limpiador de este con mejores resultados aumenta el porcentaje de superficie global. Aun así, vuelve a haber algunas interrupciones en barridos y de nuevo alguna problemática correspondiente a la consistencia del líquido colorante, que aun cambiado su componente principal por otro distinto, sigue reflejando problemas e inconsistencias en la densidad. Aun así, los resultados son bastante homogéneos y con un porcentaje muy alto de superficie recorrida.

Hay que destacar que la primera placa tipo A presenta mejores resultados que la segunda placa tipo A, pues está demostrado que el cambio de una placa a otra genera cierta desviación y hace que la pala no pose bien en la parte superior y falle en algunas ocasiones. Se deben obviar también ciertas imprecisiones a la hora de colocar la plantilla con la malla pues distorsiona levemente la pintura adherida a la placa.

También hay que reseñar que al ser dos placas iguales y que requieren las mismas pasadas, influye en el tiempo que requieren para terminar las dos placas.

5.3 Test de suciedad para placa tipo A y tipo B de 35 mm de paso.

Para este tercer test, se van a usar de nuevo dos placas de dimensiones e inclinaciones distintas, en las que el robot pondrá a prueba la eficacia del programa previamente creado y automáticamente intercambiará el tipo de limpieza según la placa que detecte.

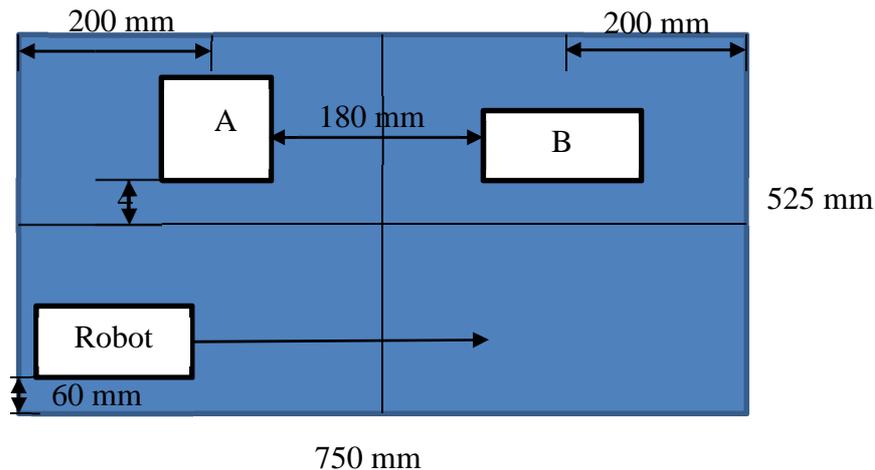


Ilustración 117: Esquema de disposición de test 3.

Características placa tipo A:	Características placa tipo B:
- 200 x 140 mm	- 120 x 200 mm
- Altura: 60 mm	- Altura: 80 mm
- Inclinación: 45°	- Inclinación: 50°

Tabla 35: Características de las placas del Test 3.

Se tomaron 20 muestras fotográficas de 10 pruebas de limpieza del mismo sistema, manteniendo constante el paso y avance de las pasadas de limpieza y el movimiento entre placas, se compararon los tiempos, los posibles fallos y sobretodo el porcentaje de superficie limpiada (ensuciada en el caso de estos test). En el programa se mantendrá la distancia de paso en las rutinas de limpieza de **35 mm cada avance después de un barrido**.

Para calcular el porcentaje de superficie recorrida se divide cada placa en 12 celdas idénticas, superponiendo en la placa impregnada de pintura colorante una lámina de acetato con las subdivisiones ya marcadas acorde al tamaño de cada placa.

El porcentaje del mismo lo calcularemos con una sencilla media aritmética del sumatorio por separado de cada una de las celdas, expresando el resultado en forma decimal.



$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\%_i}{12} = \frac{\%_1}{12} + \frac{\%_2}{12} + \frac{\%_3}{12} + \dots + \frac{\%_{12}}{12}$$

Las imágenes y porcentajes obtenidos son los siguientes:

1	 <p>001a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$	 <p>001b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$
2	 <p>002a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$	 <p>002b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$



3	 <p>003a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.85$	 <p>003b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 1$
4	 <p>004a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.85$	 <p>004b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 1$



5	 <p>005a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>005b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$
6	 <p>006a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$	 <p>006b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$



7	 <p>007a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$	 <p>007b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.9$
8	 <p>008a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$	 <p>008b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$



<p>9</p>	 <p>009a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.97$	 <p>009b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$
<p>10</p>	 <p>010a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.97$	 <p>010b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 1$

Tabla 36: Imágenes del Test 3.

Tabla de resultados:

N	Nº de barrido A/B	t	%A	%B
1	5/6	6'56''	97	100
2	5/6	6'41''	97	100



3	5/6	7'03''	85	100
4	5/6	6'45''	100	100
5	5/6	6'50''	97	100
6	5/6	6'46''	97	100
7	5/6	6'57''	97	90
8	5/6	6'52''	97	100
9	5/6	7'01''	97	100
10	5/6	6'49''	97	100

Tabla 37: Resultados del Test

Obteniendo una media de limpieza del **96,95%** de superficie limpiada en **6 minutos 52 segundos de media.**

En este tercer test con dos placas distintas, con la misma configuración que el primer test mejora los resultados remarcablemente con respecto a los dos anteriores, pero sobre todo con el primer test, ya que sus placas son idénticas. La diferencia con respecto al test de placas iguales hecho previamente es que ahora tenemos una distancia de paso entre barridos más pequeña, que conlleva más pasadas por placa.

Curiosamente es ahora la primera placa la que presenta un porcentaje peor de resultados, pero se puede atribuir en su mayoría a irregularidades en la placa que presentan una difusión del líquido en la placa, y no consigue reposarse bien, aún así, los movimientos de limpieza han mejorado considerablemente y el hacer más pasadas contribuye mucho a la uniformidad.

Aun así, vuelve a haber algunas interrupciones en barridos y de nuevo alguna problemática correspondiente a la falta de precisión del sensor de ultrasonido, porque alguna vez ha iniciado la limpieza un poco más debajo de lo que debería. Aun así, los resultados son bastante homogéneos y con un porcentaje muy alto de superficie recorrida.

Hay que destacar que la segunda placa tipo A presenta mejores resultados que la primera placa tipo A, aunque ya se visto que salvo por el error del sensor de ultrasonido y los errores de superficie que generan irregularidad, los resultados son bastante similares.



Por ultimo hay que destacar sobre todo que el incrementar el número de pasadas consigue mejorar bastante los resultados globales, aunque aumentan casi al doble el tiempo necesario para recorrerlos.

5.4 Test de suciedad para placa tipo A y tipo A.

Para el último de los test, se van a usar dos placas de dimensiones e inclinaciones iguales nuevamente, en las que el robot pondrá a prueba la eficacia del programa previamente creado y automáticamente intercambiará el tipo de limpieza según la placa que detecte.

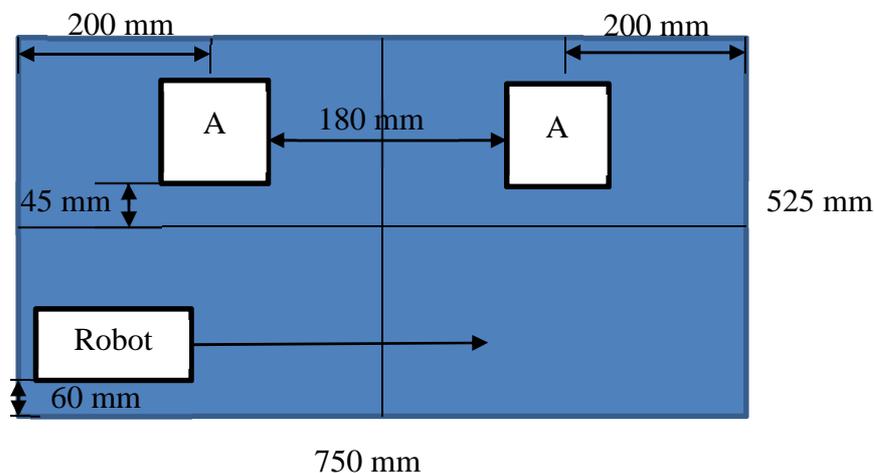


Ilustración 118: Esquema de disposición de test 4.

Características placa tipo A:
- 200 x 140 mm
- Altura: 60 mm
- Inclinación: 45°

Tabla 38: Características de las placas del Test 4.

Se tomaron 20 muestras fotográficas de 10 pruebas de limpieza del mismo sistema, manteniendo constante el paso y avance de las pasadas de limpieza y el movimiento entre placas, se compararon los tiempos, los posibles fallos y sobretodo el porcentaje de superficie limpiada (ensuciada en el caso de estos test). En el programa se



mantendrá la distancia de paso en las rutinas de limpieza de **35 mm cada avance después de un barrido.**

Para calcular el porcentaje de superficie recorrida **se divide cada placa en 12 celdas** idénticas, superponiendo en la placa impregnada de pintura colorante una lámina de acetato con las subdivisiones ya marcadas acorde al tamaño de cada placa.

El porcentaje del mismo lo calcularemos con una sencilla media aritmética del sumatorio por separado de cada una de las celdas, expresando el resultado en forma decimal.

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\%_i}{12} = \frac{\%_1}{12} + \frac{\%_2}{12} + \frac{\%_3}{12} + \dots + \frac{\%_{12}}{12}$$

Las imágenes y porcentajes obtenidos son los siguientes:

1	 <p style="color: red; text-align: center;">001a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.95$	 <p style="color: red; text-align: center;">001b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$
---	--	---

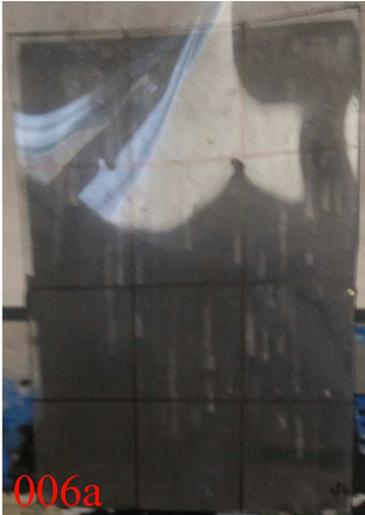


2	 <p>002a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.97$	 <p>002b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.97$
3	 <p>003a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.95$	 <p>003b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} \frac{i}{12} = 0.95$



4	 <p>004a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$	 <p>004b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.9$
5	 <p>005a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$	 <p>005b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.97$



6	 <p>006a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$	 <p>006b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$
7	 <p>007a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$	 <p>007b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$



8	 <p>008a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>008b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$
9	 <p>009a</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 1$	 <p>009b</p> $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{12} i = 0.97$

10	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$	 $\sum_{i=1}^{12} \frac{\%}{100} i = 0.95$
-----------	---	--

Tabla 39: Imágenes del Test 4.

Tabla de resultados:

N	Nº de barrido A/B	t	%A	%B
1	5/5	6'04''	95	97
2	5/5	6'07''	97	97
3	5/5	6'02''	95	95
4	5/5	6'15''	95	90
5	5/5	6'24''	95	97
6	5/5	6'16''	95	95
7	5/5	6'08''	95	97
8	5/5	6'18''	100	97
9	5/5	6'11''	100	97
10	5/5	6'07''	95	95

Tabla 40: Resultados del Test 4.

Obteniendo una media de limpieza del **95,85%** de superficie limpiada en **6 minutos y 11 segundos de media**.



Como último test con dos placas distintas, con la misma configuración que el segundo test mejora los resultados remarcablemente con respecto a los dos anteriores, pero sobre todo con el primer test, ya que sus placas son idénticas. La diferencia con respecto a los dos primeros test es que ahora tenemos una distancia de paso entre barridos más pequeña, que conlleva más pasadas por placa.

Aunque las placas presentan una gran homogeneidad entre ellas y unos muy buenos resultados, cabe destacar algunos errores en la superficie que desvirtúan los resultados finales, pues la mezcla de tinta y agua presenta imperfecciones y al hacer pasadas con las placas con restos secos de pintura y una superficie rugosa por las mismas, genera líneas blancas sin recorrer. Aún así, los movimientos de limpieza han mejorado considerablemente y el hacer más pasadas contribuye mucho a la uniformidad.

En este último test no han sucedido errores de imprecisiones por parte del sensor de ultrasonidos y aunque los errores de superficie que generan irregularidad, los resultados son bastante similares entre ambas placas y con un nivel muy alto de superficie recorrida.

Como en el test anterior es muy destacable que al incrementar el número de pasadas consigue mejorar bastante los resultados globales, aunque aumente casi al doble el tiempo necesario para recorrerlos.

Después de realizar estos test de limpieza (o de suciedad, según se mire) con el robot limpiador y al comprobar que las supera correctamente y con buen porcentaje de superficie recorrida, a continuación, se van a exponer una serie de conclusiones tras la realización de este trabajo fin de grado.



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES



6. CONCLUSIONES

La realización del presente trabajo fin de grado es fruto de muchas horas de investigación en búsqueda de información y comprensión para crear un robot móvil para el fin al que lo hemos destinado, la búsqueda de una solución automatizada a la problemática de la suciedad en paneles solares.

Se propuso como objetivo general construir un robot que principalmente constara de un brazo articulado móvil para ejecutar la limpieza automatizada de una serie de paneles solares. Dicho proyecto podría ser solución, de llevarse a cabo en una escala real y con mejoras en su composición, para la problemática provocada por el efecto negativo de la acumulación de suciedad y polvo sobre la superficie de paneles fotovoltaicos.

El objetivo general se subdividió a su vez en otros objetivos como son:

- Construir el robot (parte física), con la configuración adecuada de sensores.
- Analizar mediante la cinemática inversa las posibilidades espaciales que puede tener el brazo robótico a la hora de limpiar.
- Programar mediante el software de Lego los movimientos tanto de avance como de limpieza.

Para afrontar dicho problema con garantías, en una primera fase del proyecto, se realizó un estudio profundo sobre las posibilidades de la robótica móvil y autónoma, y las distintas posibilidades en cuanto a desarrollo podrían adoptarse. A su vez se plantearon diversas posibilidades al buscar un entorno tanto de programación como de construcción y se optó por la elección como se ha visto del paquete de LEGO Mindstorms que unificaba ambas búsquedas.

La construcción de este sistema automático se diseñó y montó con piezas del paquete citado, utilizando los servomotores para su movimiento y el sensor de ultrasonidos como modo de localización y control de los movimientos. Durante el estudio pudimos observar además los principales problemas relacionados con el desarrollo del



prototipo y los impedimentos que iban surgiendo acorde se avanzaba en el desarrollo tanto del software como del robot. Todos estos problemas y el análisis de los mismos sirvieron para construir nuestras propias soluciones y cumplir con los objetivos planteados inicialmente.

Estos objetivos se han cumplido, con unos resultados muy positivos en cuanto a la superficie limpiada de cada una de las placas en las que se han efectuado test diseñados para el capítulo de resultados. Cabría mencionar que quizás el peor aspecto a la hora de diseñar y presentar los resultados ha sido no poder contar con un sensor de ultrasonidos de una precisión mayor, ya que muchas veces durante la realización de los resultados de movimiento entre placas, este sensor causaba un falso positivo en la detección horizontal de la placa, poniendo en funcionamiento el programa de limpieza. Este error con un equipo más preciso en una posible versión comercial a escala real sería de fácil solución, por tanto, no habría que valorar este malfuncionamiento de manera determinante como error general de limpieza.

En este proyecto he hecho uso de la cinemática inversa, y el uso del paquete de LEGO Mindstorms ha producido un acercamiento al carácter educativo y pedagógico que tiene dicho contenido, aprendiendo los fundamentos y usos del software de LEGO. Las características de este proyecto me han permitido tener una aproximación al mundo de la robótica y junto a ello el uso y programación informática.

Durante su realización he aprendido la importancia que tiene la programación en el diseño de una máquina, la aplicación de las matemáticas como lenguaje global que puede explicar, diseñar y predecir prácticamente todo y el uso de las leyes generales de la mecánica para la resolución de problemas propios de ingeniería.

En líneas generales, puedo afirmar que ha sido una experiencia muy satisfactoria como complemento y colofón a mi formación en el grado de Ingeniería Eléctrica.



Bibliografía

- ¹ «Definición de robótica - RAE»
- ² Zunt, Dominik. (2008).«Who did actually invent the word "robot" and what does it mean? [¿Quién inventó realmente la palabra "robot" y qué significa?]». The Karel Čapek website.
- ³ Asimov, Isaac (1989). Círculo vicioso. Los robots. trad. Domingo Santos. Martínez Roca.
- ⁴ Gille, Bertrand (1985). La cultura técnica en Grecia, Juan Granica Ediciones. Barcelona
- ⁵ Messadié, Gérald (1995). Los grandes inventos de la humanidad, Alianza Editorial. Madrid.
- ⁶ Wood, Gaby. (2003). Living Dolls: A Magical History of the Quest for Mechanical Life. Faber & Faber; Edición: Main
- ⁷ SAHA, Subir Kumar. (2015) Introduccion a la robotica. McGraw-Hill.
- ⁸ Rivas, Maria. (2000). Robótica industrial: fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill.
- ⁹ Ollero Baturone, A. (2001) Robótica. Manipuladores y robots móviles. Marcombo.
- ¹⁰ Barrientos, A. y otros. (2007). Fundamentos de Robótica 2ª edición. McGraw-Hill.
- ¹¹ Torres, F. y otros (2002). "Robots y Sistemas Sensoriales". Prentice Hall.
- ¹² Hernández, Miguel (2003). Control de Robots y sistemas sensoriales. ISA Universitas
- ¹³ Suñer de Alzira, Luis. (2013, febrero 27). Partes de un Robot: La batería.
, a partir de <http://roboticasunyer.blogspot.com.es/>
- ¹⁴ Huidobro Moya, Jose Manuel. (2005). Comunicaciones en redes WLAN. Creaciones Copyright
- ¹⁵ Muller, Nathan J. (2002) Tecnologia del Bluetooth. McGraw-Hill.
- ¹⁶ El-Shobokshy, M.S.; Hussein, F.M. (1993). Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. Volume 51, Issue 6, December 1993, Pages 505-511. Solar Energy. Elsevier
- ¹⁷ El-Shobokshy, M.S.; Hussein, F.M. (1993). Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on its surface. Volume 3, Issues 6–7, September–October 1993, Pages 585-590. Renewable Energy. Elsevier



¹⁸ Madrigal, Rafael Iñigo; Idiarte, Enric Vidal. (2002). Robots industriales manipuladores. Univ. Politèc. de Catalunya

¹⁹ Cardona Foix, Salvador; Clos Costa, Daniel. (2001). Teoría de máquinas. Ediciones UPC. Barcelona.

²⁰ Fu, K.S.; González, R.C. y Lee, C.S.G. (1987) Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. McGraw-Hill.