

Grado Universitario en
Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Aplicación de sensores de proximidad
para automatización de tareas en
entornos hospitalarios”

Víctor Pozo Pérez

Tutor

Edwin Daniel Oña Simbaña

Leganés, Julio de 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

RESUMEN

La evaluación de la funcionalidad motora es uno de los principales componentes del proceso de rehabilitación. En algunos casos, los métodos de evaluación están basados en ejercicios repetitivos bien definidos regidos por escalas numéricas estandarizadas. Así, dichos métodos pueden ser susceptibles de ser automatizados, facilitando una evaluación objetiva de los progresos físicos del paciente. En este Trabajo de Fin de Grado se presenta el desarrollo de una aplicación basada en sensores de proximidad que permita obtener de forma automática la puntuación de la escala de evaluación *Box & Blocks Test* (BBT), destinado a medir la destreza manual gruesa y coordinación. Para ello, se han utilizado varios sensores de proximidad basados en el encapsulado SI1143 de tres fotodiodos junto con una placa Arduino. En primer lugar, se describe el método utilizado para la automatización de la puntuación del test, incluyendo la caracterización de los sensores y el diseño del prototipo. A continuación, se muestran los resultados experimentales de la tasa de acierto del método propuesto y un análisis de la calidad de detección en función de las zonas de detección. Finalmente, se exponen las conclusiones y futuros trabajos. Los resultados apoyan el uso de métodos automatizados en procesos de rehabilitación, buscando mejorar la objetividad de los análisis de resultados del test, así como la comodidad tanto de los pacientes como de los trabajadores en los centros de salud.

Palabras clave: Evaluación, Automático, Extremidad superior, Destreza manual, Rehabilitación, Sensores de proximidad.

DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento a todos lo que me han acompañado durante la realización de este proyecto, particularmente a mis padres y a las personas que me acompañan en mi día a día que han seguido con interés el progreso del mismo. Mi agradecimiento asimismo a mi tutor que me ha guiado a lo largo de todo el proyecto y ha sabido mostrarme la manera presentar mis ideas de la mejor forma. Además, agradecerle la oportunidad de llevar este proyecto un paso más allá, presentándolo para su consideración como artículo de investigación en las XXXIX Jornadas de Automática, con el título *Conteo automático de cubos en evaluación de destreza manual usando sensores de proximidad*. Finalmente, agradecer a los compañeros del Laboratorio de Robótica Asistencial del Parque Científico Tecnológico de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) por prestarme el material necesario y ayudarme en el diseño e impresión 3D.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Estructura del documento	3
2. ESTADO DEL ARTE.	4
2.1. Pruebas tradicionales de evaluación de la función del miembro superior	4
2.2. Sistemas automatizados basados en pruebas tradicionales	5
2.2.1. Automatización del Wolf Motor Function Test (WMFT).	5
2.2.2. Automatización del Action Research Arm Test (ARAT)	7
2.2.3. Automatización del Fugl-Meyer Assessment (FMA)	8
2.2.4. Automatización completa de una prueba de evaluación de destreza de las extremidades superiores. ReJoyce Automated Hand Function Test (RAHFT).	9
2.2.5. Automatización del Box & Blocks Test (BBT) mediante análisis de imagen	10
2.3. Sistema automatizado de destreza manual orientado al entrenamiento en cirugía.	12
3. MATERIAL Y MÉTODO	13
3.1. Box & Blocks Test (BTT)	13
3.1.1. Población clínica evaluable mediante el BBT	14
3.1.2. Resultados estandarizados para BBT	14
3.2. Análisis del problema	17
3.3. Tecnología de detección de proximidad	17
3.3.1. Sensores de proximidad fotoeléctricos	18
3.3.2. Sensores de proximidad capacitivos	21
3.3.3. Sensores de proximidad inductivos	22
3.3.4. Sensores de proximidad ultrasónicos	23
3.3.5. Sensores de detección basados en visión.	26
3.4. Elección del sensor de proximidad	26

4. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR	28
4.1. Sensor de Proximidad SI1143.	28
4.2. Características de detección de proximidad	29
4.2.1. Distancia de detección	29
4.2.2. Área de detección con un LED	30
4.2.3. Área de detección utilizando los tres LED.	32
4.2.4. Detección de objetos mediante el estudio del flanco de entrada en el área infrarroja.	34
5. SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTEO DE CUBOS APLICADA A LA PRUEBA <i>BOX & BLOCKS TEST</i>	36
5.1. Modelados previos del sistema de sensores	36
5.1.1. Consideraciones a tener en cuenta para el diseño del sistema de detección.	40
5.2. Sistema de detección implementado	41
5.2.1. Posición y orientación de los sensores	41
5.2.2. Separación entre sensores y gestión de ángulos muertos de visión	43
5.3. Presencia de interferencias con varios sensores	44
5.4. Lectura y análisis de datos de los sensores.	46
5.5. Fabricación de pieza para instalación de sensores.	47
5.6. Proceso de detección de cubos en la automatización del BBT	48
5.6.1. Reconocimiento del compartimento. Supresión del primer plano (FGS)	49
5.6.2. Tratamiento de la señal ADC	51
5.6.3. Algoritmo de detección	52
5.7. Representación de datos en tiempo real	53
5.7.1. Visualización mediante Processing	53
5.7.2. Visualización mediante Matlab	54
6. RESULTADOS	55
6.1. Efectividad del sistema	55
6.1.1. Tasa de acierto en el conteo automático BBT	57
6.1.2. Datos adicionales obtenidos.	59
6.2. Limitaciones	61
6.2.1. Errores de detección en la mecánica de movimiento del BBT	62

7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	66
7.1. Planificación temporal del desarrollo del proyecto	66
7.2. Presupuesto del proyecto	66
8. CONTEXTO SOCIOECONÓMICO	68
9. CONCLUSIONES	69
9.1. Objetivos cumplidos	69
9.2. Líneas futuras de trabajo.	70
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Pruebas tradicionales de evaluación de la función del miembro superior. (a) Test de Minnesota de Destreza Manual (MRMT). (b) Test Purdue Peg-board (PPT).	5
2.2	Sistema de automatización de tareas del test WMFT [8]. (a) Sensor IMU vestido en extremidad superior. (b) Cámara de visión.	6
2.3	Comparacion de resultados entre temporización manual y automatizada [8]. (a) Resultados participante 1. (b) Resultados participante 2.	6
2.4	Equipamiento ARAT [9].	7
2.5	Automatización del Test 4 de ARAT mediante sensores [11].	8
2.6	Automatización de las pruebas FMA de las extremidades superiores. [14]	9
2.7	ReJoyce [17]. (a) Estación de trabajo ReJoyce. (b) Tareas ReJoyce.	9
2.8	Digital Box & Blocks Test (DBBT) [19]. (a) Configuración de setup del DBBT. (b) Eficiencia del sistema DBBT.	10
2.9	Sistema ABBT [2]. (a) Estructura propuesta para la automatización de BBT en el Laboratorio de Asistencia Robótica de la UC3M. (b) ABBT interfaz gráfica.	11
2.10	Sistema IGlove[21]. (a) Distribución de sensores en IGlove. (b) Entrenamiento real con IGlove.	12
3.1	Box & Blocks Test (BBT).	13
3.2	Dinámica del Box & Blocks Test (BBT).	14
3.3	Material básico del <i>Box & Blocks Test</i>	17
3.4	Sensor de detección de barrera.	18
3.5	Sensor de detección autorreflexiva o difusa.	19
3.6	Sensor de detección sin supresión de fondo.	20
3.7	Sensor de detección con supresión de fondo.	20
3.8	Sensor de detección con supresión de primer plano.	20
3.9	Sensor de detección reflexiva con reflector.	21
3.10	Sensor de detección capacitivo.	22
3.11	Sensor de detección inductivo.	23

3.12	Sensor de detección ultrasónico.	23
3.13	Distancia de detección analizando el tiempo de vuelo	24
3.14	Distancia de detección analizando el cambio de fase de onda [27].	25
3.15	Efecto <i>Crosstalk</i> en aplicaciones con varios sensores ultrasónicos.	26
4.1	Sensor de proximidad SI1143.	28
4.2	Sensor de proximidad SI1143 [28].	29
4.3	Curvas características para el sensor SI1143. Superficie 50 cm ² . Superficie 15 cm ² . Superficie KODAK 10 cm ² (4.1).	30
4.4	Ángulo de detección del sensor de proximidad SI1143 [28].	31
4.5	Simplificación del ángulo de detección del sensor de proximidad SI1143.	31
4.6	Ángulo muerto del sensor SI1143.	32
4.7	Área de detección implementando los tres emisores LED del sensor SI1143.	33
4.8	Triangulación básica de objeto.	33
4.9	Detección por flanco de detección.	34
4.10	Flanco de entrada izquierdo. Primera detección de proximidad mediante LED 1.	34
4.11	(a) Primera detección: Flanco de entrada derecho, LED 2.. (b) Primera detección: Flanco de entrada superior, LED 3.	35
5.1	(a) Análisis de compartimeto con un único sensor. (b) Zonas de detección con un único sensor.	36
5.2	Compartimento con dos sensores en un lateral.	37
5.3	Límites de detección de dos sensores Si1143 instalados en el lateral del compartimento del BBT	38
5.4	Análisis de compartimeto con dos sensores. (a) Compartimento con dos sensores en esquinas opuestas. (b) Compartimento con dos sensores en esquinas de un mismo lateral.	39
5.5	Detección de pared lateral con sensores instalados en las esquinas del compartimento.	39
5.6	Interferencia en la señal infrarroja con sensores instalados uno enfrente del otro. (a) Interferencia entre los propios sensores. (b) Interferencia entre detección de cubo y los propios sensores.	40
5.7	Sistema de sensores implementados en la pieza divisoria de compartimentos fabricada mediante impresión 3D.	41

5.8	Area de detección del sensor. Distancias maximas entre el sensor y el compartimento (a = 273.3 mm, b = 305.3 mm, c = 226.3 mm).	42
5.9	Mecánica BBT. (a) Movimiento de desplazamiento real. (b) Trayectorias normales de recepción de cubos.	42
5.10	Orientación de los sensores generando una barrera de detección principal y otra de apoyo.	43
5.11	Diagrama de flujo de detección mediante barrera principal y barrera inferior.	43
5.12	Disposición de los sensores SII143 en la pieza divisoria del BBT.	44
5.13	Límites de detección de tres sensores Si1143 instalados en la pieza divisoria del BBT.	44
5.14	Presencia de interferencias con tres sensores instalados en el BBT. (a) Interferencias con compartimento vacio. (b) Interferencias con objeto fijo a 10 cm de distancia.	45
5.15	Detección de cubo con una señal similar a las interferencias del sensor. . .	46
5.16	Esquema eléctrico del sistema automático de conteo de cubos.	47
5.17	Pieza divisoria BBT fabricada mediante impresión 3D. (a) Vista frontal con sensores integrados. (b) Vista trasera con cableado integrado y conectores.	48
5.18	Diagrama general del proceso de detección de cubos en BBT.	49
5.19	Supresión de primer plano. Reconocimiento de compartimento.	49
5.20	Diagrama de reconocimiento de compartimento.	50
5.21	Diagrama de detección completa de la caída de un cubo.	52
5.22	Visualización de detección de cubos mediante Processing.	53
5.23	Visualización de puntuación BBT mediante MATLAB en tiempo real. . .	54
6.1	Porcentaje de acierto en detección automática.	57
6.2	Porcentaje de acierto en detección automática en ensayos similares a BBT.	58
6.3	Representacion de puntuaciones BBT obtenidas por el sistema automatizado.	59
6.4	Puntuación automatizada BBT.	60
6.5	Análisis de frecuencia de desplazamiento de cubos detectados automáticamente.	60
6.6	Porcentaje de detección de un compartimento. (a) Zonas de detección estudiadas. (a) Tasa de acierto por zona.	62

6.8	Vaciado de compartimento BBT durante su ejecución.	62
6.9	Distribución de zonas de agarre de cubos y área de lanzamiento habitual. .	63
6.10	Zonas de agarre cercanas al sujeto. (a) Zona 7, (b) Zona 8 y (c) Zona 9. .	64
6.11	Zonas de agarre a distancia media del sujeto. (a) Zona 4, (b) Zona 5 y (c) Zona 6.	64
6.12	Zonas de agarre a mayor distancia del sujeto. (a) Zona 1, (b) Zona 2 y (c) Zona 3.	65
9.1	Habitación de hospital.	
9.2	Pantalla táctil articulada instalada en una habitación de hospital.	
9.3	Desplazamiento de mano sobre el sensor de izquierda a derecha.	
9.4	Desplazamiento vertical de mano sobre el sensor.	
9.5	Ejemplo de implementación de menú para la aplicación.	
9.6	Prototipo dispositivo Non-Touch. (a) Dispositivo Non-Touch. (b) Vistas dispositivo Non-Touch.	
9.7	Diagrama general del proceso de navegación por menú y selección de lectura de libro.	
9.8	Diagrama de lectura de libro.	

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	Características de los sujetos masculinos estudiados	15
3.2	Características de los sujetos femeninos estudiados	15
3.3	Promedio del rendimiento de hombres y mujeres (números de cubos por minuto)	16
4.1	Datos de ángulo muerto para el sensor SI1143	32
5.1	Rango de valores de los parámetros de reconocimiento sin presencia de elementos alrededor del BBT.	50
6.1	Velocidades de desplazamiento en los ensayos del experimento de la efectividad del sistema.	56
6.2	Porcentaje de acierto en conteo automático a diferentes velocidades	56
6.3	Porcentaje de acierto en conteo automático BBT a diferentes velocidades	58
6.4	Resultados del experimento de porcentaje de detección en zonas de un compartimento.	61
6.5	Tasa de acierto en detección automática de desplazamiento de cubos por zonas.	65
9.1	Relación entre movimiento y orden de ejecución dentro de la aplicación	

1. INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se realizará una introducción a la importancia de la tecnología en la sociedad actual, haciendo especial hincapié en la tecnología en entornos hospitalarios y en la necesidad de la automatización de ciertos procesos dentro de los procesos de rehabilitación.

1.1. Introducción

En las últimas décadas, la sociedad ha visto como la tecnología ha experimentado una rápida evolución y como cada vez se desarrolla a mayor velocidad sorprendiendo con aplicaciones de última generación. La tecnología se ha implantado en todos los ámbitos de la sociedad, desde su desempeño en la industria, hasta su presencia directa en la vida cotidiana.

La aplicación de la tecnología para mejorar la calidad de vida de las personas se ve reflejada en casi todos los aspectos del día a día. El diseño de maquinaria capaz de realizar trabajos forzosos y repetitivos han permitido mejorar tanto la productividad de la industria como la comodidad de los trabajadores. La innovación en herramientas informáticas y de telecomunicación hacen posible acceder de manera rápida a todo tipo de información desde cualquier punto del planeta.

Uno de los campos en los que se desarrolla continuamente la tecnología es en el área del cuidado de la salud. A día de hoy, se puede observar como existen dispositivos orientados a mejorar la salud de las personas. Nuevos dispositivos como las pulseras de actividad son capaces de monitorizar las constantes vitales de una persona y analizar la actividad física realizada a lo largo del día. También existen dispositivos destinados al control de nivel de azúcar en sangre, vital para personas que padecen diabetes, o dispositivos de teleasistencia a personas mayores.

En la actualidad, la gran demanda de los servicios sanitarios hace necesaria una atención médica rápida y de calidad. Debido a la gran cantidad de personas que solicitan atención médica y los costes económicos que suponen, el personal médico dispone de un tiempo limitado para atender a cada paciente. Aplicaciones electrónicas e informáticas en entornos hospitalarios hacen posible incrementar la agilidad en procesos como la gestión de citas médicas, ensayos clínicos, pruebas para diagnóstico o rehabilitación. Estos facilitan tanto la labor de los trabajadores como la comodidad de los pacientes.

Haciendo referencia a los procesos de rehabilitación, se puede observar como son procesos de larga duración en los que los resultados visibles se obtienen tras un gran número de sesiones, que en algunos casos tienen que realizar durante periodos que abarcan varios años. Por este motivo, es necesario tener un seguimiento fiable de los resultados

obtenidos durante la rehabilitación, ya que evaluar su efectividad terapéutica es particularmente esencial [1], no solo para conocer la gravedad de la situación del paciente, sino para planificar un tratamiento efectivo.

Con frecuencia, los métodos de evaluación funcional están basados en movimientos discretos, acotados a una ventana de tiempo y regidos por escalas numéricas estandarizadas. Estos métodos de valoración pueden ser susceptibles de ser automatizados, facilitando una evaluación objetiva de los progresos físicos del paciente [2]. Esta automatización puede permitir a los terapeutas de disponer de una mayor información más objetiva de los resultados, aligerar la carga de trabajo facilitando un seguimiento más rápido, o incluso trabajar con varios pacientes a la vez.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una aplicación que permita automatizar la puntuación de la prueba *Box & Blocks Test* (BBT) destinado a la evaluación de destreza manual gruesa. La puntuación del test viene dada por el número total de cubos desplazados por el paciente durante un minuto. El número de cubos se cuenta manualmente al final del tiempo de la prueba. Así, en el presente trabajo se va a diseñar una aplicación sencilla basada en detección de proximidad para obtener automáticamente el total de cubos, buscando mejorar la objetividad en los análisis de resultados del test, así como la comodidad tanto de los pacientes como de los terapeutas.

Para la automatización de la puntuación del *Box & Blocks Test* (BBT) será necesario registrar la caída de objetos, en este caso cubos, durante un determinado periodo de tiempo. Por este motivo, la base para el desarrollo de esta aplicación es la búsqueda de una tecnología que permita detectar objetos pequeños, como los cubos usados en el test, de una forma eficaz. Por dicho motivo, es necesario realizar un estudio de los distintos sensores de proximidad que existen en el mercado. A continuación, se debe comprobar el funcionamiento real de los sensores de proximidad seleccionados, para el mejor aprovechamiento de sus cualidades y prestaciones en el diseño de la aplicación.

Por otro lado, es necesario realizar una serie de pruebas experimentales que recreen de forma precisa el propio test con las cuales obtener resultados y poder determinar la fiabilidad de los datos recogidos, así como la proyección de estos sobre los resultados clínicos reales durante un proceso de evaluación de un paciente.

Bajo este proyecto se quiere impulsar la mejora y el desarrollo de actividades en entornos hospitalarios que involucren a la tecnología actual, desde aplicaciones robóticas hasta diseño de dispositivos que mejoren tanto la calidad de vida de pacientes como facilitar el trabajo de médicos y personal sanitario.

1.3. Estructura del documento

La memoria de este trabajo se ha dividido en diferentes capítulos en los que se detalla el desarrollo de la automatización de la puntuación del *Box & Blocks Test* (BBT) y los resultados finales obtenidos durante la realización de este trabajo:

- En el Capítulo 1, se han presentado los objetivos y motivación de este trabajo.
- En el Capítulo 2, se analizan algunas de las pruebas de evaluación de destreza manual tradicionales, usadas en procesos de rehabilitación actuales, presentando su sistema y las ventajas que ofrecen. Además, se revisa el estado del arte de sistemas automatizados basados en los métodos tradicionales.
- En el Capítulo 3, se describe ampliamente el *Box & Blocks Test*, presentando además el caso de estudio que se aborda en el presente trabajo fin de grado. Además, se resumen las características de las diferentes tecnologías de detección por proximidad presentes actualmente en el mercado, justificando la selección de los sensores usados en la aplicación implementada.
- En el Capítulo 4, se presenta el sensor de proximidad seleccionado para el diseño la aplicación implementada, así como las principales características de funcionamiento que permiten diseñar el sistema final. La caracterización del sensor ha sido realizada empíricamente.
- En el Capítulo 5, se describe en detalle el sistema de conteo automático implementado para el presente trabajo fin de grado. En primer lugar, se muestran los resultados de diferentes configuraciones en la sensorización del compartimento del BBT. Dicho estudio preliminar ha permitido obtener la configuración más óptima y con mínimo número de sensores. A continuación, se detalla la implementación del sistema final, usando tres sensores de proximidad, así como las principales características y funcionalidades del sistema.
- En el Capítulo 6, se pueden observar los resultados experimentales realizados para medir la efectividad en el conteo automático del sistema desarrollado. Además, se incluye un estudio de las limitaciones y análisis de errores del método presentado.
- En el Capítulo 7, se incluyen la planificación y el presupuesto del proyecto.
- En el Capítulo 8, se discute el valor que puede tener el sistema en un marco socio-económico.
- Finalmente, en el Capítulo 9 se exponen las conclusiones a las que se ha llegado tras el proceso de desarrollo y la obtención de resultados, así como el trabajo futuro que queda por desarrollar.

2. ESTADO DEL ARTE

Hoy en día, gracias a los grandes avances tecnológicos en el campo de la medicina y la robótica es posible observar como se han implantado sistemas de asistencia robóticos en los sistemas sanitarios.

Existen en el mercado una serie de productos de alta tecnología capaces de evaluar la ejecución de movimientos durante la rehabilitación. Un ejemplo de este tipo de productos puede ser los desarrollados por el fabricante Tyromotion [3], el cual fabrica unidades de terapia robótica asistida. Cada una de estas unidades de terapia robótica esta destinada a la realización de ejercicios específicos durante la rehabilitación de ciertas carencias del paciente. Equipos como AMADEO® o DIEGO® están destinados a rehabilitación de la movilidad de las manos y los dedos en el primer caso, y de la movilidad articular de brazos y hombro en el segundo. Ambos sistemas cuentan con sistema software de registro de datos que evalúa los movimientos realizados.

Sin embargo, en la actualidad no se disponen de métodos de evaluación automatizados que se usen en procesos de rehabilitación. Dada la importancia de la valoración de los resultados de las terapias y procesos de rehabilitación, se pone de manifiesto la posibilidad de la contribución de la tecnología en este campo.

2.1. Pruebas tradicionales de evaluación de la función del miembro superior

El deterioro de la función motora en extremidades superiores puede ser resultado de una serie de afecciones diferentes. Con frecuencia se utilizan medidas de resultado funcional (MO) que se centran en el rendimiento de las actividades de la vida cotidiana (AVD), la destreza o la fuerza en la rehabilitación de un paciente [4]. Existen una gran variedad de ejercicios y pruebas para ejercitar y evaluar la destreza de las extremidades superiores validadas clínicamente. Alguna de las más extendidas son el Test de Minnesota o el Purdue Pegboard.

- Test de Minnesota de Destreza Manual (MRMT): Esta prueba mide la destreza manual fina y gruesa necesaria para manipular objetos con las manos siguiendo cinco modalidades de ejecución: colocación, rotación, desplazamiento y colocación con una mano o con ambas [5], [6]. El objetivo principal de este test es la evaluación de la capacidad de respuesta muscular a un estímulo visual. El material que se utiliza consta de una tabla que presenta 60 agujeros donde se colocan bloques de forma ordenada como se muestra en la Fig. 2.1a.
- Test Purdue Pegboard (PPT). Esta prueba, mostrada en la Fig. 2.1b, fue desarrollada en la década de los 40 como prueba de manipulación para la selección de

personal [7]. Más tarde, se llevó al campo de la medicina como prueba de evaluación de destreza manual fina para localizar posibles lesiones cerebrales. El objetivo del ejercicio es colocar y montar tantas piezas como sea posible en los agujeros que presenta el tablero durante un periodo de tiempo de 30 segundos [7].



Fig. 2.1. Pruebas tradicionales de evaluación de la función del miembro superior. (a) Test de Minnesota de Destreza Manual (MRMT). (b) Test Purdue Pegboard (PPT).

2.2. Sistemas automatizados basados en pruebas tradicionales

La mayoría de pruebas de evaluación de destreza presentan una mecánica de repetición de ejercicios, junto con un sistema de puntuación basado en escalas de tiempo o contabilización de repeticiones de movimientos. Estos hechos hacen que sean susceptibles de automatizar, buscando obtener unos resultados objetivos que permitan analizar su puntuación y evaluar la condición del paciente, eliminando el factor de subjetividad del terapeuta que administra la prueba. Del mismo modo, tiene la finalidad de facilitar en la mayor medida posible la labor del personal médico, proporcionando datos objetivos y agilizando la propia prueba de evaluación.

Estudios han comenzado a proponer y a desarrollar sistemas capaces de automatizar alguna de estas pruebas clínicas. Estos sistemas utilizan distintos tipos de sensores para analizar los movimientos realizados durante las pruebas y generar una documentación objetiva de la puntuación de estas. Sensores de fuerza e inercia, y nuevas tecnologías de análisis de imagen están siendo utilizadas para la automatización de todos estos test.

2.2.1. Automatización del Wolf Motor Function Test (WMFT)

El Wolf Motor Function Test (WMFT) [8] es una prueba de evaluación utilizada para determinar la habilidad de las extremidades superiores en pacientes que han sufrido un accidente cerebrovascular (ACV) o una lesión cerebral traumática (TBI). Esta es una de las pruebas más utilizadas en ensayos clínicos. El test está basado en 17 pruebas evaluadas en función de la capacidad funcional observada durante su realización. Las pruebas plantean la ejecución de movimientos de brazos, pronación y supinación de antebrazo, destreza manual y fuerza de agarre. La puntuación de este test se realiza obteniendo los tiempos que se tarda en completar cada uno de los ejercicios.

El trabajo desarrollado en [8] plantea automatizar alguna de las pruebas del WMFT mediante sensores de inercia (IMU) vestidos en las extremidades del paciente capaces de monitorizar sus movimientos como se observa en la Fig. 2.2. El microprocesador que lee cada uno de los datos obtenidos está implementado en el propio sistema vestible. La información de estos sensores es complementada con una cámara y un software de análisis de imagen que coordina todos los datos para obtener una puntuación.

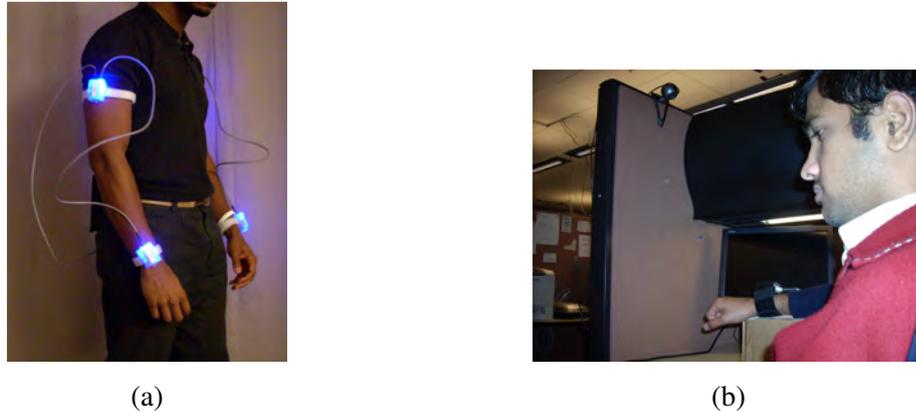


Fig. 2.2. Sistema de automatización de tareas del test WMFT [8]. (a) Sensor IMU vestido en extremidad superior. (b) Cámara de visión.

Durante la realización de este estudio se compararon los tiempos medidos manualmente por un terapeuta y los obtenidos por el sistema automatizado. Los resultados mostraron como el sistema automatizado era capaz de cronometrar con mayor precisión que el terapeuta. Esto se debe a las pequeñas pérdidas de tiempo por la capacidad de reacción del terapeuta tanto en el inicio como en la parada del cronómetro. El error obtenido entre el tiempo cronometrado manualmente y automatizado fue de 0.94s.

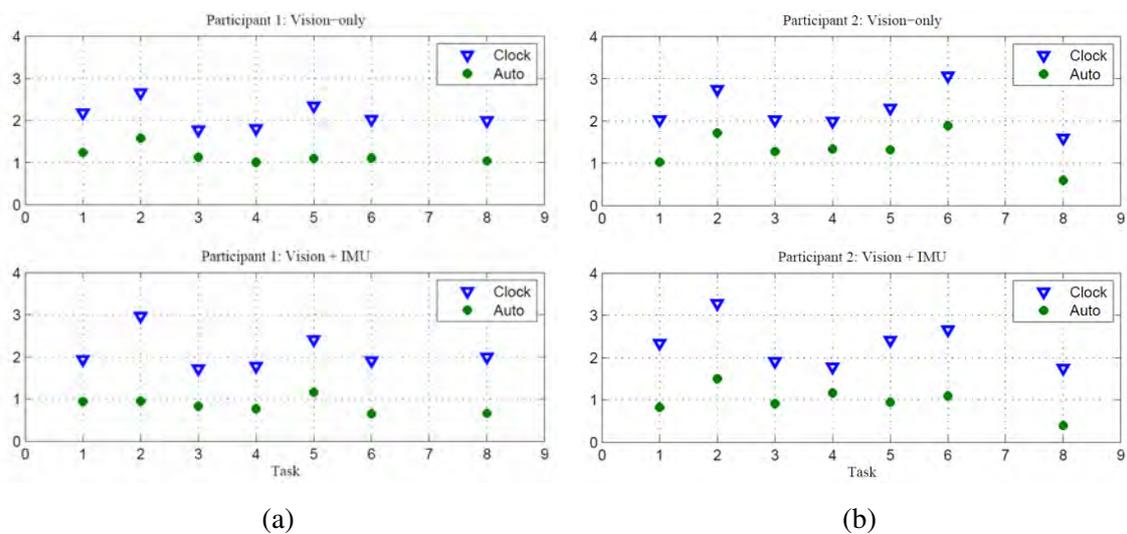


Fig. 2.3. Comparación de resultados entre temporización manual y automatizada [8]. (a) Resultados participante 1. (b) Resultados participante 2.

Hay que destacar que este sistema automatizado solo ofrece un conteo de tiempo preciso y no si la ejecución del ejercicio es correcta. La presencia de un terapeuta sigue siendo necesaria para evaluar si cada una de las 17 pruebas se realizan correctamente.

2.2.2. Automatización del Action Research Arm Test (ARAT)

La prueba de evaluación Action Research Arm Test (ARAT) [9] permite valorar la autonomía de la función de las extremidades superiores, evaluando la coordinación y destreza en personas afectadas por accidente cerebrovascular ACV, apoplejía y esclerosis múltiple. El test consta de 19 elementos de diferente tamaño, forma y peso con los que realizar diferentes tareas. Dichas tareas se agrupan en 4 escalas de evaluación: fuerza de agarre, capacidad de agarre, pellizco y movimiento grueso.

En la Fig. 2.4 se muestra el equipamiento requerido para el desarrollo completo de ARAT. Consta de varios bloques de madera de diferente tamaño, una pelota de cricket, una piedra, dos vasos, un tubo pequeño, un tubo grande, una arandela y un perno, una bola, una canica, una lata y una pieza de mármol.



Fig. 2.4. Equipamiento ARAT [9].

La prueba se evalúa de forma subjetiva puntuando en una escala de 0 a 3 puntos diferenciando entre: sin movimiento (0 puntos), movimiento realizado parcialmente (1 punto), movimiento completado pero con duración anormalmente larga (2 puntos) y movimiento completado normalmente (3 puntos) [10].

Como se observa, la puntuación de ARAT depende en su totalidad de la interpretación del terapeuta presente en la prueba. A simple vista es posible detectar altas deficiencias motoras, pero no las leves.

En [11] se propone introducir sensores en los objetos con los que se trabaja durante la prueba con el propósito de detectar el movimiento fino y la presión ejercida. Además, de este modo se evita colocar sensores vestibulares en el propio paciente que puedan resultarle incómodos o molestar durante la realización de la prueba.

Para llevar a cabo esta idea, se presentó un sistema de puntuación automática del Test 4 de ARAT mediante sensores. El ejercicio de este test implica el agarre de un bloque de

madera y su desplazamiento a una zona más elevada. Para su sensorización se implementaron un conjunto de sensores resistivos destinados a cuantificar la fuerza ejercida en las paredes del cubo al agarrarlo y un acelerómetro triaxial para mediciones de aceleración. Este sistema se muestra en la Fig. 2.5.

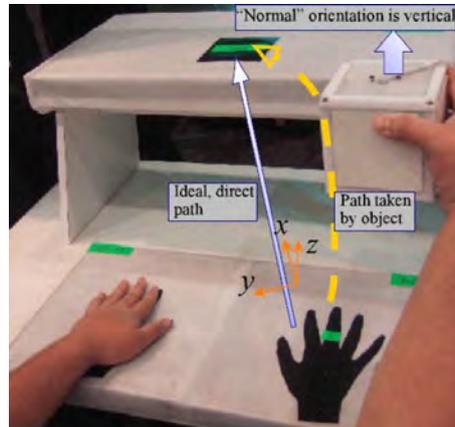


Fig. 2.5. Automatización del Test 4 de ARAT mediante sensores [11].

2.2.3. Automatización del Fugl-Meyer Assessment (FMA)

El Fugl-Meyer Assessment (FMA) [12], es uno de los métodos de evaluación más utilizados clínicamente. Consiste en la realización de 113 pruebas de movimiento tanto de las extremidades superiores como de las inferiores. Centrándose en las extremidades superiores se puede diferenciar las 33 pruebas correspondientes al Fugl-Meyer Upper Extremity (FMUE) [13]. Estas pruebas tratan de evaluar el movimiento realizado, la coordinación y la capacidad de reflejos en las diferentes partes de las extremidades superiores (mano, muñeca, antebrazo, codo y hombro).

La puntuación de cada prueba se obtiene de forma visual, evaluando la capacidad para realizar cada uno de los test. La realización y puntuación de las pruebas correspondientes a las extremidades superiores suele tener una duración de 30 minutos para cada paciente.

El sistema propuesto en [14] pretende automatizar las 33 tareas correspondientes a la evaluación de las extremidades superiores del FMA mediante sensores de bajo coste. Estos sensores se encargan de adquirir los datos de los movimientos para ser procesados mediante un algoritmo que determine la puntuación de la funcionalidad de las extremidades.

El sistema de sensores propuesto consta de varios ítems. Mediante un sensor Kinect se analiza la trayectoria de los movimientos de los pacientes en un espacio 3D. Para completar la información del movimiento se utilizan un sensor de inercia, un guante sensorizado que monitoriza el movimiento de la mano y los dedos y un sensor de presión para medir la fuerza de agarre. Para completar la automatización el sistema guía al paciente mediante la emisión por pantalla de las instrucciones, como se muestra en la Fig. 2.6, prescindiendo de personal clínico durante la prueba.

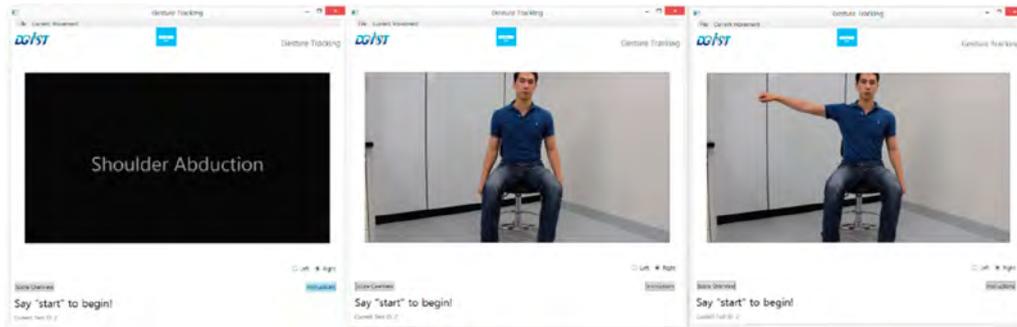


Fig. 2.6. Automatización de las pruebas FMA de las extremidades superiores. [14]

Mediante este sistema se pueden automatizar 22 de las 33 pruebas reduciendo el tiempo empleado en la evaluación de cada paciente un 82 % [14].

Por otro lado, aplicando el desarrollo de Serious Games, en otro estudio también se ha adaptado el FMA [15], en concreto las tareas de las extremidades superiores (FMUE). Los movimientos que debe realizar el usuario se ordenan desde el propio juego y un avatar presentado por pantalla recrea los movimientos reales que se están realizando.

2.2.4. Automatización completa de una prueba de evaluación de destreza de las extremidades superiores. ReJoyce Automated Hand Function Test (RAHFT).

La estación Rejoyce (Rehabilitation Joystick for Computer Exercise) [16] es una estación de trabajo compuesta por un brazo articulado. Está destinada a evaluar la capacidad de movimiento y manipulación de objetos dentro de rango de movimiento funcional de las extremidades de un paciente. Esta capacidad se evalúa mediante el equipamiento mostrado en la Fig. 2.8. La estructura permite realizar tareas de agarre, de supinación y pronación y tareas de colocación, similares a situaciones que se presentan en el día a día. Además, cada una de las tareas interactúa con un videojuego que se muestra por pantalla, haciendo el desarrollo de la prueba más amigable.

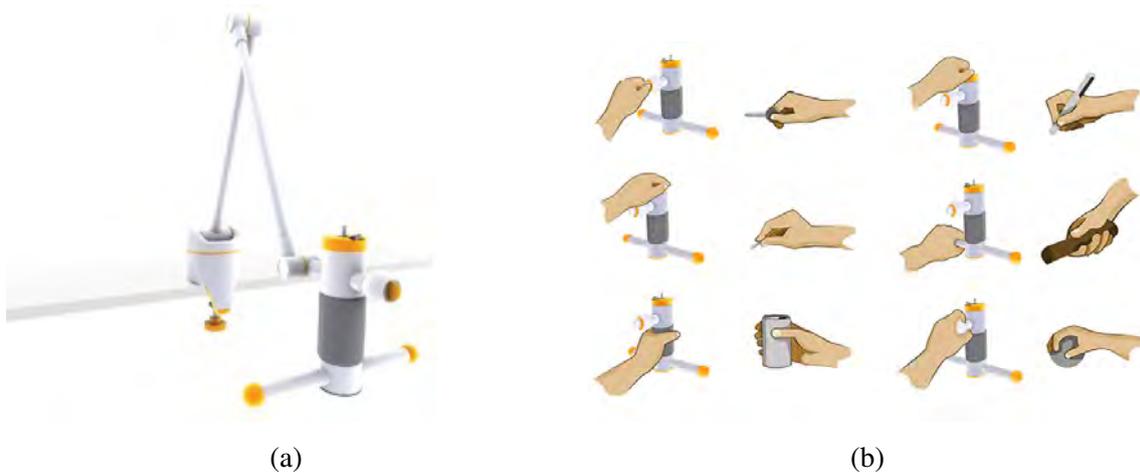


Fig. 2.7. ReJoyce [17]. (a) Estación de trabajo ReJoyce. (b) Tareas ReJoyce.

El trabajo desarrollado en [18], se propone la automatización completa del Rejoyce, presentando el sistema RAHFT (ReJoyce Automated Hand Function Test). En este proyecto se integran sensores (potenciómetros) en las piezas de agarre y mandos de la estación ReJoyce, cuyas señales se transmiten a un ordenador. Las señales se analizan por un software personalizado tanto para evaluar los movimientos del paciente como para controlar los videojuegos.

Los datos recopilados durante la ejecución de las pruebas se procesan en forma de variables de fuerza y presentan resultados objetivos de la condición física del paciente. Estos resultados, afirman en [18], hacen de RAHFT la primera prueba integral de la función motora de las extremidades superiores que no depende de juicio humano.

2.2.5. Automatización del Box & Blocks Test (BBT) mediante análisis de imagen

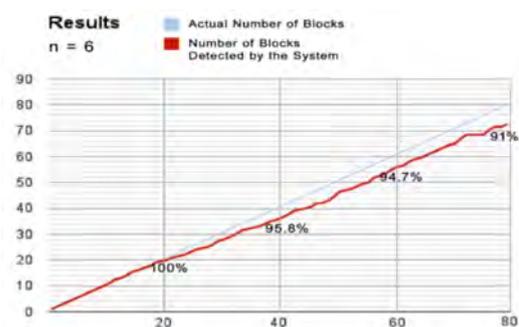
Digital Box & Blocks Test (DBBT)

Basado en la prueba tradicional Box & Blocks Test, el sistema presentado en marzo de 2013 denominado como Digital Box & Blocks Test, DBBT, implementa una cámara Kinect® en la parte superior de este para monitorizar el conteo de cubos de la prueba y los movimientos de la mano del paciente [19]. El sistema propuesto mostrado en la Fig. 2.8a, esta pensado para mejorar la precisión en el conteo de cubos que determinan la puntuación final del test, así como proporcionar datos objetivos de la prueba al terapeuta de forma remota.

El algoritmo desarrollado es capaz de detectar la zona de trabajo, modelando el análisis de imagen al interior de los compartimentos. Cuando el usuario desplaza cubos el sistema es capaz de detectar la forma de estos.



(a)



(b)

Fig. 2.8. Digital Box & Blocks Test (DBBT) [19]. (a) Configuración de setup del DBBT. (b) Eficiencia del sistema DBBT.

Este análisis por imagen también presenta una serie de problemas. Cuando la mano del paciente se mueve genera una sombra que dificulta la detección de cubos en el plano donde estos se encuentran. Además, la cámara no es capaz de detectar todos los bloques

acumulados en diferentes niveles.

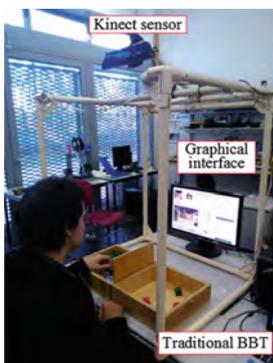
Los resultados obtenidos en [19] muestran una efectividad del 100 % en el conteo de hasta 20 cubos. A partir de este punto el sistema tiene dificultades para detectar un nuevo cubo, fallando en las detecciones llegando a obtener un 90 % de efectividad en el desplazamiento de hasta 80 cubos. Estos resultados se observan representados en la Fig. 2.8b

Automated Box & Blocks Test (ABBT)

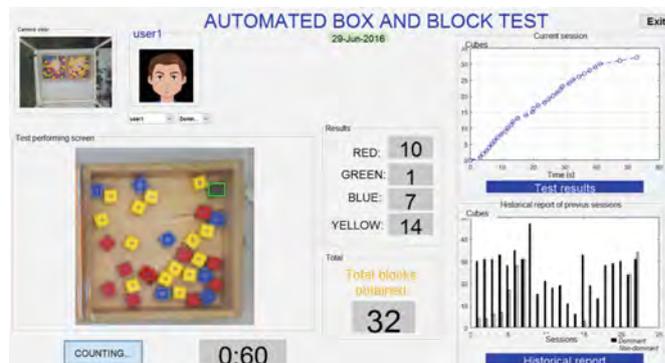
El Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid trabaja actualmente en el desarrollo de varios proyectos de robótica asistencial y sistemas robóticos de apoyo a la rehabilitación. Uno de estos proyectos está centrado en la automatización del BBT siguiendo la corriente de la DBBT.

El sistema ABBT propuesto en [2], busca automatizar el registro de los resultados obtenidos al realizar la prueba mediante visión por computador. En la Fig. 2.9a se muestra el sistema ABBT, compuesto de una estructura portátil en la cual se coloca en la parte superior una Kinect® V2 que detecta el número de cubos desplazados, así como los movimientos de la mano que realiza el sujeto [20].

El procesamiento de imagen se realiza mediante la herramienta de Software Matlab con la que se realiza el conteo de cubos en tres etapas: detección del borde de la caja, segmentación por color (RGB) y validación de puntuación [2].



(a)



(b)

Fig. 2.9. Sistema ABBT [2]. (a) Estructura propuesta para la automatización de BBT en el Laboratorio de Asistencia Robótica de la UC3M. (b) ABBT interfaz gráfica.

Además, el ABBT presenta una interfaz gráfica, Fig. 2.9b en la que se muestran los resultados relevantes para la evaluación de la prueba. Esta muestra los datos referidos al conteo de cubos, tanto el número de cubos desplazados totales, como la clasificación de los cubos por colores. También se presentan gráficamente la puntuación obtenida durante el desarrollo de la prueba, así como la imagen real obtenida por Kinect® y un contador de tiempo.

Para evaluar la prueba el terapeuta puede acceder a la información ya que es almacenada automáticamente en una base de datos. Generando esta base de datos se busca proporcionar una visión conjunta sencilla de la evolución a largo plazo de un paciente.

Atendiendo a los resultados obtenidos, mejora los del DBBT, llegando a detectar hasta 25 cubos con el 100 % de efectividad.

2.3. Sistema automatizado de destreza manual orientado al entrenamiento en cirugía

Como se puede observar, los dispositivos y aplicaciones presentadas en los apartados anteriores se centran en la evaluación de la destreza manual aplicables a pacientes, pero existen otro gran número de actividades en las que es necesario evaluar esta capacidad de destreza. Por ejemplo, profesiones como la de neurocirujano requieren de gran precisión manual.

Actualmente, existen simuladores de cirugía que permiten entrenar la destreza manual fina imprescindible para operar con herramientas quirúrgicas durante una operación. Estos simuladores se centran simplemente en el entrenamiento mediante repetición de situaciones reales, pero no reflejan las capacidades reales del profesional en forma de variables objetivas. Información como las trayectorias de la mano, la fuerza aplicada, los movimientos de los dedos y la sincronización de todos ellos reflejan el potencial de los futuros neurocirujanos.

El sistema presentado en [21] ha desarrollado un guante instrumentado con sensores denominado IGlove. Este sistema está compuesto por un dispositivo vestible compuesto por un guante en el que están instalados una serie de sensores inerciales. IGlove esta diseñado para ser integrado con el simulador Daubara NS Trainer, pero puede ser integrado con cualquier otro simulador o cualquier sistema de análisis de movimiento [21]. La Fig. 2.10 muestra el dispositivo IGlove con los sensores integrados en los dedos.

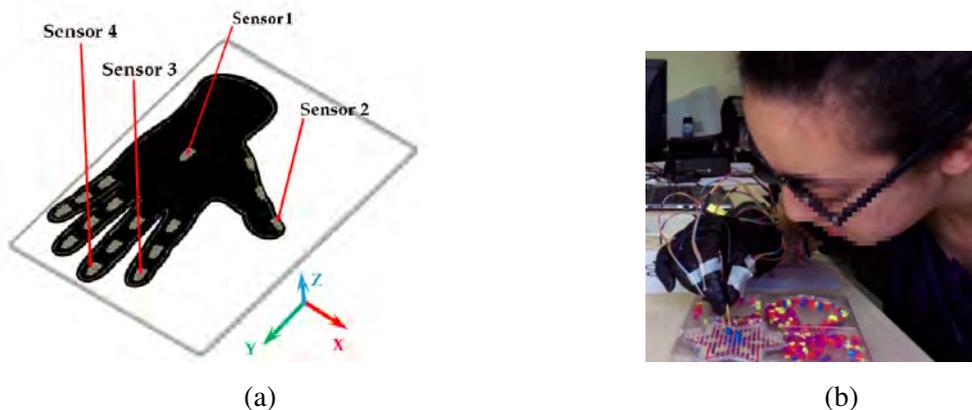


Fig. 2.10. Sistema IGlove[21]. (a) Distribución de sensores en IGlove. (b) Entrenamiento real con IGlove.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1. Box & Blocks Test (BTT)

El BBT es una prueba simple de medición de destreza y coordinación individual, destinado a evaluar la destreza manual gruesa en adultos con parálisis [22]. Se trata de un test simple y económico aplicable a cualquier tipo de paciente.

El BBT está formado por una caja de madera dividida en dos compartimentos cuadrados iguales de 260 mm de lado interior y separados por una pieza a modo de barrera de 100 mm de altura. Además, presenta 150 piezas iguales con forma de cubo de arista 25 mm. El objetivo de la prueba consiste en que el paciente mueva la mayor cantidad de cubos de un compartimento al otro en un tiempo máximo de 60 segundos sobrepasando por encima a la barrera. El equipamiento del BBT se debe orientar longitudinalmente, paralelo a los hombros del paciente. Antes de iniciar el test, todos los cubos deben estar en el compartimento más cercano a la mano que se va a estudiar. En la Fig. 3.1 se muestra el equipamiento del BBT.



Fig. 3.1. Box & Blocks Test (BBT).

La prueba se puede dividir en dos fases diferenciadas: un periodo de prueba y un periodo de evaluación de ambas extremidades superiores. En el periodo de prueba se permite al paciente practicar el ejercicio durante 15 segundos. Durante la evaluación se ponen a prueba en primer lugar la mano dominante o la mano no afectada, y en segundo lugar la mano menos dominante o la mano afectada.

Para dar por válido el desplazamiento de un cubo, la mano del paciente debe llevar un cubo desde un compartimento a otro, dejándolo caer y sobrepasando la partición con la yema de los dedos como se observa en la Fig. 3.2. En el caso de que el paciente desplace varios bloques a la vez en un mismo movimiento se cuenta como un solo desplazamiento. Por otro lado, cualquier bloque que caiga fuera del compartimento una vez completado correctamente todo el movimiento debe ser contado como válido.

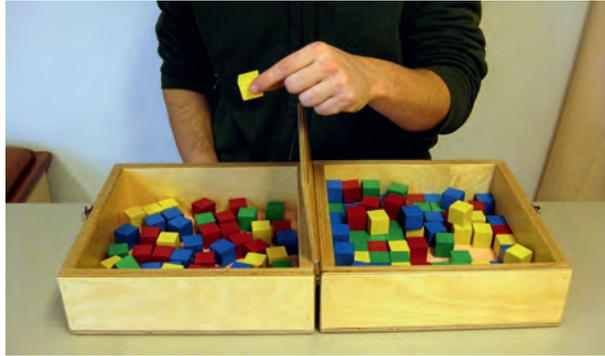


Fig. 3.2. Dinámica del Box & Blocks Test (BBT).

3.1.1. Población clínica evaluable mediante el BBT

Una de las cualidades que presenta el sistema de evaluación BBT es que puede ser realizado por la gran mayoría de pacientes con diferentes diagnósticos: accidentes cerebrovasculares (ACV), esclerosis múltiple, lesiones cerebrales por traumatismos (TBI), fibromialgia, trastornos neuromusculares, lesión de médula espinal (SCI), ancianos, etc [4], [23]. La sencillez de los movimientos a realizar hace posible evaluar la destreza y la coordinación de las extremidades superiores de cualquier tipo de paciente. Cada diagnóstico presenta una tabla característica estandarizada con la que comparar los resultados.

Cabe señalar, que personas con dificultades severas para realizar estos movimientos o que presenten un deterioro cognitivo severo no deben ser evaluadas mediante el BBT, ya que el propio paciente no se encontraría cómodo durante la evaluación y los resultados obtenidos no serían aptos para su análisis.

3.1.2. Resultados estandarizados para BBT

En junio de 1985 se publicó en *The American Journal of Occupational Therapy* un artículo en el que se detallaban las normas para llevar a cabo el *Box & Blocks Test* además de los resultados estandarizados tras realizar la prueba a sujetos en edades superiores a 20 años, sin ningún tipo de problema de movilidad en su tren superior. Meses después, en diciembre de 1985 se publicaron los resultados obtenidos tras ampliar el estudio a sujetos cuyas edades estaban comprendidas entre 6 y 19 años.

En las siguientes tablas se pueden observar los resultados obtenidos en el primer estudio publicado, los cuales son el estándar a la hora de evaluar los resultados de esta prueba en la actualidad.

TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUJETOS MASCULINOS ESTUDIADOS

Hombres			Mano dominante	
Edad	Nº Sujetos	Edad promedio	Dch.	Izq.
20-24	29	21.7	26	3
25-29	27	27.4	21	6
30-34	27	32.1	24	3
35-39	25	37.3	24	1
40-44	26	41.5	22	4
45-49	28	47.1	28	0
50-54	25	51.9	25	0
55-59	21	57.1	21	0
55-59	21	57.1	21	0
60-64	24	62.1	22	2
65-69	27	66.7	27	0
70-74	26	72.0	23	3
75+	25	78.9	25	0

Fuente *Adult Norms for the Box and Block Test of Manual Dexterity*[22]

TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUJETOS FEMENINOS ESTUDIADOS

Mujeres			Mano dominante	
Edad	Nº Sujetos	Edad promedio	Dch.	Izq.
20-24	26	22.4	26	0
25-29	27	26.6	25	2
30-34	26	32.1	23	3
35-39	25	36.4	17	8
40-44	31	42.3	30	1
45-49	25	47.1	25	0
50-54	25	51.9	22	3
55-59	25	56.5	25	0
55-59	25	56.5	25	0
60-64	25	62.4	24	1
65-69	28	67.3	25	3
70-74	29	71.8	28	1
75+	26	78.8	25	1

Fuente *Adult Norms for the Box and Block Test of Manual Dexterity*[22]

TABLA 3.3. PROMEDIO DEL RENDIMIENTO DE HOMBRES Y MUJERES (NÚMEROS DE CUBOS POR MINUTO)

Edad	Mano	Hombres			Mujeres		
		Cubos promedio	MIN.	MAX.	Cubos promedio	MIN.	MAX.
20-24	Dch.	88.2	70	105	88.0	67	103
	Izq.	86.4	70	102	83.4	66	99
25-29	Dch.	85.0	71	95	86.0	63	96
	Izq.	84.1	69	100	80.9	63	93
30-34	Dch.	81.9	68	96	85.2	75	101
	Izq.	81.3	69	99	80.2	66	92
35-39	Dch.	81.9	64	104	84.8	71	95
	Izq.	79.8	56	97	83.5	72	97
40-44	Dch.	83.0	69	101	81.1	60	97
	Izq.	80.0	59	93	79.7	57	97
45-49	Dch.	76.9	61	93	82.1	68	99
	Izq.	75.8	60	88	78.3	59	91
50-54	Dch.	79.0	62	106	77.7	57	98
	Izq.	77.0	60	97	74.3	53	93
55-59	Dch.	75.2	45	97	74.7	56	94
	Izq.	73.8	43	94	76.3	54	85
60-64	Dch.	71.3	52	84	76.1	63	95
	Izq.	70.5	47	82	73.6	62	86
65-69	Dch.	68.4	55	80	72.0	60	82
	Izq.	67.4	48	86	71.3	61	89
70-74	Dch.	66.3	50	86	68.6	53	80
	Izq.	64.3	45	84	68.3	51	81
75+	Dch.	63.0	47	75	65.0	52	79
	Izq.	61.3	46	74	63.6	51	81

Fuente *Adult Norms for the Box and Block Test of Manual Dexterity* [22]

3.2. Análisis del problema

El sistema de evaluación BBT presenta dos compartimentos en los cuales se cogen y se dejan caer una serie de piezas con forma de cubo. Para la automatización de la puntuación BBT en función de cubos transportados de un compartimento a otro es necesario sensorizar únicamente la zona en la que se dejan caer los cubos.

Para poder contar el número de cubos que caen en el interior del compartimento es necesario sensorizar toda el área de recepción, teniendo en cuenta las posibles alteraciones que se pueden presentar por factores externos. Elementos que se encuentren alrededor del BBT pueden entrar dentro de la zona de detección como pueden ser el propio sujeto que este siendo evaluado u objetos de mobiliario externo. Además, es necesario que la instalación de nuevos elementos en el BBT tradicional no molesten o entorpezcan el desarrollo normal de la prueba.



Fig. 3.3. Material básico del *Box & Blocks Test*.

El equipamiento BBT del que se ha dispuesto para la realización de este proyecto está fabricado de madera, mostrado en la Fig. 3.3. Los cubos utilizados, de lado 2.5 cm, también están fabricados de madera y están pintados de diferentes colores: rojo, verde, azul y amarillo. La barrera divisoria de los dos compartimentos tiene una altura de 10 cm respecto al borde superior de estos.

3.3. Tecnología de detección de proximidad

Para poder automatizar la puntuación BBT es necesario un sistema de detección capaz de operar acorde a las exigencias de esta prueba. Por ello es necesario conocer las diferentes tecnologías de detección de proximidad. En esta sección se van a estudiar los diferentes tipos de sensores de detección de proximidad presentes actualmente en el mercado para finalmente, discutir sobre las características que mejor funcionalidad aporten al sistema y realizar la elección de uno de estos.

3.3.1. Sensores de proximidad fotoeléctricos

Los sensores fotoeléctricos responden a un cambio de intensidad de luz detectada en función a una intensidad de luz umbral preestablecida. Esta variación de intensidad de luz recibida permite detectar la presencia de un objeto sin ser necesario estar en contacto físico con este. Alguna de las aplicaciones en las que se puede encontrar esta tecnología están ligadas a la industria, en la que se integran dispositivos de detección fotoeléctricos para contar el paso de objetos, medir su altura, comprobar su tamaño, detectar colores, controlar posiciones o monitorizar velocidades [3]. Además, se pueden controlar variables como la iluminación, la suciedad en el ambiente o la presencia de humo ya que afectan directamente a la intensidad de luz detectada.

Estos sensores se componen principalmente por dos elementos electrónicos: un componente emisor que genera luz y un componente receptor que detecta la variación de luz generada. El funcionamiento se basa en el principio de reflexión de la luz. El elemento emisor, generalmente un LED, emite una longitud de onda (luz visible, infrarrojo) que es recibida por el elemento receptor. Cuando un objeto interrumpe el haz de luz se produce una variación en la intensidad de luz, que es detectada por el receptor modificando la corriente que circula por este en función de dichos valores de luz.

Los sensores fotoeléctricos se pueden clasificar en función de la disposición de sus elementos emisor y receptor en tres tipos: configuración de detección de barrera, configuración de detección autorreflexiva, configuración de detección reflexiva con reflector.

DetECCIÓN DE BARRERA

Los componentes emisor y receptor se encuentran en dispositivos separados colocados de forma alineada y enfrentados uno al otro como se muestra en la Fig. 3.4. El emisor proyecta el haz de luz directamente hacia el receptor. Cuando un objeto se encuentra entre el emisor y el receptor, el rayo de luz se interrumpe produciendo la detección.

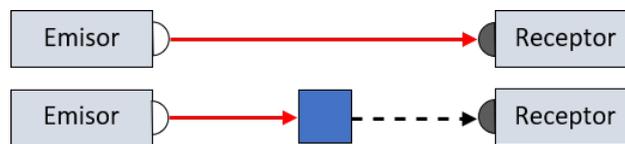


Fig. 3.4. Sensor de detección de barrera.

Este tipo de sensores permiten operar entre distancias largas, superando incluso los 100 m. Además, son funcionales en entornos sucios y con mucho polvo en el ambiente ya que el emisor envía toda la potencia del haz de luz directamente al receptor, haciendo que estas condiciones adversas no varíen en gran medida la intensidad de luz [24].

Por otro lado, esta configuración está diseñada para detectar objetos con un grado de opacidad alto ya que los objetos translúcidos o transparentes dejan pasar la luz [25]. Si el

nivel de opacidad del objeto es muy bajo el haz de luz lo atraviesa llegando al receptor, por lo que produciría la detección.

DetECCIÓN AUTORREFLEXIVA

Como se puede observar en la Fig. 3.5, los componentes emisor y receptor se encuentran en un mismo dispositivo. El emisor proyecta luz que incide sobre el objeto a detectar y se refleja en el receptor. Al no concentrar la proyección de luz directamente hacia el receptor, sino que se realiza de forma difusa, se pierde gran cantidad del haz de luz. Además, en función de las características del objeto a detectar la luz es reflejada en diferentes trayectorias en el espacio, siendo solo una pequeña parte la que llega a ser captada por el receptor.

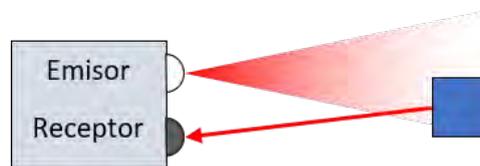


Fig. 3.5. Sensor de detección autorreflexiva o difusa.

Este tipo de sensores son una solución económica y de fácil instalación. El hecho de estar el elemento emisor y receptor en un mismo dispositivo hace posible que se puedan instalar en lugares con espacios reducidos, siendo necesario alimentar un solo punto.

Los sensores autorreflexivos se caracterizan por tener una distancia de detección corta. Las características del objeto condicionan directamente la distancia de detección. La geometría del objeto a detectar afecta en gran medida a la dispersión o concentración de luz detectada por el receptor [24]. Un objeto con mucha superficie es capaz de reflejar mayor cantidad de luz que un pequeño objeto con menor superficie. Además, el color también puede afectar a la distancia de detección. Los diferentes colores a lo largo de la gama cromática reflejan y absorben diferentes longitudes de onda en función de su factor de reflexión. A la hora de diseñar un sensor autorreflexivo se mide mediante el color blanco el alcance máximo (Estandar Kodak). Esta misma variación de detección en función del color se aprovecha para aumentar la flexibilidad de las prestaciones de los sensores haciendo posible utilizarlos como sensores de detección de color e intensidad luminosa.

A la hora de analizar las condiciones en las que va a operar un sensor autorreflexivo hay que atender al ambiente de operación y al entorno mecánico en el que va a realizar la detección de objetos. Respecto al ambiente de operación es necesario que no haya mucha acumulación de suciedad, polvo y humedad ya que estos factores hacen que disminuya la potencia del haz de luz [25]. Por otro lado, se pueden diferenciar tres tipos de análisis de la cantidad de luz recibida en función del entorno mecánico donde se encuentren los objetos.

- Detección sin supresión de fondo: toda la información detectada por el sensor tiene la misma relevancia, sin tener en cuenta si objeto a detectar es el que refleja la luz o es algún elemento situado detrás de este. Fig. 3.6

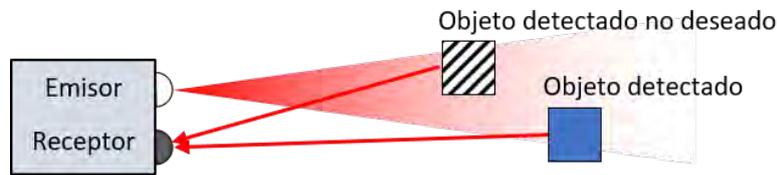


Fig. 3.6. Sensor de detección sin supresión de fondo.

- Detección con Supresión de Fondo (Background suppression, BGS)[25]: el análisis de luz reflejada se centra en la reflejada por el objeto, ignorando la información recibida de elementos que se encuentren más allá del objeto, como se observa en la Fig. 3.7. Este tipo de detección permite triangular la posición del objeto y seguir las posiciones de su trayectoria.

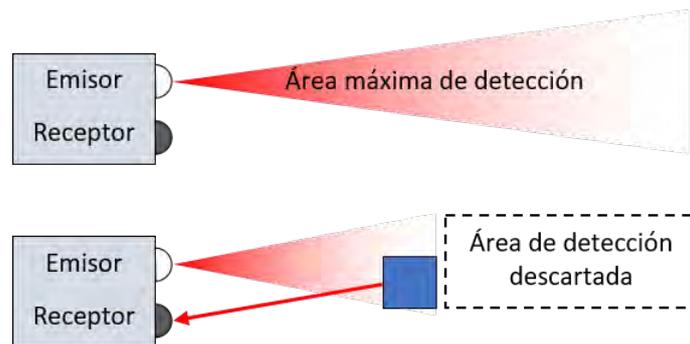


Fig. 3.7. Sensor de detección con supresión de fondo.

- Detección con Supresión del Primer Plano (Foreground Suppression, FGS): la cantidad de luz reflejada se ajusta a al entorno físico en el que está operando el sensor, es decir, se toma un valor de offset a las condiciones de inicio sin presencia de objeto. Todo objeto que quede dentro de ese rango de detección determinado será detectado, Fig. 3.8 . Esta configuración es común en la detección de objetos en cintas transportadoras.



Fig. 3.8. Sensor de detección con supresión de primer plano.

Detección reflexiva con reflector

Estos sensores fotoeléctricos se componen de tres elementos. El emisor y el receptor se encuentran en un mismo dispositivo a igual que los autorreflexivos. El tercer elemento es un dispositivo reflector encargado de reflejar la luz proyectada por el emisor hasta el receptor, Fig. 3.9 . En el momento que el haz de luz es interrumpido, el reflector deja de reflejar luz, por lo se produce la detección.

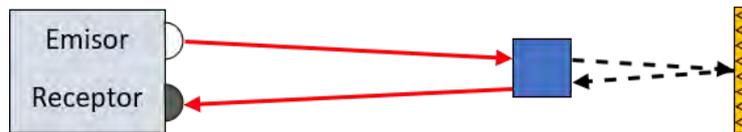


Fig. 3.9. Sensor de detección reflexiva con reflector.

Este tipo de sensores permiten operar en distancias largas ya que la luz emitida se devuelve en su totalidad al ser reflejada en el reflector [25]. Además, el color del objeto a detectar no afecta a la detección ya que se basa en una señal de todo o nada.

Por otro lado, presentan dificultades a la hora de detectar objetos transparentes o translucidos ya que dejan pasar la luz y puede llegar a ser reflejada por el reflector. Además, objetos brillantes pueden actuar como el elemento reflector haciendo imposible la detección. Para solventar estos problemas se utilizan elementos reflectores capaces de polarizar la luz haciendo posible diferenciar entre la detección real y la provocada por reflexión de luz errónea [24].

3.3.2. Sensores de proximidad capacitivos

Los sensores de proximidad capacitivos son capaces de generar un campo electroestático y detectar la aproximación de objetos en función de la variación de dicho campo [24], Fig. 3.10. Estos sensores se componen de una serie de elementos electrónicos para generar un campo electroestático y acondicionar la señal obtenida: una sonda capacitiva, un oscilador, un rectificador de onda y un circuito de salida. La sonda capacitiva está formada por dos placas alimentadas con diferentes potenciales y separadas por una capa de aire que actúa como aislante. Cuando se aplican una diferencia de potencial a estas placas almacenan energía. Si un objeto se acerca al sensor la constante dieléctrica de la sonda varía, haciendo que el oscilador cambie de amplitud. La etapa rectificadora convierte las oscilaciones en una tensión CC para ser amplificada por el circuito de salida.

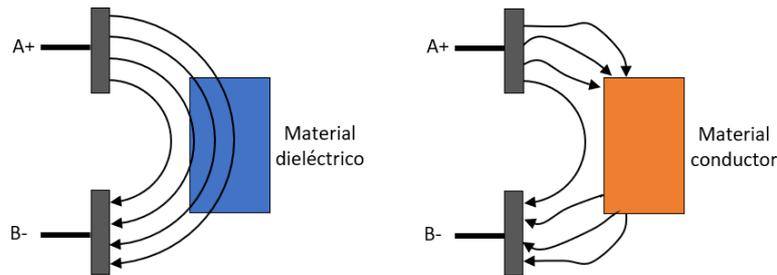


Fig. 3.10. Sensor de detección capacitivo.

Al basar su funcionamiento en la variación de un campo electrostático estos sensores permiten detectar objetos tanto metálicos como no metálicos. La gran mayoría de materiales, incluso teniendo en cuenta el estado en el que se encuentre, es capaz de variar la constante dieléctrica del material aislante entre las placas de un capacitor. Por este motivo, estos sensores son capaces de detectar materiales en estado líquido o partículas de polvo.

Una de las variables a tener en cuenta para este tipo de sensores es la distancia de detección, ya que hay múltiples factores que pueden afectar y condicionar la detección. El principal factor es la superficie de las placas del capacitor. Cuanto mayor sean estas, mayor será el campo generado. Por otro lado, la temperatura y la humedad pueden afectar al material dieléctrico entre las dos placas. Por ello es recomendable utilizar este tipo de sensores en entornos en las que las condiciones ambientales estén controladas.

A la hora de instalar un sensor capacitivo hay que tener en cuenta los elementos que se encuentran cerca de este. Los materiales de fijación u objetos que se encuentren alrededor pueden condicionar la operatividad del sensor. También se puede ver afectado por otros sensores cercanos. Para disminuir estos factores adversos, los sensores de proximidad capacitivos se blindan con una banda metálica. Este elemento se coloca rodeando la sonda capacitiva, ayudando a concentrar el campo electrostático en una dirección concreta [24].

3.3.3. Sensores de proximidad inductivos

Los sensores de proximidad inductivos están diseñados para detectar objetos metálicos sin contacto físico. Materiales no metálicos tales como plásticos, madera o cerámica son poco conductores por lo que no pueden ser detectados por estos sensores [26].

El principio de funcionamiento de los sensores inductivos se basa en la detección de presencia o movimiento de un objeto metálico utilizando un campo magnético [24]. Estos sensores se componen de una serie de elementos capaces de generar un campo magnético y acondicionar la señal obtenida como se muestra en la Fig. 3.11: un bobinado, un oscilador, un rectificador de onda y un circuito de salida. El oscilador alimenta el bobinado generando un campo magnético. Cuando un objeto metálico entra en el campo magnético se induce una pequeña corriente por la superficie del objeto. Esta corriente se denomina corriente de Foucault. La presencia del objeto hace variar la amplitud de las oscilaciones del campo. Estos cambios de amplitud son rectificadas a una tensión CC y

amplificados a la salida del sensor.

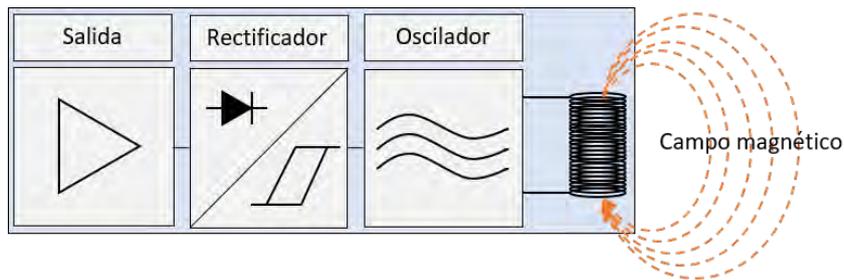


Fig. 3.11. Sensor de detección inductivo.

La estructura y funcionamiento sencillo de los sensores inductivos hacen que su vida útil se larga. El polvo o la suciedad del entorno no afectan a la operatividad de los sensores ya que estos no afectan a la inducción magnética. Además, la capacidad de detectar solo materiales metálicos permite la detección de objetos a través de otros como puede ser el caso de detección en el interior de embalajes o en el interior de recipientes de vidrio.

Respecto a la distancia de detección es bastante reducida, detectando a una distancia promedio de 60 mm. La distancia de detección depende tanto del tamaño del bobinado como del material a detectar. Cuanto mayor sea el tamaño de la bobina mayor campo magnético que se induce. Por otro lado, cada tipo de material metálico presenta una conductividad distinta. El material que se toma como referencia es el acero dulce, ya que es el que se puede detectar a mayor distancia, mientras que el cobre se detecta a 0.4 veces la distancia de referencia [24].

3.3.4. Sensores de proximidad ultrasónicos

Los sensores de proximidad basados en ultrasonidos utilizan frecuencias sonoras a partir de 40 kHz, superiores al sonido audible por el oído humano (16 Hz a 20 kHz) para detectar objetos. El funcionamiento básico de un sensor ultrasónico se basa en la reflexión de una onda de sonido al chocar con un objeto, Fig. 3.12. Este principio permite detectar objetos sin limitaciones por su material, tamaño y color.

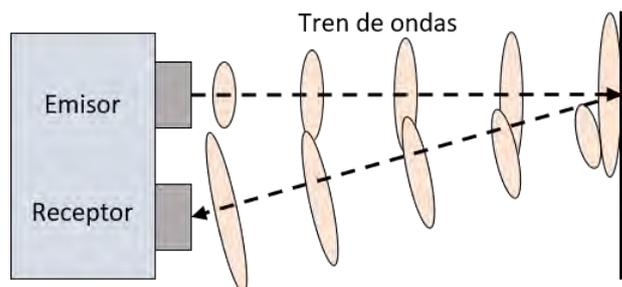


Fig. 3.12. Sensor de detección ultrasónico.

El funcionamiento mecánico de estos sensores se basa en la deformación de una mem-

brana. Esta deformación se aplica tanto para generar ultrasonidos como para captarlos. En el caso de generar ultrasonidos se aplican impulsos eléctricos que hacen vibrar la membrana generando un tren de ondas [27]. Por otro lado, cuando se recibe sobre la membrana un tren de ondas se generan impulsos eléctricos.

Los sensores ultrasónicos se pueden clasificar atendiendo tanto a la disposición de sus elementos emisor y receptor, al igual que en con los sensores fotoeléctricos, como a la técnica de detección implementada.

Los sensores ultrasónicos se pueden clasificar atendiendo tanto a la disposición de sus elementos emisor y receptor, al igual que en con los sensores fotoeléctricos, como a la técnica de detección implementada.

Se pueden encontrar sensores que presentan un único elemento transductor en el que se encuentra el emisor y el receptor. En este caso, se utiliza una misma membrana tanto para emitir como para recibir ultrasonidos. Hay que tener en cuenta que para tener un margen de detección es necesario que no se den simultáneamente la emisión y la detección. Por este motivo se utilizan para detección a distancias largas. El emisor proyecta un tren de ondas durante un tiempo determinado y se detiene para esperar al eco y operar como receptor.

También se puede encontrar una configuración con el emisor y el receptor en elementos separados. El principio de funcionamiento se basa en el mismo sistema de vibración de una membrana. Este tipo de sensores puede detectar objetos a una distancia muy próxima ya que el emisor y el receptor son elementos independientes. Además, emiten un tren de ondas ultrasónicas de forma continuada.

Atendiendo a las técnicas de detección se pueden clasificar en sensores ultrasónicos de tiempo de vuelo y de cambio de fase.

- Detección por tiempo de vuelo: el sensor mide la diferencia de tiempo entre la emisión de ultrasonidos y la recepción del eco como se muestra en la Fig.3.13.

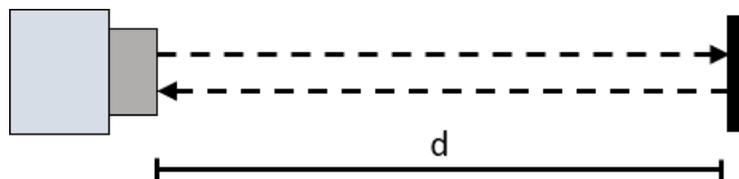


Fig. 3.13. Distancia de detección analizando el tiempo de vuelo .

$$d = \frac{1}{2}tc, \quad (3.1)$$

3.1 donde d es la distancia de detección (m), t es el tiempo entre emisión y recepción (s) y c es la velocidad del sonido ($\frac{m}{s}$).

Hay que tener en cuenta que la velocidad del sonido varía en función del medio en el que se propague. En unas condiciones atmosféricas en el que aire se encuentra a 20°C el sonido se propaga a una velocidad de $343,2 \frac{m}{s}$.

- Detección por cambio de fase: el transductor mide la diferencia de fase entre la onda emitida y la onda recibida, Fig. 3.14.

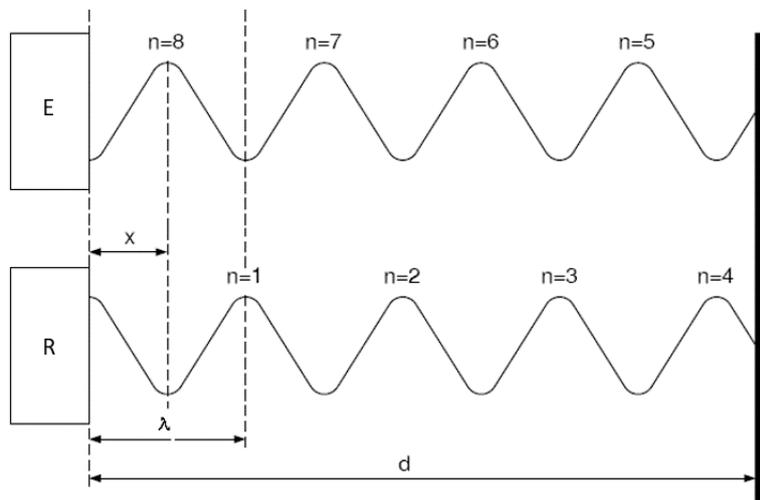


Fig. 3.14. Distancia de detección analizando el cambio de fase de onda [27].

Una de las características de las ondas sonoras es que pueden reflejarse en una gran variedad de superficies, por lo que estos sensores se pueden utilizar en la detección de objetos de cualquier color, transparentes o incluso materiales en estado líquido. Además, los ultrasonidos no se ven afectados por la suciedad del ambiente.

Respecto a la distancia de detección pueden alcanzar hasta los 10 m de distancia en el mejor de los casos. La distancia de detección depende de tres factores diferenciados: la frecuencia de emisión del tren de ondas, el medio de transmisión y la sensibilidad de la membrana [27].

Por otro lado, estos sensores pueden presentar problemas al detectar falsos ecos. Estos falsos ecos se producen por reflexiones múltiples de una misma onda en varias superficies haciendo que el tiempo de vuelo sea mayor a la distancia real. Otro de los problemas que se pueden presentar es a la hora de emplear varios sensores para la detección. Los ultrasonidos emitidos por un sensor pueden ser recibidos por otro, recibiendo un falso eco denominado *crosstalk*, como se puede observar en la Fig. 3.15.

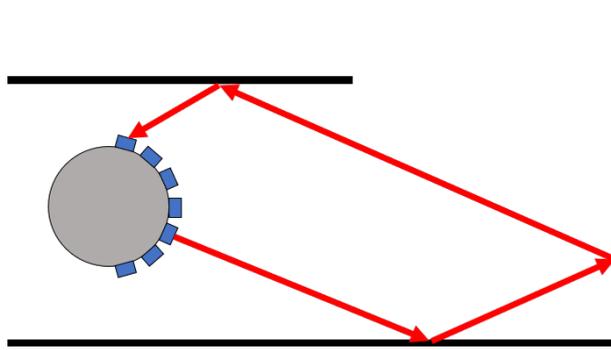


Fig. 3.15. Efecto *Crosstalk* en aplicaciones con varios sensores ultrasónicos.

3.3.5. Sensores de detección basados en visión

La mejora constante de la tecnología computacional ha permitido desarrollar sensores basados en la visión. Estos sensores utilizan cámaras que captan la imagen en tiempo real y es procesada por un ordenador para determinar la presencia de un objeto. Además, es posible reconocer objetos siguiendo una trayectoria de movimiento.

Este tipo de sensores son mucho más complejos que los vistos en los apartados anteriores, ya que el análisis de una imagen es mucho más complicado que los principios físicos de reflexión de una onda o la variación de un campo magnético. No obstante, hay que tener presente a estos sistemas de detección por visión ya que permiten desarrollar aplicaciones para mejorar el día a día de las personas. Uno de los ejemplos más relevantes es la detección de señales de tráfico o de peatones durante la conducción.

3.4. Elección del sensor de proximidad

Para la elección del sensor con el que conseguir un diseño eficiente de la aplicación propuesta, se ha abordado el problema atendiendo a diferentes factores.

- Condiciones del entorno: las aplicaciones están pensadas para ser utilizadas en entornos hospitalarios, por lo que a priori, se consideran entornos limpios, libres de polvo y otros agentes que puedan entorpecer las funciones de detección de un sensor.
- Elementos a detectar: es necesario tener en cuenta las características de los elementos a detectar: si están fabricados de materiales metálicos, plásticos o de madera; sus propiedades para reflejar la luz (opacidad); además de sus formas geométricas y tamaño.
- Distancia de detección: uno de los factores más importantes a la hora de detectar un objeto es la distancia máxima a la que puede detectar de forma que se obtenga una señal lo suficientemente clara como para afirmar que se ha producido una detección.

- Velocidad de paso del objeto: es necesario conocer la velocidad con la que pueden llegar a pasar los objetos, ya que el sensor puede no tener la capacidad para detectarlos a ciertas velocidades.
- Frecuencia de detección: al aumentar la velocidad de paso de objetos se pueden dar problemas a la hora de diferenciar entre el paso de un objeto y el siguiente.

En base a estos cinco factores se basa la metodología aplicada para la selección de un sensor de proximidad adecuado para resolución de los objetivos de este trabajo.

Al tratarse de aplicaciones orientadas a entornos hospitalarios, no es necesario un dispositivo robusto que trabaje en condiciones de suciedad elevada como puede ser un entorno industrial. Por otro lado, para ampliar el tipo de objetos a detectar, es necesario que el sensor sea capaz de detectar el mayor número de tipos de materiales posible. Teniendo en cuenta estos dos primeros factores, es posible descartar varios tipos de sensores de proximidad y centrarse en los sensores basados en reflexión de luz y ultrasónicos.

Atendiendo a la distancia de detección, no es necesario cubrir grandes distancias. Además, para simplificar la instalación es preferible que los elementos emisor y receptor se encuentren en el mismo dispositivo.

Finalmente, cuanto mayor sea la capacidad para detectar objetos en movimiento mejor será la eficacia de detección de objetos. Teniendo en cuenta todos estos factores se puede llegar a la conclusión de que la tecnología que mejores prestaciones ofrece para una detección de objetos es la fotoeléctrica con una configuración autoreflexiva.

Se ha seleccionado el Sensor de Proximidad SI1143 del fabricante Modern Device [28] ya que presenta las características necesarias para el diseño deseado en este proyecto.

4. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR

Este Capítulo está destinado a presentar y analizar el dispositivo de detección de proximidad con el cuál se va a desarrollar la aplicación orientada a operar en entornos hospitalarios. Tras las primeras pruebas con el sensor seleccionado, se han visto ciertas limitaciones que no se presentan en la hoja de especificaciones técnicas del fabricante. Por tal motivo, ha sido necesario caracterizar empíricamente la respuesta del sensor.

4.1. Sensor de Proximidad SI1143

El Sensor de Proximidad SI1143 es un detector de proximidad fotoeléctrico infrarrojo basado en el efecto de la reflexión óptica, para ello utiliza luz infrarroja (IR) para detectar objetos dentro de su campo de visión [28]. Además, tiene la capacidad de detectar la intensidad de luz visible utilizando este mismo fundamento.



Fig. 4.1. Sensor de proximidad SI1143.

Este sensor, mostrado en la Fig. 4.1, está diseñado con tres diodos LED emisores de infrarrojos y el dispositivo receptor SI11443 de alta sensibilidad. Los LED se encuentran dispuestos en forma triangular, ocupando los vértices de un triángulo equilátero. En el centro de este se encuentra el elemento receptor.

El funcionamiento interno de este sensor se puede diferenciar en cuatro fases:

- **Emisión difusa de infrarrojos:** el sensor emite un haz infrarrojo con cualquiera de sus tres LED generando un área de detección. Estos sensores se pueden activar de manera conjunta para incrementar la capacidad de detección.
- **Recepción:** el elemento receptor del sensor cuenta con un fotodiodo infrarrojo y otro de luz visible. Esta característica permite tener información tanto de la intensidad infrarroja reflejada como de la intensidad de luz ambiente.
- **Acondicionamiento de señal:** la cantidad de luz recibida genera una variación de corriente eléctrica en los fotodiodos. Esta corriente del orden de miliamperios se convierte en una señal digital mediante un conversor ADC. La señal digital obtenida se filtra y se sincroniza con el funcionamiento de los LED para seguir con la detección.

- **Comunicación:** para comunicar los datos obtenidos con el microcontrolador utiliza el protocolo de comunicación BUS I2C. Este protocolo utiliza tres señales: SCL (System Clock) son los pulsos del reloj que permiten sincronizar el sistema; SDA (System Data) envía y recibe los datos; y GND.

En la Fig.4.2 se puede observar el esquema interno del sensor SI1143.

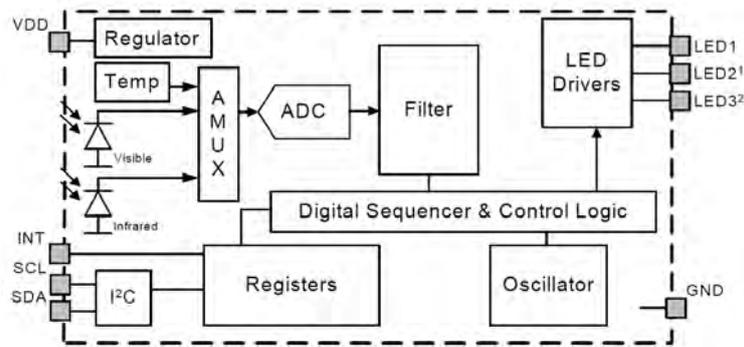


Fig. 4.2. Sensor de proximidad SI1143 [28].

4.2. Características de detección de proximidad

Para conocer la capacidad real de detección del sensor se ha realizado su caracterización de forma experimental. Esto es debido a la presencia de una serie de limitaciones en la detección que no se encontraban reflejadas en la ficha técnica del sensor. De este modo se busca aprovechar en la mayor medida posible sus características reales, para así diseñar un sistema eficiente.

4.2.1. Distancia de detección

El Sensor de Proximidad SI1143 basa su detección de proximidad en el principio de reflexión de la luz al chocar con un objeto. Los diodos emisores de los que dispone emiten un haz de luz infrarroja difuso con el cual es capaz de detectar un objeto en reposo en su área de actuación. Este sensor es capaz de detectar objetos, en condiciones óptimas, a distancias de hasta 50 cm.

A la hora de detectar objetos en movimiento, su rango de detección se ve reducido considerablemente. En la detección de entrada o salida de objetos del área de actuación del sensor, la distancia máxima se reduce hasta los 30 cm de distancia máxima. Esta reducción se debe a la presencia de objetos cercanos fijos, como pueden ser paredes u otros elementos estructurales en los que se producen reflexiones estáticas continuas que detecta el sensor.

Otro de los factores que determinan la distancia de detección es el tamaño de los objetos y la superficie que presente para reflejar la luz. En objetos muy pequeños la

cantidad de luz reflejada se reduce hasta en una cuarta parte, por lo que a distancias superiores a 20 cm aumenta la dificultad para detectar dicho objeto.

Para poder comparar estos resultados, a la hora de determinar con precisión la variación la curva característica del sensor SI1143 se realizaron varios experimentos en los que se comparaba el valor de la señal obtenido para diferentes superficies a detectar. Para ello se utilizaron diferentes superficies rectangulares de color blanco todas ellas (Superficie 1: 50 cm², Superficie 2: 15 cm²).

La siguiente Fig. 4.3 representa las diferentes curvas obtenidas para las distintas superficies y la curva característica del sensor determinada por el estándar Kodak (10 cm²) [28].

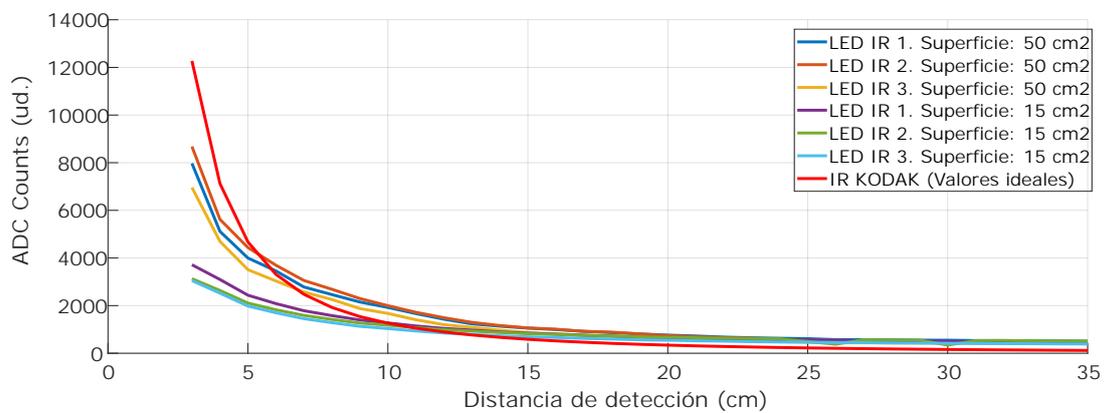


Fig. 4.3. Curvas características para el sensor SI1143. Superficie 50 cm². Superficie 15 cm². Superficie KODAK 10 cm² (4.1).

La curva característica del sensor obtenida mediante el estándar Kodak 4.1 se puede expresar de forma aproximada con la siguiente ecuación:

$$cm = 331,57 \cdot ADC_{counts}^{-0,505}, \quad (4.1)$$

donde cm representa la distancia de detección en centímetros y ADC el valor de la señal del sensor.

Del mismo modo se puede caracterizar la ecuación para el resto de curvas. En estos casos aparece la complicación de que la aproximación de los datos obtenidos se obtiene mediante una ecuación polinómica de grado 12, alterando considerablemente los datos en ciertos puntos de la curva. Una de las soluciones es aproximar la curva por tramos, seleccionando intervalos en los que no haya demasiada variación de pendiente.

4.2.2. Área de detección con un LED

Los LED infrarrojos del Sensor de Proximidad SI1143 emiten un haz de luz que se dirige hacia todas direcciones que, en condiciones de máxima detección, generan un campo

de detección semejante a una esfera como se observa en la Fig. 4.4.

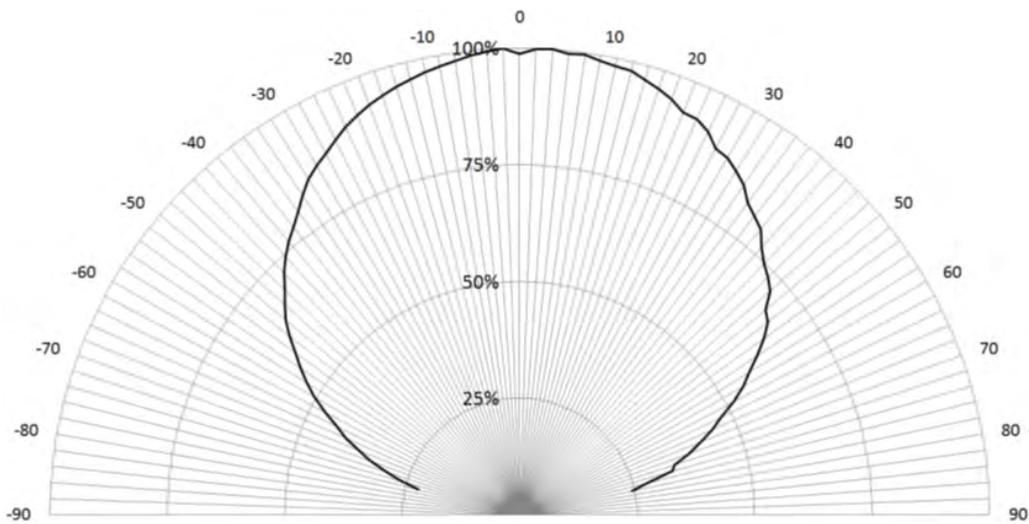


Fig. 4.4. Ángulo de detección del sensor de proximidad SI1143 [28].

Como se puede observar, la Fig. 4.4 muestra la distancia de detección en el plano atendiendo al ángulo. Se aprecia como la distancia de detección varía en función del ángulo en el que se encuentre el objeto a detectar.

Para simplificar el análisis del área de detección del sensor, se puede tomar como forma geométrica de estudio un cono, Fig. 4.5, en el que el vértice se corresponde al LED infrarrojo y la base a la superficie de máxima detección.

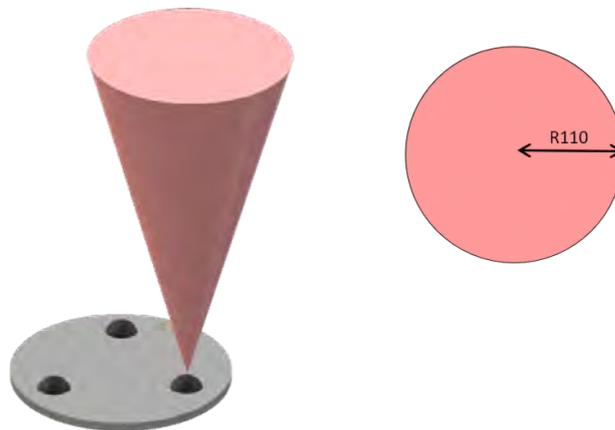


Fig. 4.5. Simplificación del ángulo de detección del sensor de proximidad SI1143.

A la hora de utilizar un único LED, se obtiene un radio de detección máximo de 110 mm como se observa en la Fig. 4.5. Este radio varía entre 110 mm y 90 mm a lo largo de las distancias que se encuentran en el rango entre 100 mm y 250 mm. Para distancias inferiores, se observa como el radio de detección se reduce considerablemente siguiendo una curva exponencial, generando un ángulo muerto.

TABLA 4.1. DATOS DE ÁNGULO MUERTO PARA EL SENSOR SI1143

Distancia de detección (mm)	Radio máximo de detección (mm)
100	100
90	94
80	90
70	86
60	79
50	72
40	66
30	56
20	50
10	22

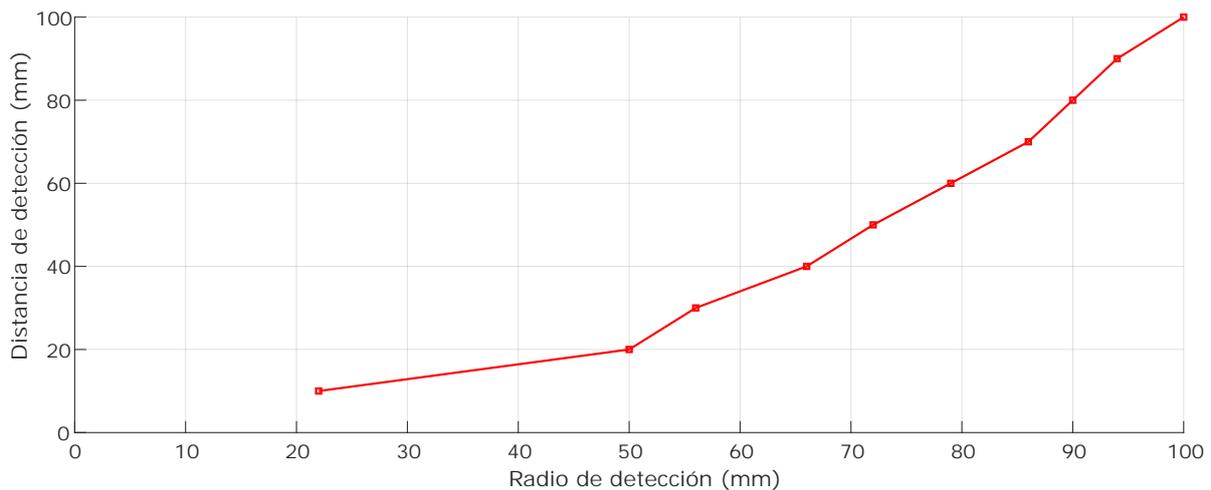


Fig. 4.6. Ángulo muerto del sensor SI1143.

Analizando la gráfica de la Fig. 4.6, se observa como todos los objetos que se encuentren por debajo de la curva no serán detectados por el sensor.

4.2.3. Área de detección utilizando los tres LED

Para aumentar la capacidad de detección del sensor SI1143 se pueden utilizar los tres LED emisores de los que dispone. Esto permite aumentar el radio de detección 20 mm, llegando a conseguir un radio de detección máximo de 130 mm. Además, se genera una zona de detección en la que convergen los infrarrojos de los tres sensores como se observa en la Fig. 4.7. Esto permite que se refleje mayor potencia lumínica al penetrar un objeto en el área de detección, ya que los tres sensores intervienen en la detección.

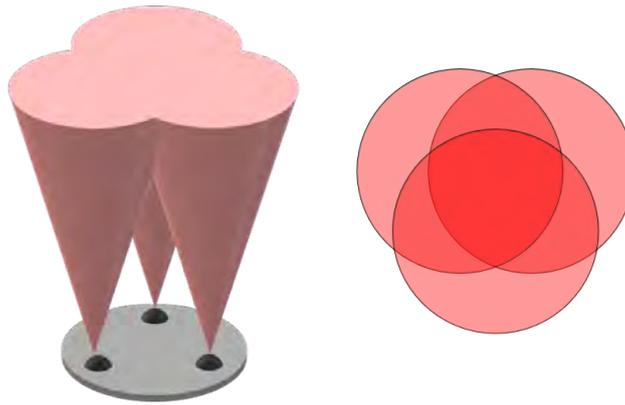


Fig. 4.7. Área de detección implementando los tres emisores LED del sensor SI1143.

Aprovechando la disposición de los tres LED se puede estimar la posición de un objeto. Si se conocen las dimensiones del objeto a detectar y se busca la curva característica del sensor para las características de dicho objeto, se puede estimar la distancia a la que se encuentra el objeto. Hay que tener en cuenta que cada LED es independiente, por lo que puede que la ecuación de la curva característica no sea la misma para los tres. Una vez se conocen todos los datos, se puede triangular la posición de un objeto e incluso analizar la trazabilidad del movimiento que realice. El caso más sencillo de triangulación de un objeto se realiza utilizando dos LED. Con esta triangulación podemos saber si el objeto se encuentra a la izquierda o a la derecha del sensor, además de a la distancia que se encuentra.

Suponiendo que un objeto se encuentra en el campo de detección del sensor, este reflejará la luz emitida por los dos LED al dispositivo receptor. Con cada LED se obtiene un valor. Trazando una circunferencia con centro en cada LED de radio igual a el valor detectado, Fig. 4.8, se puede conocer la posición del objeto mediante la intersección de ambas circunferencias.

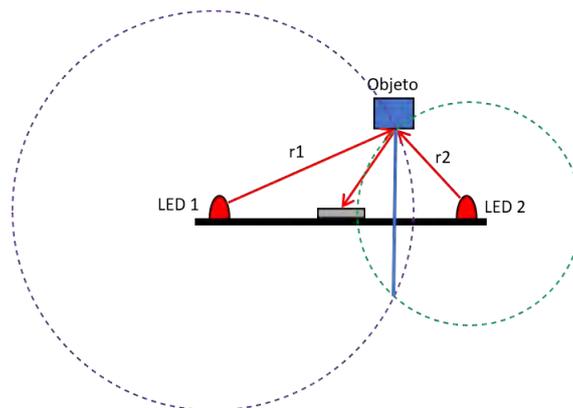


Fig. 4.8. Triangulación básica de objeto.

Para generar el seguimiento de la trayectoria del objeto basta con relacionar su posición con el instante de tiempo en el que se detecta.

4.2.4. Detección de objetos mediante el estudio del flanco de entrada en el área infrarroja

Al disponer de tres fuentes emisoras se puede analizar el desplazamiento de un objeto que cruza el área de detección del sensor en función de los flancos de entrada que se den. Como se puede observar en la Fig. 4.9 al desplazarse un objeto por encima del sensor hará que uno de los LED emisores detecte antes que los otros dos. La zona del espacio en la que esta orientado ese LED se puede considerar como el flanco de entrada del objeto en la zona de detección. Del mismo modo, habrá un LED que sea el último en dejar de detectar el objeto, siendo este el flanco de salida.

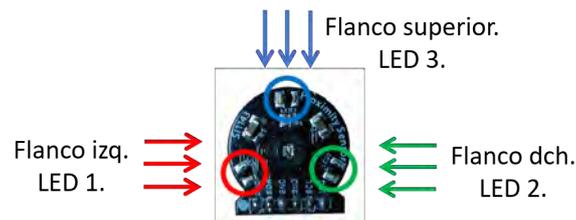


Fig. 4.9. Detección por flanco de detección.

Los valores de proximidad mostrados en la Fig 4.10. reflejan el desplazamiento de una mano de izquierda a derecha por encima del sensor a una distancia de 15 cm aproximadamente. El sensor se encontraba dispuesto en la posición de la Fig. 4.9 (LED 1 a la izquierda, LED 2 a la derecha y LED 3 en la parte superior). Al comenzar el movimiento desde la izquierda los primeros valores de proximidad son detectados gracias al LED 1, por lo que este será el flanco de entrada.

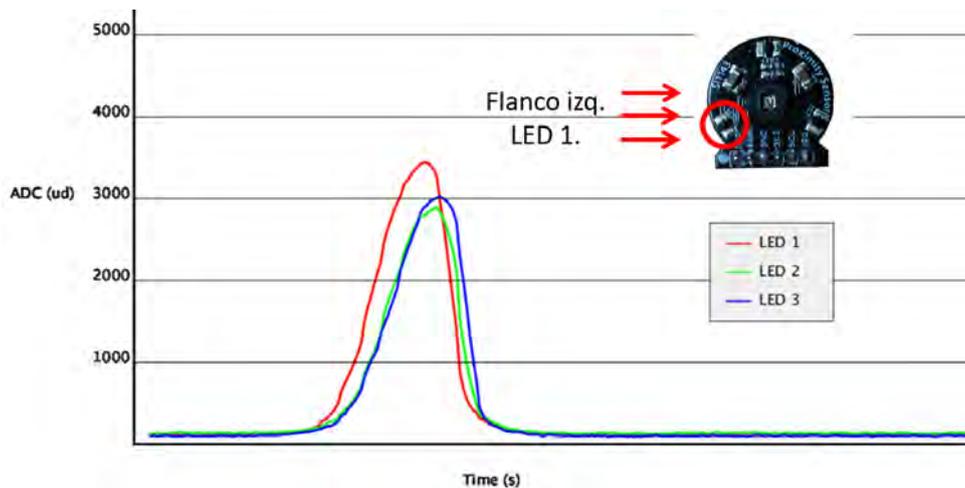


Fig. 4.10. Flanco de entrada izquierdo. Primera detección de proximidad mediante LED 1.

Aplicando este mismo método a los demás LED se puede detectar un flanco de entrada desde la derecha detectado gracias al LED 2, y un flanco de entrada desde la zona superior detectado gracias al LED 3. En las Fig. 4.11a y Fig. 4.11b se puede observar el flanco de entrada y los valores ADC de proximidad para cada uno de los LEDs respectivamente.

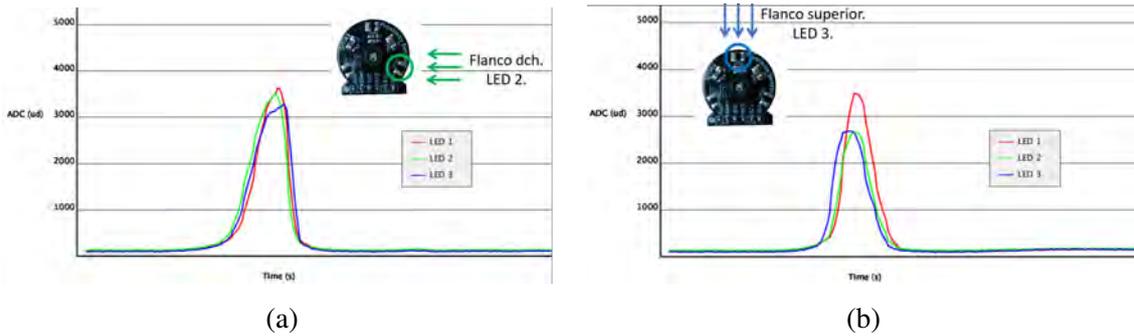


Fig. 4.11. (a) Primera detección: Flanco de entrada derecho, LED 2.. (b) Primera detección: Flanco de entrada superior, LED 3.

Aplicando este método se pueden conocer posiciones de entrada y salida de un objeto sin necesidad de triangular su posición. Por el contrario, no se pueden determinar los movimientos que se realicen dentro de la zona de detección. Además, el número de trayectorias es reducido ya que solo se presentan tres flancos claros. Otro de los puntos débiles de esta detección viene dada por el tamaño de los objetos. Al detectar objetos pequeños que se mueven con una velocidad considerable no se obtiene una señal ADC lo suficientemente definida y amplia como para determinar una trayectoria. En cambio, para funciones de reconocimiento de movimientos de objetos mayores, como los de una mano, se obtienen señales bastante claras como se observa en las Fig. 4.11a y Fig. 4.11b anteriores.

5. SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTEO DE CUBOS APLICADA A LA PRUEBA *BOX & BLOCKS TEST*

Para automatizar la detección de cubos de la prueba BBT se han analizado tanto la estructura de equipamiento del Test como las características de los sensores seleccionados. En el siguiente Capítulo se va a describir el sistema propuesto, así como las condiciones de funcionamiento que han hecho decantarse por la solución final.

5.1. Modelados previos del sistema de sensores

A la hora de disponer los sensores en el compartimento de recepción se ha buscado la relación óptima entre número de sensores y eficiencia de detección. Esta relación esta condicionada por el funcionamiento de los sensores y por la propia estructura del BBT.

Hasta llegar a la solución final se han ensayado con diseños que presentaban distintos números de sensores y posiciones de instalación:

- Área de detección mediante un sensor. Como se ha visto en el Capítulo 3, los sensores SI1143 generan un área de detección con una proyección similar a la de un cono. Aprovechando esta característica se ha probado a instalar un único sensor en una de las esquinas del compartimento. Como se muestra en la Fig. 5.1a el sensor cubre una gran área, pero presenta una serie de problemas.

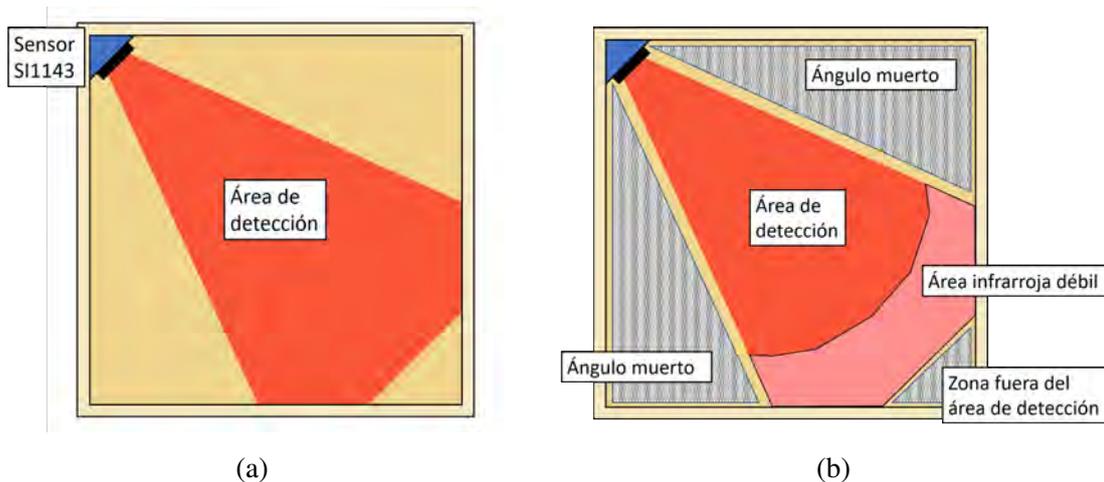


Fig. 5.1. (a) Análisis de compartimeto con un único sensor. (b) Zonas de detección con un único sensor.

1. El ángulo de proyección cónico no es lo suficientemente amplio para cubrir toda el área del compartimento, presentando zonas de ángulo muerto en los que no se produce la detección.

2. En las zonas mas alejadas del sensor, el valor ADC que se obtiene al dejar caer un cubo es casi inapreciable, por lo que se confunde con la señal en la que no se detecta nada. Esto es debido a que el cubo tiene un tamaño pequeño y ofrece muy poca superficie para reflejar los rayos infrarrojos. Además, el propio sensor presenta problemas para detectar objetos pequeños en movimiento para distancias superiores a 20 cm.

En la Fig. 5.1b se muestran las distintas áreas en las que se puede dividir el compartimento al instalar un sensor de proximidad SI1143.

- Área de detección mediante dos sensores. Al utilizar dos sensores se aumenta el área de detección, pudiendo cubrir ángulos muertos y reduciendo zonas en las que la sensibilidad del sensor no permite detectar un objeto pequeño.

Para la detección con dos sensores se instalaron en distintas posiciones, intentando cubrir el máximo de área posible. En un principio se colocaron en uno de los laterales del compartimento, orientados en la misma dirección y sentido, Fig. 5.1b. En esta disposición se reduce el área de ángulos muertos y se crea una zona central con elevada densidad infrarroja. Además, al estar orientados desde un lado del compartimento apuntando al lado opuesto, la distancia a detectar se reduce ya que esta distancia es menor que la distancia en diagonal presentada en el punto anterior.

A pesar de las mejoras en el área de detección, seguían apareciendo problemas que evitaban el registro de cubos. Con esta instalación los ángulos muertos que aparecían tanto en los laterales de los sensores como en las esquinas opuestas hacían que la detección fuera deficiente. Además, aparecieron una serie de interferencias en la señal de los sensores que dificultaban la detección de cubos. Este fenómeno, semejante al efecto *crosstalk*, se explicará más adelante.

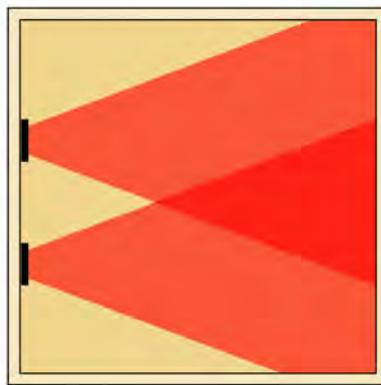


Fig. 5.2. Compartimento con dos sensores en un lateral.

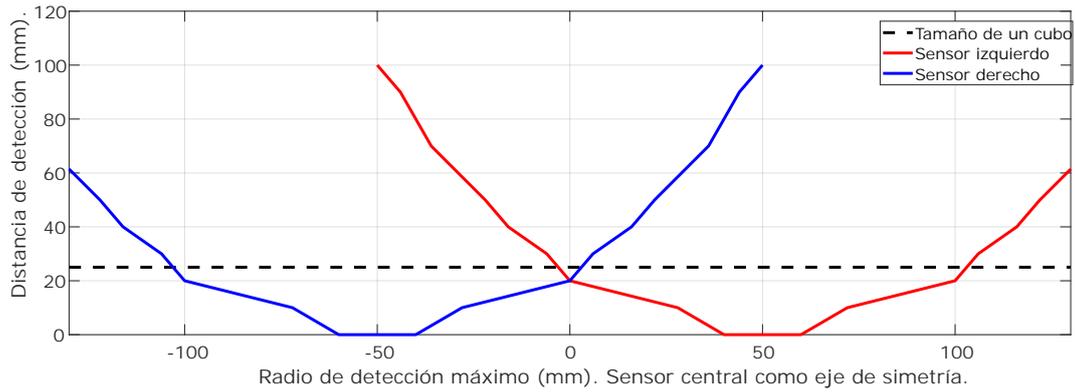


Fig. 5.3. Límites de detección de dos sensores Si1143 instalados en el lateral del compartimento del BBT

En la gráfica de la Fig. 5.3 se muestran los límites de detección en las zonas cercanas los sensores. Esta representa, desde la vista de plano, a dos sensores instalados en un lateral interior del BBT a una distancia entre ellos de 10 cm. La línea horizontal representa el tamaño de un cubo. Como se puede observar, en los laterales aparecen zonas sin cubrir.

Otra de las opciones en la disposición de los sensores se trata de aprovechar la forma cónica de la proyección infrarroja para formar un área de detección cuadrada. Para ello se pueden instalar los sensores en las esquinas del compartimento cruzando sus áreas de detección.

1. Esquinas opuestas: al instalarlos en esquinas opuestas permite cubrir la totalidad del área, apareciendo deficiencias en la detección en las esquinas en las que no hay sensores. Para cubrir el mayor área posible los sensores no deben estar enfrentados, sino ligeramente desviados del centro como se muestra en la Fig. 5.4a. Con esta pequeña desviación se pretende alinear el límite del área de detección del sensor con el lateral de madera.
2. Esquinas con lado en común: en esta disposición se cubre gran parte del compartimento, apareciendo deficiencias en la detección en las esquinas y lateral opuesto a lado de los sensores. Para cubrir el mayor área posible los sensores deben estar orientados al centro del compartimento, Fig. 5.4b.

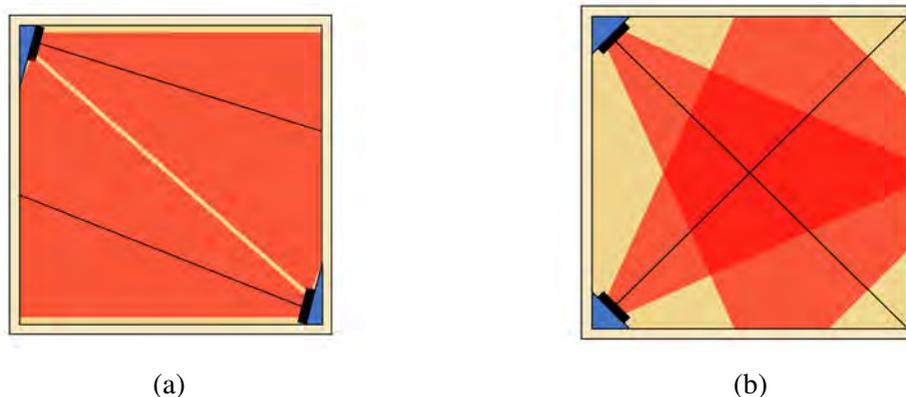


Fig. 5.4. Análisis de compartimeto con dos sensores. (a) Compartimento con dos sensores en esquinas opuestas. (b) Compartimento con dos sensores en esquinas de un mismo lateral.

En cualquiera de estos dos montajes los sensores también detectan los laterales de madera más próximos. Esto hace la señal inicial de la que parte el sensor sea mayor que la obtenida al caer un cubo, es decir, el sensor detecta la pared en vez del movimiento de caída de un cubo. En la Fig. 5.5 se muestra una representación de este hecho.

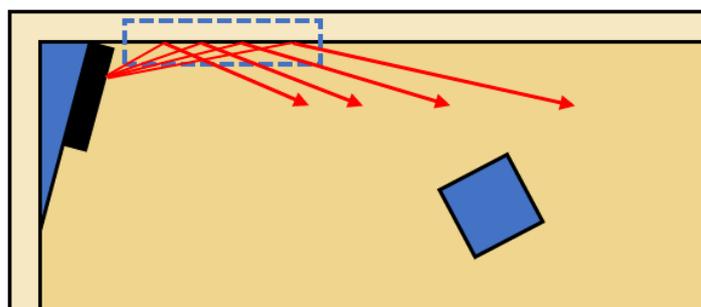


Fig. 5.5. Detección de pared lateral con sensores instalados en las esquinas del compartimento.

El mayor problema que aparece al disponer los sensores de forma enfrentada es que la proyección infrarroja de uno afecta directamente al otro. En este caso, un único sensor recibe el haz infrarrojo emitido por el mismo y el haz infrarrojo del sensor opuesto, Fig. 5.6. Esto hace que la detección sea imposible ya que en ningún momento el sensor puede diferenciar entre la información propia recibida y la del otro sensor. Como se ha comentado anteriormente, este fenómeno se explicará en detalle más adelante.

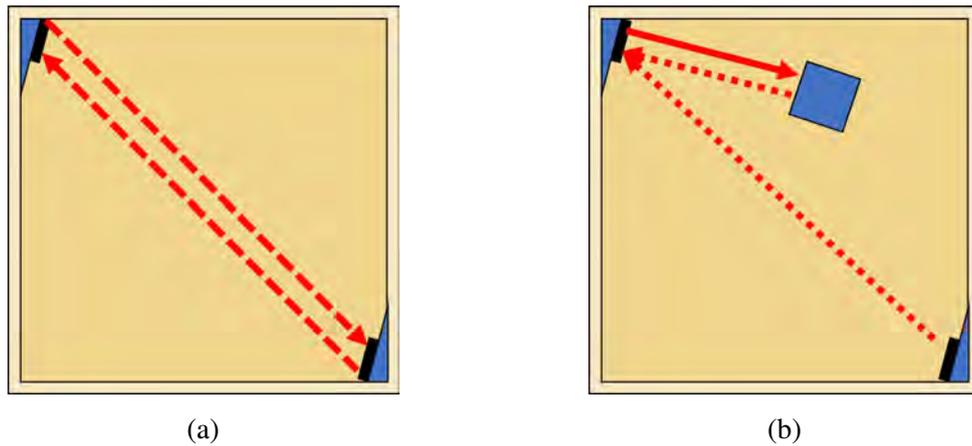


Fig. 5.6. Interferencia en la señal infrarroja con sensores instalados uno enfrente del otro. (a) Interferencia entre los propios sensores. (b) Interferencia entre detección de cubo y los propios sensores.

Para intentar reducir estos problemas se elevó la posición de los sensores sacándolos del interior del compartimento. Los problemas que había por detectar los laterales próximos a los sensores desaparecen pero las interferencias en las señales de detección al estar enfrentados los sensores permanecen.

5.1.1. Consideraciones a tener en cuenta para el diseño del sistema de detección

Atendiendo a los resultados obtenidos al implementar un solo sensor y dos sensores en distintas posiciones se pueden sacar las siguientes conclusiones a tener en cuenta para el diseño final del sistema de detección:

- La distancia máxima real de detección de los sensores es de 20 cm, por lo que con un solo sensor no es posible cubrir las diagonales completas del compartimento, ni el ancho completo que es de 26 cm.
- Los sensores presentan un ángulo de visión muerto a su alrededor. Utilizando dos sensores en posiciones opuestas se puede llegar a sensorizar toda la zona deseada. Estos dos mismos sensores colocados en un mismo lateral no se complementan lo suficiente para eliminar el ángulo muerto.
- Los sensores en posiciones opuestas producen interferencias entre ellos haciendo imposible la detección de cubos.
- Los sensores instalados en las esquinas del compartimento detectan las zonas de pared lateral mas cercanas, alterando la señal de detección.
- Al elevar la posición de los sensores hasta el exterior del compartimento se reducen las interferencias provocadas por un efecto similar a *crosstalk*.

5.2. Sistema de detección implementado

Teniendo en cuenta las consideraciones presentadas en el apartado anterior se ha diseñado un sistema de detección basado en tres sensores colocados en un mismo lateral y en una posición elevada. Ver Fig. 5.7.

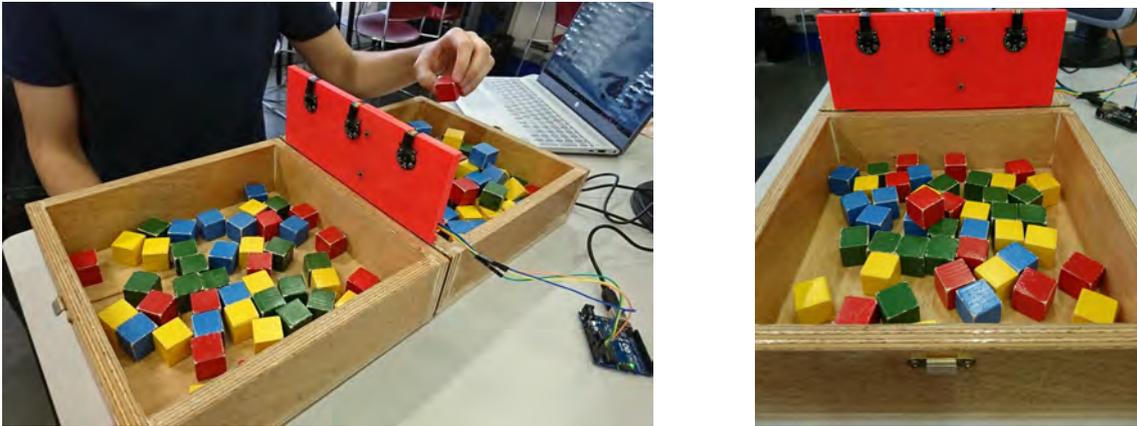


Fig. 5.7. Sistema de sensores implementados en la pieza divisoria de compartimentos fabricada mediante impresión 3D.

5.2.1. Posición y orientación de los sensores

- Posición elevada. El único punto en el que se pueden instalar los sensores fuera de los compartimentos, sin alterar la estructura del BBT y evitando entorpecer la actividad física a realizar se encuentra en el elemento divisor de los compartimentos. Esta pieza se eleva 10 cm por encima del borde superior de los compartimentos.

Los tres sensores están implementados en la propia pieza divisoria a una cota de 8.5 cm. Con esta posición se obtiene una distancia de 16 cm respecto la base del compartimento. De esta manera se reducen las interferencias generadas por la presencia de distintos sensores ya que las tanto la pared más alejada como la base se encuentran en una zona infrarroja de baja intensidad.

Como se puede ver en la Fig. 5.8, las zonas más alejadas del sensor (distancias superiores a 20 cm) quedan sin sensorizar o con una capacidad de detección muy baja. Teniendo en cuenta la velocidad de caída de los cubos, el sistema de sensores es incapaz de detectarlos. En este caso, se va a asumir este error ya que en un desarrollo normal de la prueba BBT los cubos no deberían caer directamente por esa zona, sino que primero atravesarían una zona más próxima al sensor.

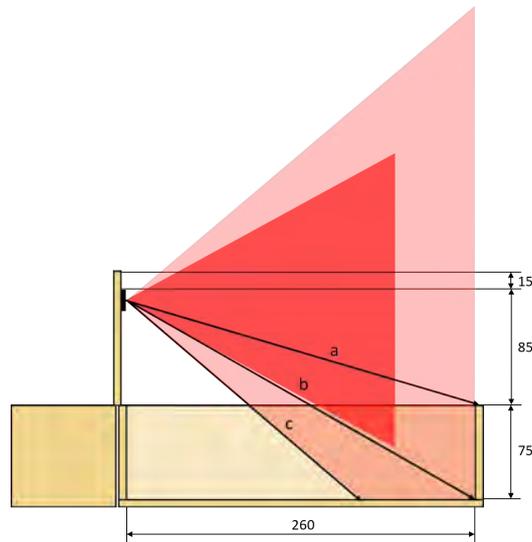


Fig. 5.8. Área de detección del sensor. Distancias máximas entre el sensor y el compartimento ($a = 273.3$ mm, $b = 305.3$ mm, $c = 226.3$ mm).

Debido al propio objetivo de la prueba BBT de desplazar el mayor número de cubos posible de un compartimento a otro, hace que se dejen caer lo antes posible, es decir, en las zonas más cercanas a los sensores. En la Fig. 5.9 se representa de forma aproximada la trayectoria normal de movimiento de cubos.

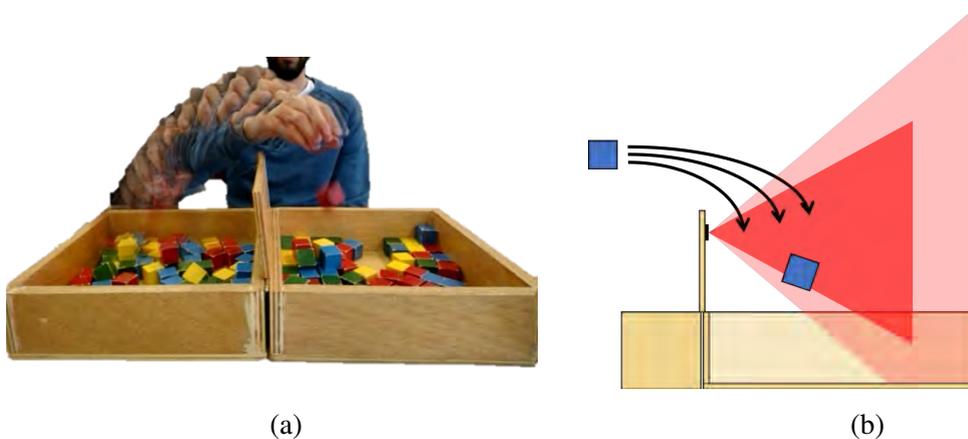


Fig. 5.9. Mecánica BBT. (a) Movimiento de desplazamiento real. (b) Trayectorias normales de recepción de cubos.

También hay que señalar que la zona superior al sensor también es capaz de detectar. Esto puede generar errores en el registro de cubos ya que por error se puede detectar algo en esa región del espacio.

- **Orientación.** Los sensores se han dispuesto de tal forma que los LED 1 y LED 2 de cada sensor quedan alineados en la parte superior, mientras que el LED 3 queda en la parte inferior. El motivo de esta orientación se puede observar en la Fig. 5.10.

Formando una línea de emisores genera una barrera de detección en la que los tres sensores pueden aportar información. En este caso, se forma una barrera superior en la que operan seis LED (dos LED por sensor) y una barrera inferior de apoyo en la que operan tres LED (un LED por sensor).

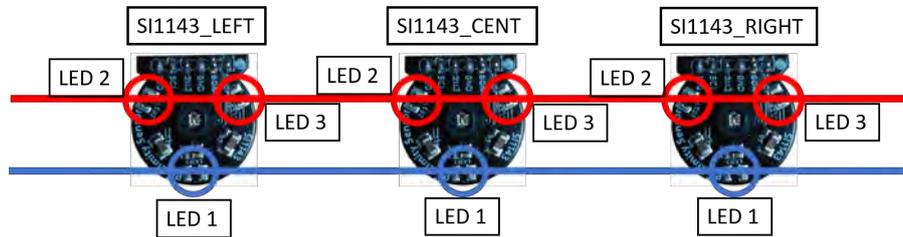


Fig. 5.10. Orientación de los sensores generando una barrera de detección principal y otra de apoyo.

En el diagrama de la Fig. 5.11 se puede ver como en caso de detectar el paso de un cubo con la barrera superior se registra el evento, en caso de no hacerlo la barrera inferior funciona como soporte de ayuda a la detección.

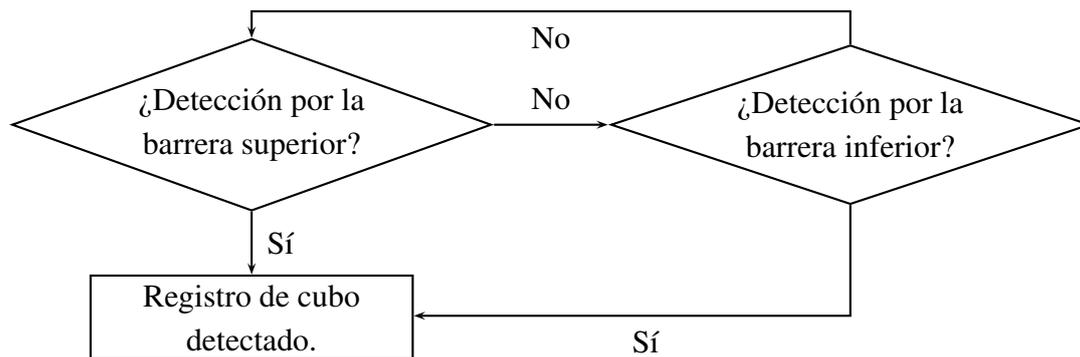


Fig. 5.11. Diagrama de flujo de detección mediante barrera principal y barrera inferior.

5.2.2. Separación entre sensores y gestión de ángulos muertos de visión

Utilizando tres sensores se consigue cubrir el área necesaria para detectar los cubos utilizados en el BBT. Teniendo en cuenta en análisis realizado en el Capítulo 3, en la sección Área de detección (Fig. 4.6), se puede ajustar la distancia entre los sensores para que ningún cubo pueda caer en una zona de ángulo muerto. En la siguiente Fig. 5.12 se muestra de forma acotada la disposición de los sensores en la pieza divisoria del BBT.

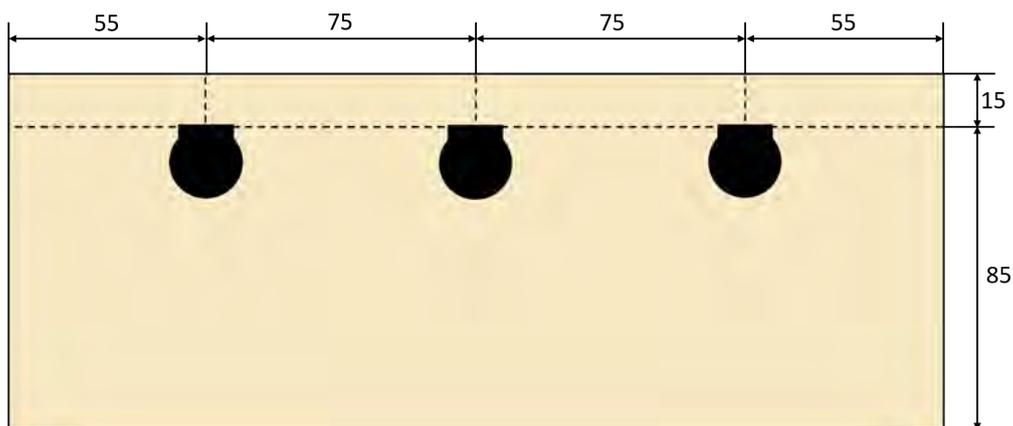


Fig. 5.12. Disposición de los sensores SI1143 en la pieza divisoria del BBT.

En la gráfica de la Fig. 5.13 se muestran los límites de detección en las zonas cercanas al sensor. Esta representa, desde la vista de plano, a tres sensores instalados en la pieza divisoria del BBT a una distancia entre ellos de 7.5 cm. La línea horizontal representa el tamaño de un cubo (2.5 cm de lado). Al mantener esta separación entre los sensores se consigue evitar el fallo de registro de la caída de cubos por zonas de ángulo muerto. Debido al tamaño del cubo siempre podrá ser detectado, incluso si cae muy cerca de la propia pieza divisoria o en las esquinas del compartimento.

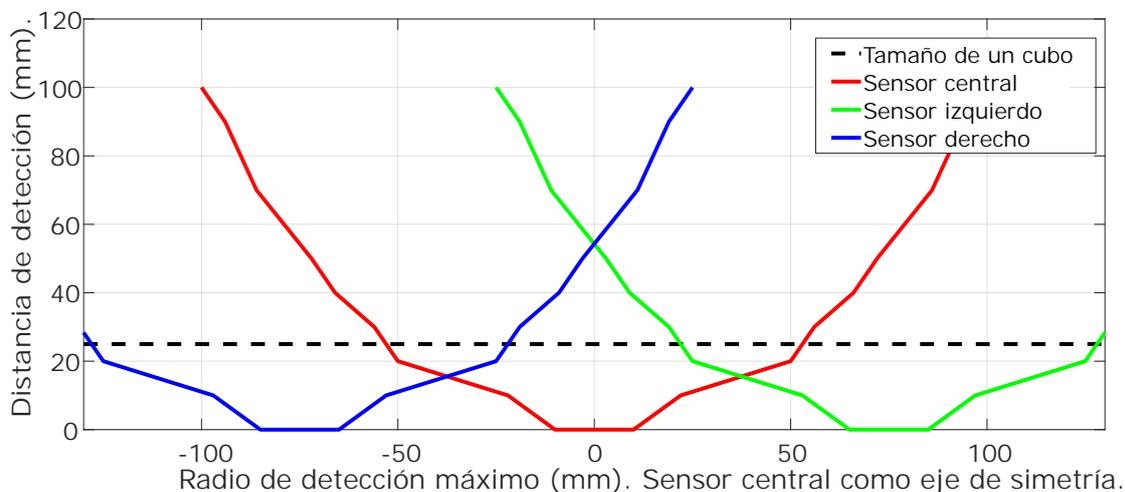


Fig. 5.13. Límites de detección de tres sensores Si1143 instalados en la pieza divisoria del BBT.

5.3. Presencia de interferencias con varios sensores

El hecho de instalar sensores fotoeléctricos en un compartimento con paredes hace que estas reflejen las señales de luz emitidas de los sensores. El propio haz infrarrojo emitido por un sensor puede ser detectado por otro sensor apareciendo perturbaciones en la señal de detección. Este efecto se incrementa al enfrenar directamente los sensores. En la Fig. 5.14a se puede ver representado este efecto al reflejarse en las paredes del BBT.

Los picos generados en la señal pueden ser confundidos con la detección de cubos. Además, estos aparecen con gran frecuencia en los tres LEDs emisores del sensor S11143. Al acercar un objeto a 10 cm del sensor estas interferencias aumentan su amplitud, alterando la detección por completo. Ver Fig. 5.14b .

La amplitud de estas interferencias pueden ser suavizadas acondicionando la señal, eliminando la mayoría de los picos más pequeños. Por otro lado, aparecen cada 150 milisegundos (frecuencia de 30 muestras de los sensores) por lo que se pueden anticipar. El mayor problema aparece a la hora de conocer de antemano la duración del pico. Cada interferencia tiene una duración en el tiempo diferente, lo que dificulta diferenciar un pico producido por una perturbación de un pico producido por el paso de un cubo. En la Fig. 5.15 se observa un a señal de detección de un cubo similar a los picos generados en las interferencias.

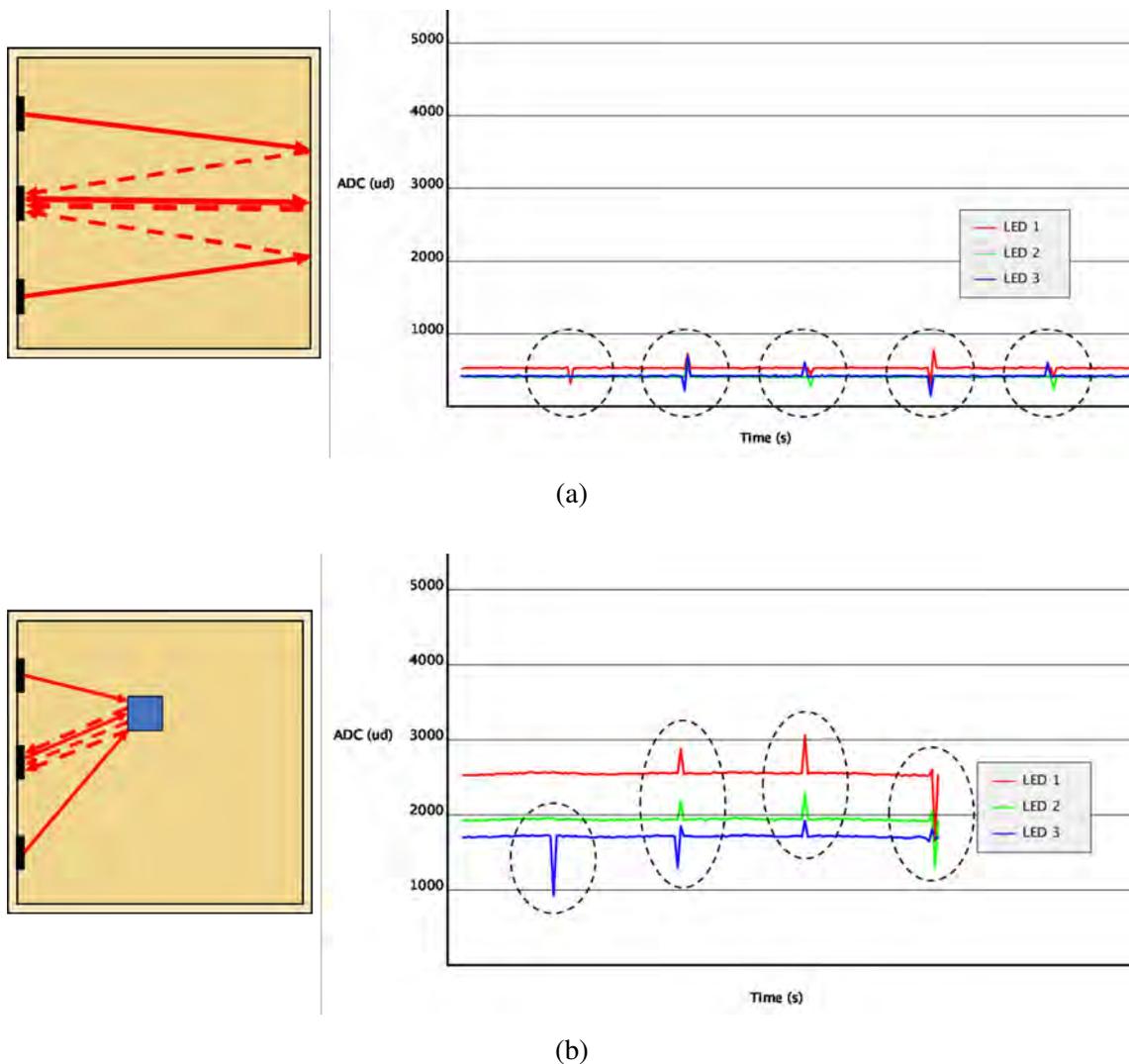


Fig. 5.14. Presencia de interferencias con tres sensores instalados en el BBT. (a) Interferencias con compartimiento vacío. (b) Interferencias con objeto fijo a 10 cm de distancia.

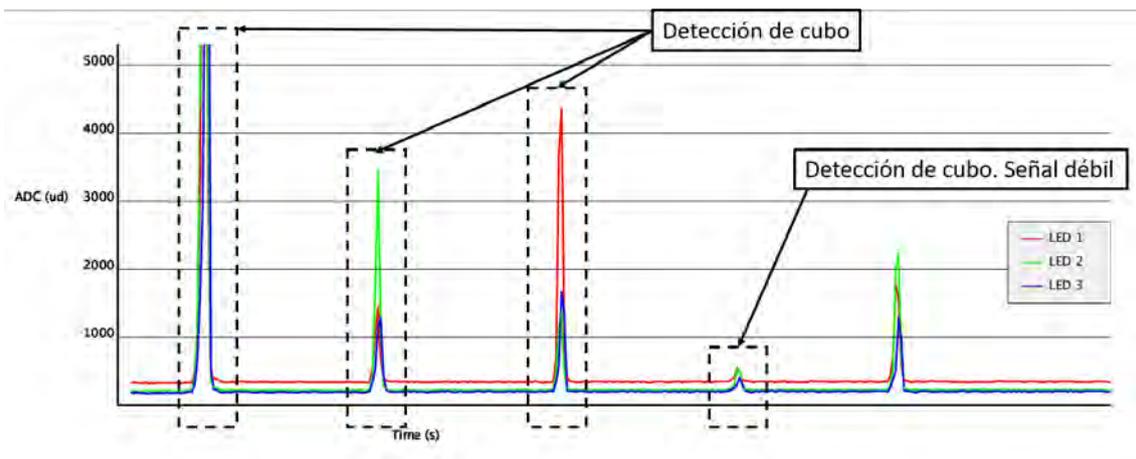


Fig. 5.15. Detección de cubo con una señal similar a las interferencias del sensor.

5.4. Lectura y análisis de datos de los sensores

Arduino es una plataforma de electrónica open-source que ofrece tanto placas de desarrollo de bajo coste como un entorno software de programación, fácil de manejar. Los sensores de proximidad SI1143 pueden ser conectados a una placa de Arduino para la adquisición de datos. La lectura de datos se puede realizar mediante el protocolo BUS I2C y utilizando una librería gratuita que configura los pines (habilitando las resistencias pull-up o -down donde se requiere) a utilizar y el puerto. Gracias a esta librería no es necesario el montaje de resistencias adicionales en el circuito electrónico, sino que se puede conectar directamente el microcontrolador y los sensores. También se pueden utilizar los sensores sin necesidad del uso de esta librería, implementando un protocolo I2C local.

En el caso de este proyecto se ha utilizado un bus I2C para cada sensor, realizando la lectura de datos y la alimentación individualmente. Esta decisión esta condicionada al propio proceso de desarrollo del sistema, ya que de este modo se puede acceder y manipular la información de los sensores de forma mas rápida. Además, el material utilizado permite este tipo de conexionado. La placa utilizada en este proyecto ha sido un Arduino UNO® que monta un microcontrolador ATmega328P. La placa de desarrollo presenta 14 pines digitales de entrada/salida y 6 pines analógicos, suficientes para conectar el sistema de tres sensores de proximidad SI1143 desarrollado en este trabajo.

El esquemático mostrado en la Fig. 5.16 representa las conexiones para cada uno de los elementos del sistema. Se observa como cada sensor esta relacionado con dos pines de comunicación SDA/SCL de la placa, además de estar alimentados por la misma.

El código implementado en la placa se encuentra en el siguiente [link](#).

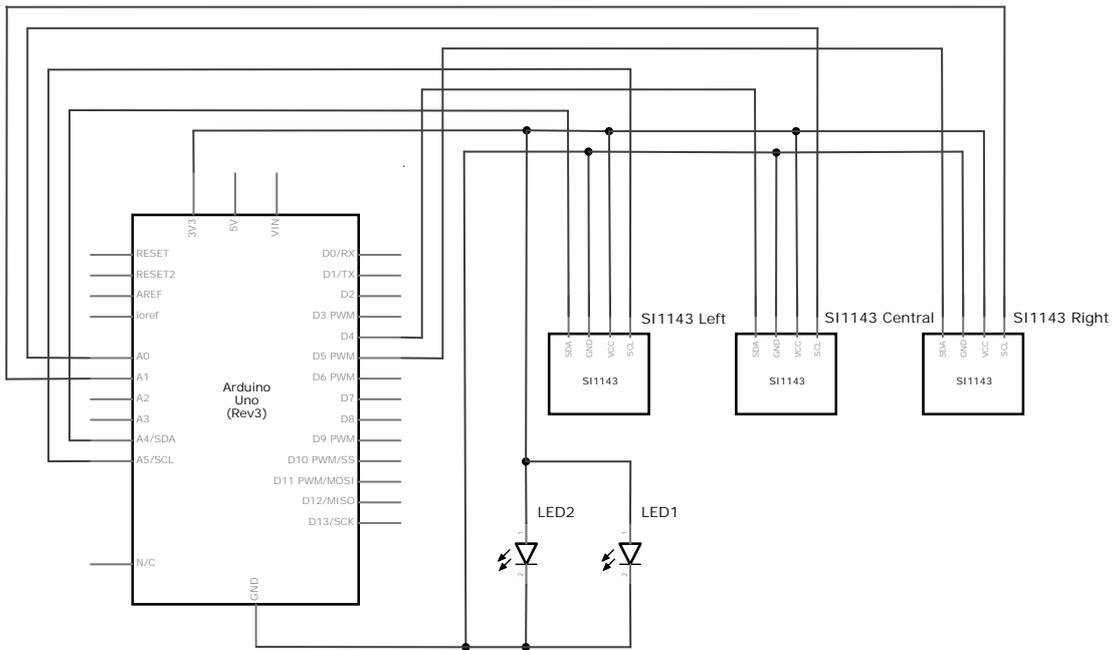


Fig. 5.16. Esquema eléctrico del sistema automático de conteo de cubos.

5.5. Fabricación de pieza para instalación de sensores

Para la fabricación de la nueva pieza divisoria para el BBT se ha optado por la impresión 3D. Esta es una opción rápida, sencilla y de bajo coste, tanto en el proceso de diseño como en el de fabricación. Para ello se ha utilizado una impresora 3D del Laboratorio de Robótica Asistencial del Parque Científico Tecnológico de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

El diseño propuesto respeta las dimensiones de la pieza tradicional, disponiendo los sensores integrados en la propia pieza. Para ello se ha diseñado con el vaciado correspondiente al tamaño y forma de estos para poder ser encajados en la pieza. Además, como se puede ver en la Fig. 5.17b, el cableado también queda integrado en la pieza, evitando entorpecer el desarrollo del BBT. Por otro lado, se han añadido conectores en ambos lados de la pieza. Esto permite una rápida conexión de todo el sistema de sensores hasta el microcontrolador. El hecho de que haya dos conectores es debido a que la pieza solo detecta en uno de los compartimentos, por lo que solo funcionaría para la evaluación de una extremidad. Al desmontar la pieza y girarla, se consigue automatizar el conteo de la otra mitad de la evaluación. El segundo conector permite mantener el cableado alejado del paciente, evitando cualquier posible molestia.

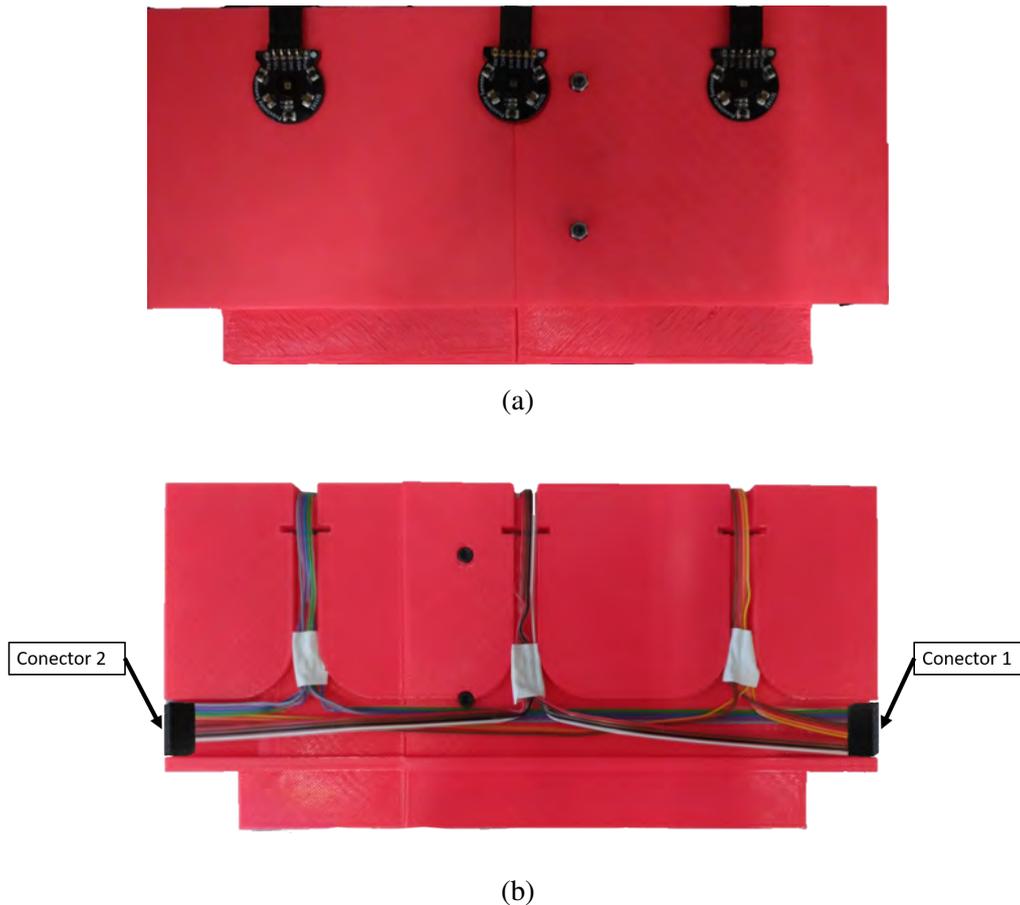


Fig. 5.17. Pieza divisoria BBT fabricada mediante impresión 3D. (a) Vista frontal con sensores integrados. (b) Vista trasera con cableado integrado y conectores.

Otro de los puntos a destacar, es la implementación de diodos LED en la pieza. Estos indican el tiempo en el que los sensores están funcionando, en este caso el tiempo estandarizado para la prueba BBT.

5.6. Proceso de detección de cubos en la automatización del BBT

El proceso de detección de cubos automatizado mediante los sensores de proximidad SII143 se puede dividir en tres fases diferenciadas: Reconocimiento del compartimento, Tratamiento de la señal ADC y Algoritmo de detección. El código que implementa estas fases se encuentra en el siguiente [link](#).

1. Reconocimiento del compartimento: una vez iniciada la aplicación los sensores reconocen el entorno durante 2 décimas de segundo y preparan la detección en función a los valores obtenidos.
2. Tratamiento de la señal ADC: Se aplica un alisado exponencial a la señal obtenida para reducir y amortiguar el posible ruido y las interferencias en la señal.

3. Algoritmo de detección: Se aplica el algoritmo diseñado para la detección de cubos analizando las curvas generadas en la señal ADC.

En el diagrama de la Fig. 5.18 se representa el proceso general de la prueba de evaluación BBT para una duración de 60 segundos.

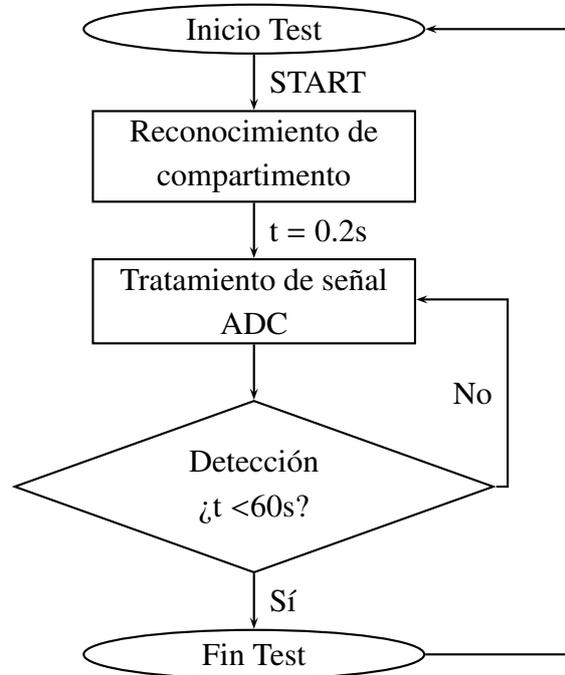


Fig. 5.18. Diagrama general del proceso de detección de cubos en BBT.

5.6.1. Reconocimiento del compartimento. Supresión del primer plano (FGS)

Antes de comenzar el test, el sistema realiza un reconocimiento del entorno para determinar un valor umbral de la señal del que partir. Este proceso se realiza aplicando la teoría de supresión de primer plano (*Foreground Suppression, FGS*), tomando en este caso, las paredes laterales del compartimento como límite de detección, Fig. 5.19. De este modo, todo aquello susceptible de ser detectado alrededor de la estructura del BBT durante la prueba será descartado. Elementos estructurales cercanos o el propio cuerpo del paciente quedan fuera del rango de detección del sistema.

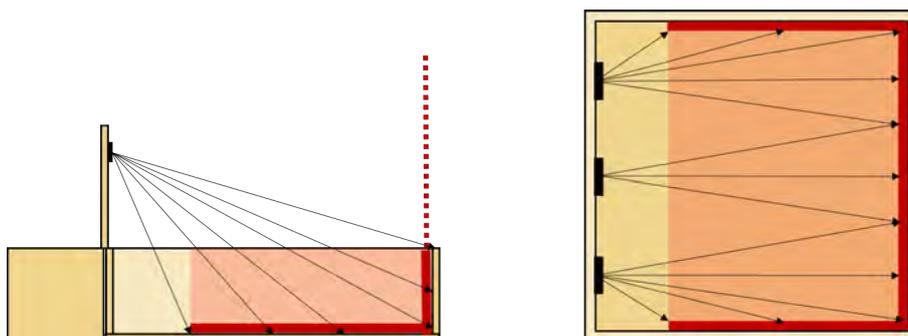


Fig. 5.19. Supresión de primer plano. Reconocimiento de compartimento.

El sistema esta diseñado para hacer una toma de datos durante 0.2 segundos antes de dar comienzo la prueba. Durante este tiempo se realizan 40 lecturas por cada LED, es decir, se obtienen un total de 360 datos. Estos se analizan y se calcula el valor de la señal ADC promedio, el valor máximo y el valor mínimo. El valor promedio marca un primer valor umbral. A este valor se le suma un porcentaje de error calculado mediante la relación entre el valor promedio y el valor máximo (ecuación 5.1). Finalmente, se aplica un factor de corrección (ecuación 5.2) que aumenta el valor umbral final, asegurando que quedan por debajo de este la mayoría de perturbaciones en la señal. Este factor de corrección puede ser modificado en función de las condiciones del entorno. De esta forma se evita que todo aquello que pueda ser detectado más allá de los laterales se desprecie.

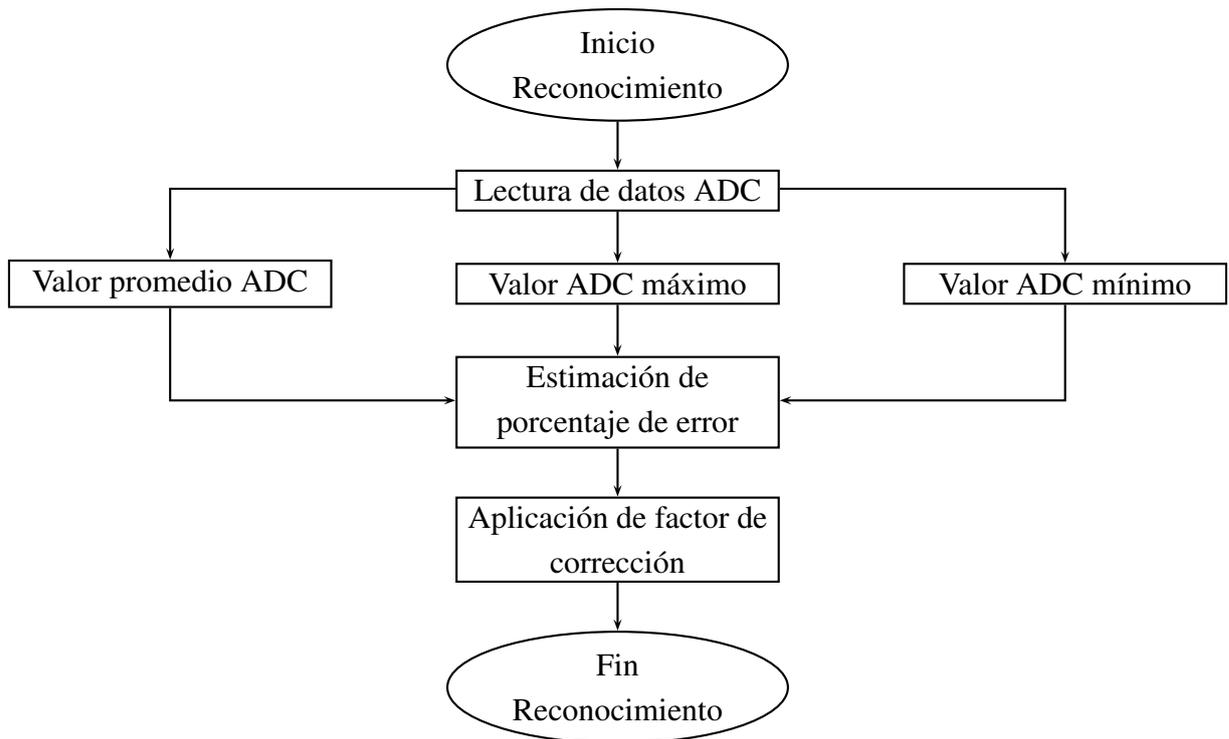


Fig. 5.20. Diagrama de reconocimiento de compartimento.

En un entorno en el que no se presentan objetos o elementos estructurales alrededor del BBT se obtienen los siguientes valores de la Tabla 5.1:

TABLA 5.1. RANGO DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE RECONOCIMIENTO SIN PRESENCIA DE ELEMENTOS ALREDEDOR DEL BBT.

Parámetros para reconocimiento	Rango de valores
$ADC_{promedio}$	360 - 390
ADC_{mximo}	400 - 490
ADC_{mnimo}	335 - 350
Error (%) (ecuación 5.1)	0.09 - 0.21
Factor de corrección (ecuación 5.2)	1.1

$$\%Error = 1 - \frac{ADC_{promedio}}{ADC_{maximo}}, \quad (5.1)$$

$$ADC_{FGS} = ADC_{promedio} + (Factor \cdot \%Error), \quad (5.2)$$

donde $ADC_{promedio}$ es el valor promedio de la señal obtenido, ADC_{maximo} es el valor máximo obtenido, $\%Error$ es la relación entre los valores ADC promedio y máximo, $Factor$ es el factor de corrección que depende del entorno y ADC_{FGS} es el valor umbral final de la supresión de primer plano.

5.6.2. Tratamiento de la señal ADC

Antes analizar la señal ADC obtenida de los sensores se aplica un alisado exponencial (5.3) que permite estabilizar estos valores en una serie de aspectos.

- Amortiguamiento de señal en la detección de vacío. Cuando los sensores están activos pero no hay ningún objeto a detectar se obtiene aproximadamente una señal constante en el tiempo de 375 ± 35 ADC. A priori no afecta en la detección pero, en el caso de la prueba de evaluación BBT, los cubos tienen que ser detectados a gran velocidad por lo que los sensores tienen que presentar una alta sensibilidad. Esta pequeña variación puede ser similar al inicio del flanco de detección de un cubo. Al suavizar la señal mediante el alisado exponencial (ver ecuación 5.3) con una constante de 0.8 se reduce la variación a ± 20 ADC.
- Reducción de la amplitud de interferencias. Las interferencias que presentan una pequeña amplitud se consiguen reducir e incluso eliminar, mejorando la calidad de la señal. Por el contrario, si la interferencia tiene una amplitud muy grande, el propio alisado hará que esta se incremente.
- Claridad en la señal de detección de cubos. Al penetrar un cubo en el campo de detección la señal ADC incrementa su valor rápidamente. Del mismo modo, en la salida de la zona de detección la señal ADC decrementa su valor a gran velocidad. Gracias al alisado se genera una curva con un trazo limpio, el cual facilita distinguir las distintas fases de la detección: flanco de subida, punto máximo, flanco de bajada.

$$ADC_i = ADC_{i-1} + cte(ADC_{real} - ADC_{i-1}), \quad (5.3)$$

donde ADC_i es el valor de la señal infrarroja ADC suavizada (uds), ADC_{i-1} es el valor de la señal infrarroja ADC suavizada anterior (uds), ADC_{real} es el valor de la señal infrarroja ADC real de los sensores (uds), $cte = 0,8$ es la constante de alisado.

5.6.3. Algoritmo de detección

Para la detección de la caída de un cubo se toma como referencia los valores obtenidos en la supresión de primer plano (FGS). Durante la detección de un cubo se pueden diferenciar tres fases en la señal ADC obtenida: flanco de subida, punto máximo y flanco de bajada.

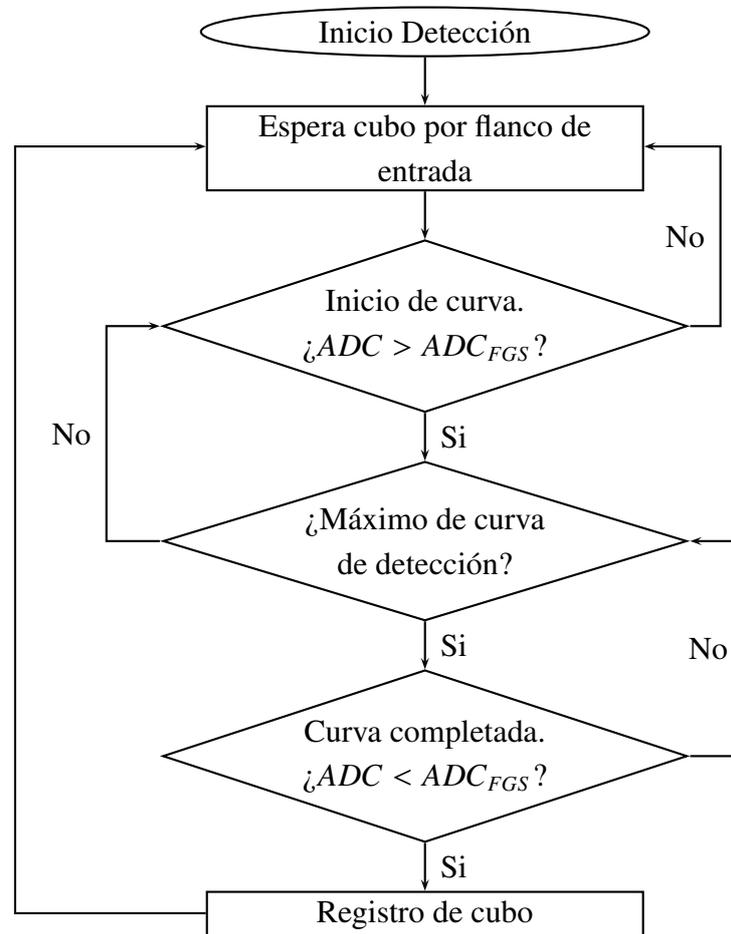


Fig. 5.21. Diagrama de detección completa de la caída de un cubo.

1. Flanco de subida: cuando un cubo penetra en el área de detección de un sensor incrementa la luz infrarroja reflejada haciendo que los valores de la señal ADC aumenten. Este aumento es muy pronunciado, del orden de 700 unidades por muestreo. En el caso de que el cubo pase muy cerca del sensor este aumento puede ser del orden de 2000 unidades por muestreo.
2. Punto máximo: analizar el punto máximo de la curva permite evaluar si realmente se ha detectado un cubo en caída. Cuando cae un cubo sigue una trayectoria recta hacia el compartimento. Que la señal ADC presente un flanco de subida, un flanco de bajada y un punto máximo generando una curva similar a una campana indica que se ha detectado un objeto en movimiento rectilíneo. En el caso de que apareciesen diferentes picos en la parte superior de la curva indicaría que el objeto detectado ha

variado su trayectoria, permaneciendo más tiempo en el campo de detección. Esto permite diferenciar entre un objeto en caída libre y otro simplemente detectado por el sensor.

3. Flanco de bajada: de forma simétrica al flanco de subida, en el flanco de bajada se obtienen valores ADC cada vez mas pequeños hasta llegar al un valor por debajo del umbral, completando la detección.

5.7. Representación de datos en tiempo real

El sistema de adquisición de datos está preparado para comunicarse con otras herramientas de software. En este caso, el visualizador de datos Processing (Arduino) y el software MATLAB. La información capturada se almacena automáticamente.

5.7.1. Visualización mediante Processing

Processing es una herramienta de software libre basado en el lenguaje de programación Java. Su programación está destinada a exponer el lenguaje de código en formas gráficas o artísticas. Una de las particularidades de esta herramienta es la posibilidad de leer los datos del Puerto Serial en el que se muestran los datos de Arduino. Estos datos, mediante Processing, se pueden representar tanto en forma numérica como geométrica.

Para esta aplicación se ha diseñado una ventana en la que se representan los valores de las señales de los sensores en tiempo real. Gracias a esta representación, Fig. 5.22, se pueden observar los puntos de detección de cubos y los valores producidos por interferencias. Además, el programa desarrollado en Arduino presenta algunas funciones de tiempo que calculan el tiempo parcial para cada detección. Estos se pueden destinar a su representación en Processing.

Para utilizar esta funcionalidad basta con adaptar el código de Arduino con las funciones referidas a la comunicación con Processing y lanzar el programa de este último.

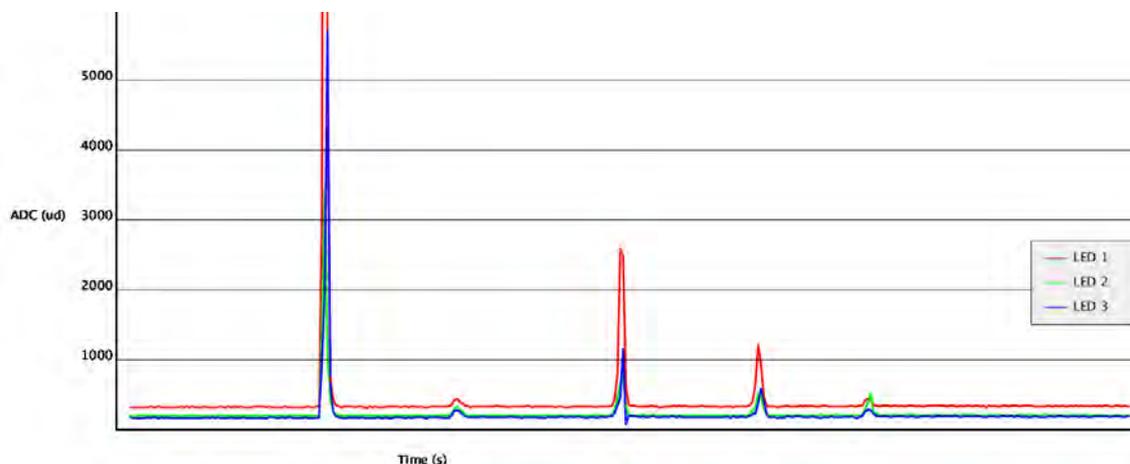


Fig. 5.22. Visualización de detección de cubos mediante Processing.

5.7.2. Visualización mediante Matlab

Por otro lado, el sistema también permite enviar datos a MATLAB. Lanzando el sketch desarrollado en MATLAB se almacenan en variables todos los datos referidos a la detección de un cubo. Para cada cubo permite conocer: el número de cubo detectado, tiempo absoluto de cada detección, tiempo parcial de cada detección y tiempo total de la prueba. Estas variables se representan gráficamente en tiempo real durante la realización del BBT, Fig. 5.23. Una vez terminado el test, todos los datos son guardados en variables para su posterior análisis.

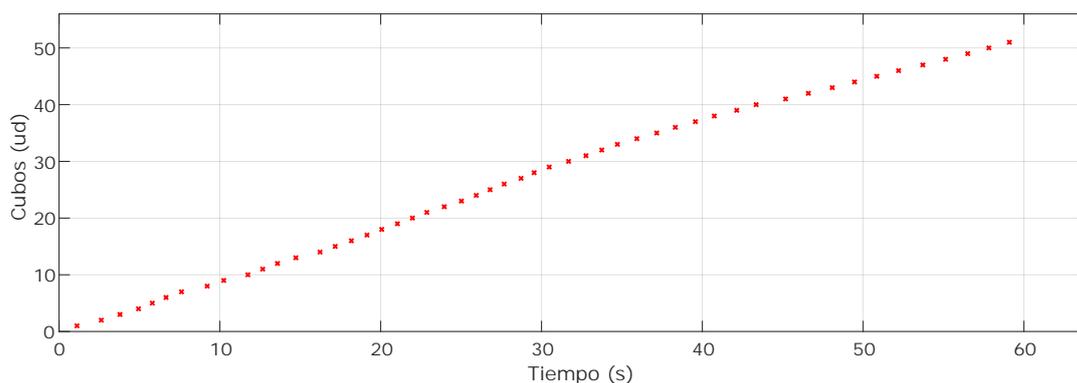


Fig. 5.23. Visualización de puntuación BBT mediante MATLAB en tiempo real.

Para la comunicación entre Arduino y MATLAB se ha desarrollado un sistema sencillo en el que MATLAB lanza el código de Arduino. Este último indica con un valor de inicio el comienzo de la prueba. Durante 60 segundos MATLAB lee el conteo de cubos hasta llegar a un valor que indica el final de la prueba.

El hecho poder tener toda la información almacenada en este entorno de desarrollo permite integrar todos los datos de la detección de cubos en otros sistemas, como puede ser el ABBT.

6. RESULTADOS

Para cuantificar la efectividad del sistema de conteo de cubos implementado se han realizado varios experimentos. En primer lugar, se ha buscado cuantificar la tasa de acierto absoluta del sistema, desplazando el mayor número de cubos posible sin límite de tiempo. Por otro lado, se ha realizado la prueba BBT acotando el conteo a la duración de dicha prueba. Finalmente, se ha buscado conocer la calidad de detección por zonas del compartimento, además de analizar posibles trayectorias que hagan fallar al sistema.

Todos estos experimentos se dieron lugar en las instalaciones del Laboratorio de Robótica Asistencial en el Parque Científico Tecnológico de la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M). El sujeto que se ha prestado a realizar las diferentes pruebas es un sujeto sano, sin problemas de movilidad en las extremidades superiores ni deterioro de la destreza manual gruesa.

6.1. Efectividad del sistema

En primer lugar, se ha realizado un experimento para determinar la efectividad absoluta del sistema diseñado. Con esta prueba se busca conocer la capacidad del sistema para detectar el desplazamiento de cubos característicos del BBT. De este modo es posible conocer el número de cubos no detectados y estudiar los posibles puntos débiles. Además, pretende analizar si el sistema propuesto es lo suficientemente robusto para mantener el conteo después de un gran número de desplazamientos y si la acumulación de cubos en el compartimento de recepción afecta a la detección.

Para este primer experimento se desplazaron los cubos a diferentes velocidades (lento, media, rápido, aleatoria) simulando el movimiento real que se ejecutaría al realizar una prueba BBT. Además, se realizó un quinto tipo de desplazamiento en el que los cubos se desplazaban hasta la parte superior del compartimento de recepción y se dejaban caer por su propio peso (caída libre). En la Tabla 6.1 se puede ver la frecuencia de desplazamiento aproximada para cada uno de los ensayos.

TABLA 6.1. VELOCIDADES DE DESPLAZAMIENTO EN LOS ENSAYOS DEL EXPERIMENTO DE LA EFECTIVIDAD DEL SISTEMA.

Velocidad de ensayo	Frecuencia de desplazamiento
Lento	0.5 cubo/s
Media	1 cubo/s
Rápido	2 cubo/s
Aleatoria	Combinación de lento, media y rápida
Caída libre	0.5 cubo/s

Para obtener una muestra de datos lo suficientemente amplia para determinar una tasa de efectividad fiable se desplazaron cubos de uno en uno para cada velocidad de desplazamiento, anotando el conteo obtenido para cada múltiplo de 10. Estos ensayos se realizaron hasta desplazar el máximo de cubos disponibles en el laboratorio, 150 cubos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.2. En total se realizaron 75 ensayos sin límite de tiempo.

TABLA 6.2. PORCENTAJE DE ACIERTO EN CONTEO AUTOMÁTICO A DIFERENTES VELOCIDADES

No. cubos	Conteo automático					Acierto (%)
	Lento	Media	Rápido	Aleatorio	Caida libre	
10	10	10	10	10	9	98,00
20	20	20	19	20	19	98,00
30	30	30	30	30	28	98,67
40	40	40	38	38	36	96,00
50	49	50	50	48	44	96,40
60	60	58	59	55	54	95,33
70	69	69	71	68	60	96,29
80	79	79	80	76	70	96,00
90	88	89	90	88	81	96,89
100	97	95	98	90	92	94,40
110	107	110	108	108	99	96,73
120	120	122	120	114	111	97,83
130	127	129	129	122	120	96,46
140	141	136	140	134	128	97,00
150	145	144	146	144	136	95,33 %

Se puede observar como el sistema es capaz de detectar hasta el número máximo de cubos utilizados sin presentar fallos de conteo por acumulación de estos en el compartimento. Además, se aprecia que la velocidad de desplazamiento no repercute nega-

tivamente en el conteo, llegando a perder un único cubo por cada 30 desplazamientos, manteniendo esta dinámica hasta los 150 cubos. Por otro lado, presenta un déficit claro en la detección de cubos en caída libre. En este caso la pérdida de cubos aumenta a una media entre 2 y 3 cubos por cada 30 desplazamientos. Hay que destacar que este tipo de desplazamiento no es habitual en la realización del BBT.

Estos resultados se pueden ver representados en la Fig. 6.1 para un mejor análisis. Se observa como la efectividad del sistema se mantiene constante por encima de un 95 %, obteniendo una tasa de acierto promedio del 96.62 % en el registro de hasta 150 cubos.

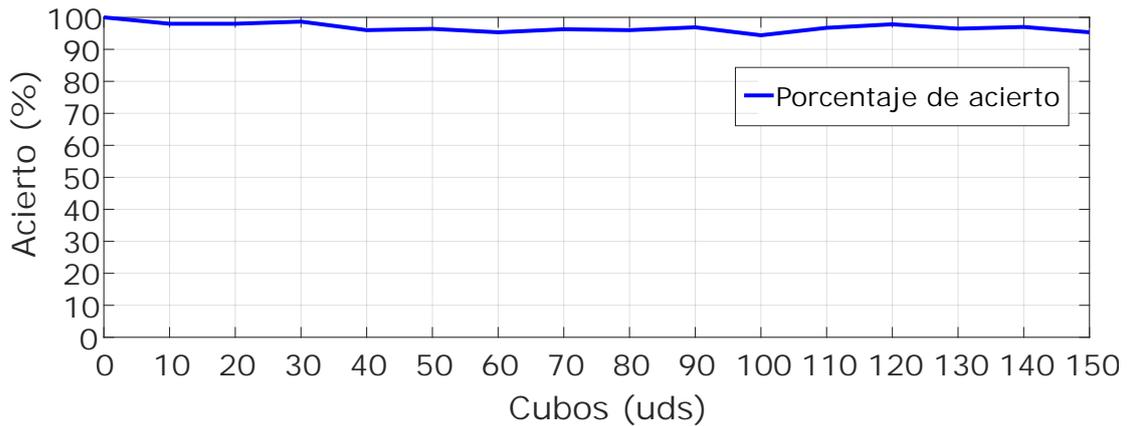


Fig. 6.1. Porcentaje de acierto en detección automática.

6.1.1. Tasa de acierto en el conteo automático BBT

Llevando estos resultados a la prueba de evaluación BBT podemos centrar el análisis de la efectividad del sistema únicamente en los desplazamientos semejantes a los que se darían en una prueba BBT real. En este caso, habría que centrarse en los ensayos realizados a las cuatro primeras velocidades (lento, media, rápido, aleatoria). Estas velocidades pueden simular diferentes tipos de pacientes, representando a sujetos con algunos problemas de destreza en las velocidades lenta y aleatoria, y a sujetos sanos en las velocidades media y rápida. En la Tabla 6.3 se reflejan los resultados acotando los resultados a las velocidades mencionadas.

Como se observa tanto en la Tabla 6.3, como en la Fig. 6.2 se obtiene un porcentaje de acierto elevado. En la detección de hasta 30 cubos se registran alrededor del 100 %, fallando en una única detección en todos los ensayos realizados. Aumentando el número de cubos desplazados hasta puntuaciones mayores se obtiene un porcentaje de acierto superior al 97 %, fallando el sistema en 0 o 1 cubos por cada 10 desplazamientos. Como resultado general se obtiene una tasa de acierto promedio de $98,22 \pm 1,41$.

TABLA 6.3. PORCENTAJE DE ACIERTO EN CONTEO AUTOMÁTICO BBT A DIFERENTES VELOCIDADES

No. cubos	Conteo automático				Acierto (%)
	BBT Lento	BBT Medio	BBT Rápido	BBT Aleatorio	
10	10	10	10	10	100,00
20	20	20	19	20	98,00
30	30	30	30	30	100,00
40	40	40	38	38	97,50
50	49	50	50	48	98,50
60	60	58	59	55	96,67
70	69	69	71	68	98,93
80	79	79	80	76	98,13
90	88	89	90	88	98,61
100	97	95	98	90	95,00
110	107	110	108	108	98,41
120	120	122	120	114	99,17
130	127	129	129	122	97,50
140	141	136	140	134	98,39
150	145	144	146	144	96,50

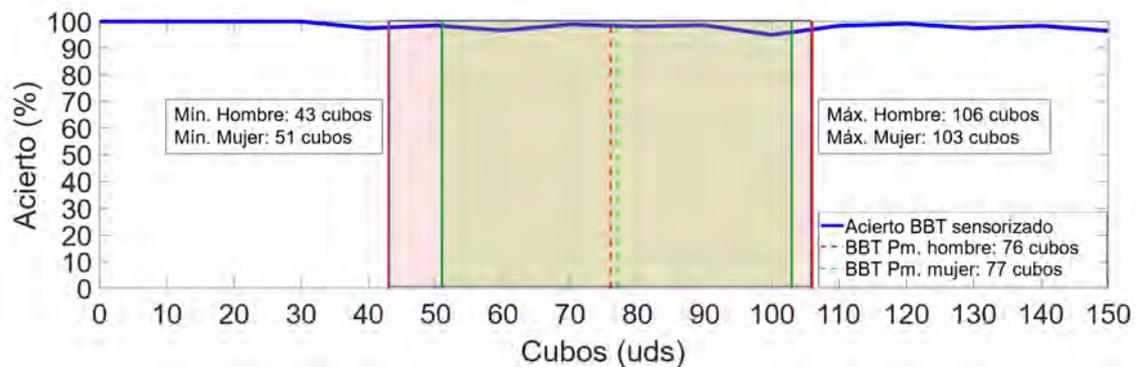


Fig. 6.2. Porcentaje de acierto en detección automática en ensayos similares a BBT.

Trasladando estos resultados a los estándares del estudio [22], se observa como el sistema es capaz de operar dentro del rango de puntuaciones estandarizadas para sujetos sanos de diferentes edades en el BBT, e incluso en puntuaciones superiores. Dicho estudio contabilizó una puntuación promedio para hombres y mujeres de 76 y 77 cubos respectivamente. Del mismo modo las puntuaciones mínimas y máximas registradas fueron de 43 y 106 para hombres y de 51 a 103 en mujeres.

6.1.2. Datos adicionales obtenidos

La aplicación está diseñada para comunicarse con la herramienta de software MATLAB, en la que se almacenan de forma automática los datos más relevantes para una evaluación objetiva del desarrollo de la prueba BBT. Estos datos se muestran gráficamente para un mejor análisis. En la Fig. 6.3 aparece la distribución temporal de detección de cubos durante la realización de la prueba a diferentes velocidades de desplazamiento. El tiempo está acotado a los 60 segundos definidos en la normativa del BBT.

Se puede observar que, además de la puntuación total obtenida se proporciona al terapeuta una serie de información adicional, en la que se puede conocer la frecuencia de desplazamiento de cubos, el nivel de dispersión o los tiempos parciales entre cada desplazamiento. Además, esta representación de la puntuación obtenida automáticamente permite conocer con exactitud los puntos de la prueba en los que un paciente ha presentado dificultades para mantener un ritmo constante o problemas a la hora de coger un cubo.

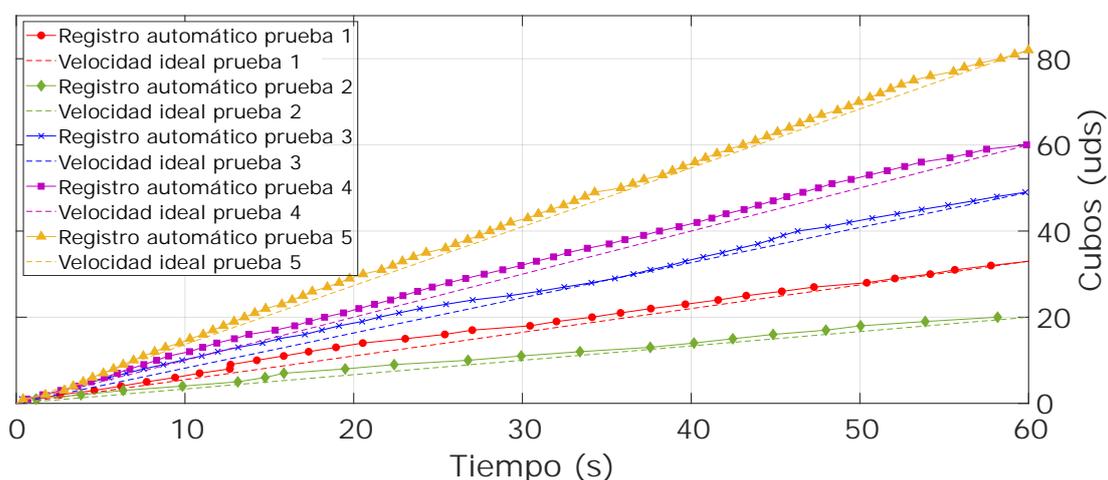


Fig. 6.3. Representación de puntuaciones BBT obtenidas por el sistema automatizado.

Toda esta información adicional, permite al terapeuta hacer una valoración objetiva más amplia de la condición real del paciente.

En la Fig. 6.4 se muestra gráficamente la puntuación real obtenida por un usuario sano que realizó la prueba de evaluación de destreza manual BBT por un sujeto sano de 24 años utilizando el sistema de conteo automatizado. En este caso, el usuario desplazó 82 cubos con la mano dominante (derecha) y 66 cubos con la mano no dominante (izquierda), obteniendo una efectividad del 100 % en el conteo automático. La información que se ofrece permite ver analizar de forma rápida y objetiva el desarrollo completo de la prueba, tanto para una mano como para otra. Además, se indica la velocidad ideal sobre la que deberían registrarse los cubos. En el momento que una detección se aleje de esta línea sería indicativo de que el paciente ha presentado algún tipo de problema. Por otro lado, se puede comparar ambas extremidades al mismo tiempo, permitiendo detectar directamente diferencias de coordinación y destreza significativas entre estas.

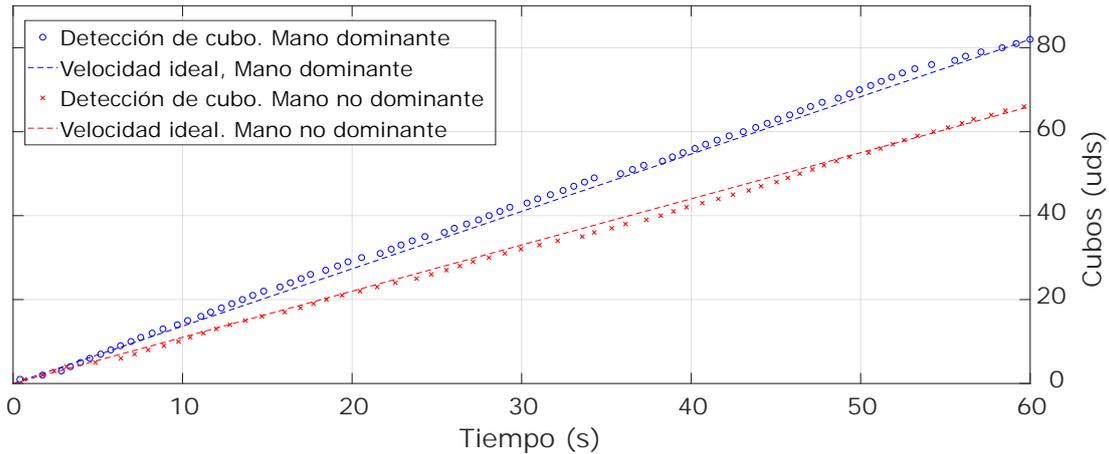


Fig. 6.4. Puntuación automatizada BBT.

Otra de las ventajas que ofrece la aplicación es el análisis de la frecuencia de desplazamiento de cubos en función de los tiempos parciales. Como se observa en la Fig. 6.5 se puede conocer si la frecuencia de movimientos es constante durante toda la prueba. Del mismo modo, se puede saber en que momento se ha acelerado el ritmo registrando tiempos parciales mas pequeños, o cuando se han tenido dificultades mostrando tiempos parciales mayores. La Fig. 6.5 muestra la frecuencia de desplazamiento de cubos para la prueba realizada anteriormente. En esta se representa el tiempo parcial promedio calculado durante el test y la dispersión de tiempos para cada uno de los cubos detectados. Se observa como la mayoría de detecciones mantienen un ritmo constante ajustándose a dicho valor promedio. En algunos casos se aparecen picos en los que la frecuencia de movimientos del usuario ha aumentado considerablemente. Nótese, que los valores de tiempo obtenidos por el sistema son del orden de milisegundos y que los valores obtenidos en esta prueba son bastante constantes. Las variaciones en la frecuencia más significativas obtenidas en este caso no superan el segundo de duración.

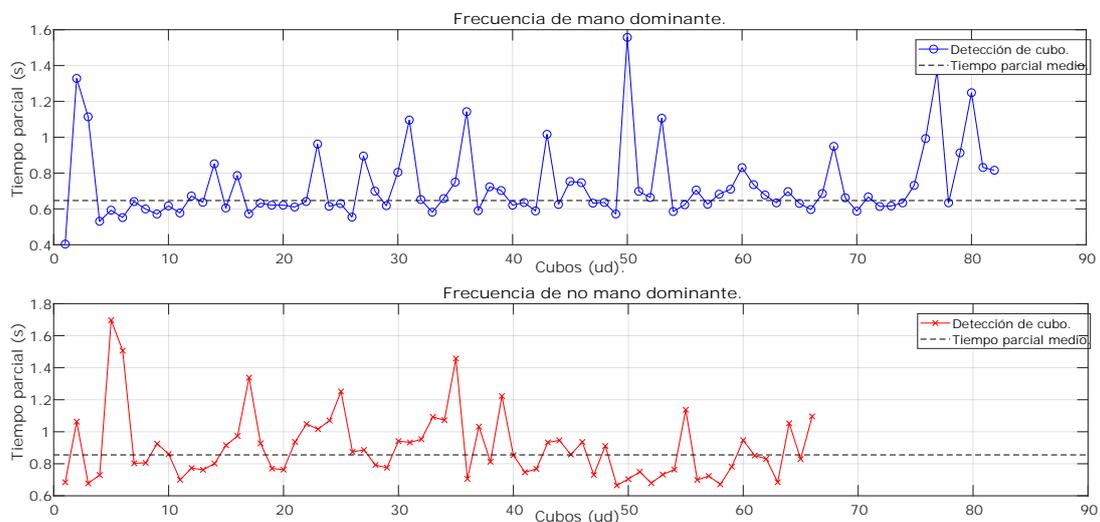


Fig. 6.5. Análisis de frecuencia de desplazamiento de cubos detectados automáticamente.

6.2. Limitaciones

Para determinar las limitaciones en la detección de acuerdo a la zona de compartimento, se ha dividido del compartimento de recepción de cubos en 13 zonas, Fig. 6.6a. Se puede diferenciar entre tres bloques. Un primer bloque que abarca la parte próxima a los sensores. Esta zona se ha dividido en 7 zonas correspondientes a la parte frontal de los sensores y a las zonas laterales de estos. Los dos bloques restantes se ubican en la parte central y en la parte más alejada de los sensores. Estos a su vez están divididos en tres zonas: dos zonas laterales y una zona central.

Para este experimento se realizaron diez ensayos divididos en grupos de dos, en los que se dejaron caer cubos desde una altura de 20 cm en series de 10 cubos, hasta acumular un total de 50 cubos en cada zona. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.4 .

Los Fig. 6.6 representa de forma gráfica la tasa de acierto para cada una de las zonas. Se observa como en las zonas frontales a los sensores se obtiene un 100 % de acierto. Por otro lado, las zonas laterales a los sensores y las zonas laterales de la franja central presentan una efectividad superior al 98 %. Por el contrario, en el lateral y esquinas mas alejadas no se produce apenas detección, obteniendo valores por debajo de 6 %. Como se ha comentado anteriormente, este error es asumible teniendo en cuenta la dinámica de desplazamiento de cubos en el BBT.

TABLA 6.4. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE PORCENTAJE DE DETECCIÓN EN ZONAS DE UN COMPARTIMENTO.

Zona BBT	10 Cubos		20 Cubos		30 Cubos		40 Cubos		50 Cubos		Acierto(%)
1	10	10	20	20	30	29	40	40	50	50	99,67 %
2	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	100,00 %
3	8	19	18	18	29	29	38	39	45	47	96,67 %
4	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	100,00 %
5	9	9	18	19	29	27	37	37	47	46	92,67 %
6	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	100,00 %
7	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	100,00 %
8	9	10	19	20	28	30	39	39	50	50	98,00 %
9	10	10	20	18	30	27	40	36	50	49	96,67 %
10	10	10	20	18	30	28	40	40	49	50	98,33 %
11	0	0	0	0	1	0	1	2	5	2	3,67 %
12	2	0	1	0	2	2	4	1	2	3	5,67 %
13	0	0	0	0	2	1	2	0	4	1	3,33 %

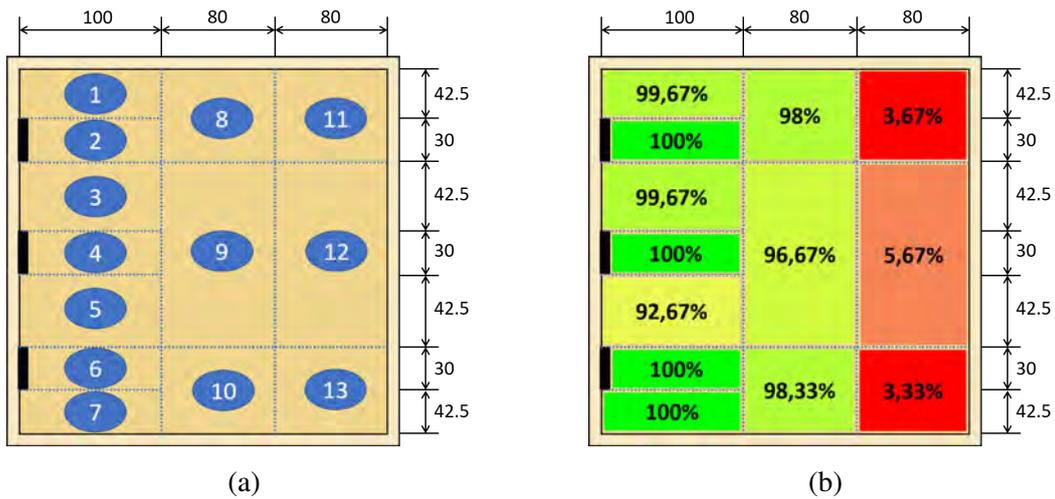


Fig. 6.6. Porcentaje de detección de un compartimento. (a) Zonas de detección estudiadas. (a) Tasa de acierto por zona.

6.2.1. Errores de detección en la mecánica de movimiento del BBT

Como se ha demostrado en los apartados anteriores, durante la puntuación automática del BBT aparece un pequeño porcentaje de error en el que se dejan de detectar algunos cubos. Se ha comprobado como el sistema de sensores propuesto es fiable en la detección, por lo que el posible fallo puede tener su origen en la propia mecánica de la prueba.

En este análisis se ha estudiado el desarrollo real del BBT realizado por un sujeto sano, centrandolo en las zonas de agarre de cubos, la trayectoria de desplazamiento realizada por la mano, el punto de lanzamiento y la zona de recepción en el compartimento.

Se observa como en la mayoría de las pruebas el sujeto selecciona cubos de la zona central desde el inicio. A medida que avanza el test la zona central se va vaciando, por lo que es necesario coger cubos de otras zonas, Fig. 6.8. En casos de puntuaciones muy altas, los últimos cubos a desplazar se encuentran en las esquinas del compartimento.

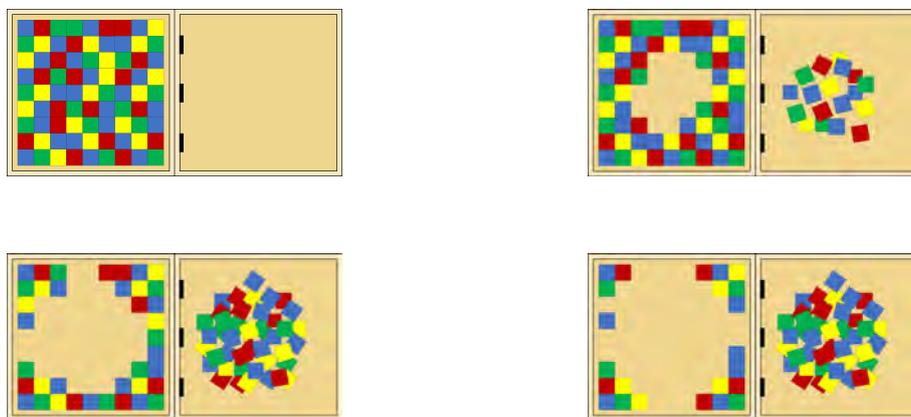


Fig. 6.8. Vaciado de compartimento BBT durante su ejecución.

Por otro lado, se observa como las trayectorias de la mano no son siempre paralelas a los laterales del BBT, sino que aparecen algunas trayectorias diagonales.

Respecto al punto de lanzamiento, se ha detectado que la gran mayoría se realiza en zonas próximas a la pieza divisoria. Se puede apreciar una zona clara de lanzamiento entre 1 cm y 5 cm de distancia de dicha pieza, Fig. 6.9.

Una vez conocida una la mecánica básica de desplazamiento se realizó un experimento para conocer la relación entre los lanzamientos y la efectividad de detección de los sensores. Para ello se distribuyeron 30 cubos agrupados en 9 zonas del compartimento mostradas en la Fig. 6.9. Para cada zona de agarre se realizaron 5 ensayos. El objetivo principal de estos ensayos es conocer el desplazamiento real de los cubos y la zona de caída, para de este modo saber si existen casos en los que los cubos no pueden ser detectados.

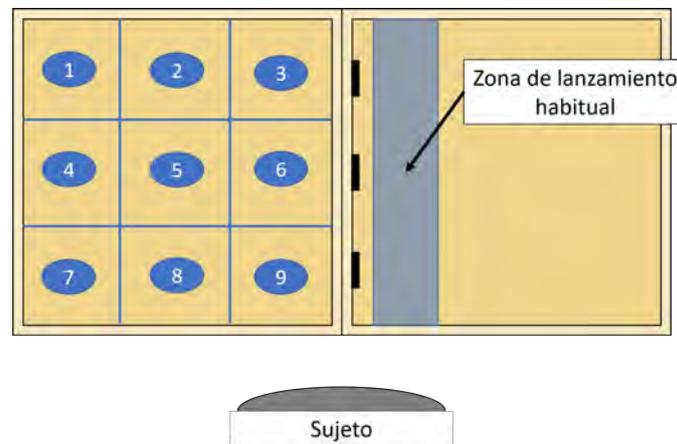


Fig. 6.9. Distribución de zonas de agarre de cubos y área de lanzamiento habitual.

Para estudiar estos resultados se va a estructurar el análisis en dos partes: distancia entre sujeto y cubos, y distancia entre cubos y pieza divisoria.

Comenzando este análisis por las zonas 7, 8, 9 se observa, como se representa en la Fig. 6.10, que el desplazamiento se realiza paralelo a los laterales de los compartimentos. Esta trayectoria se nota como la más rápida ya que es la distancia más corta entre el agarre y el lanzamiento. Distinguiendo las distancias entre cubo y pieza divisoria se observa como en las zonas 7 y 8 (zonas mas alejadas, Fig. 6.10a, Fig. 6.10b) el punto de caída del cubo está entre la zona central y el lateral más alejado del compartimento de recepción. Esto es debido a que el desplazamiento de la mano tiene un mayor recorrido y alcanza mayor velocidad, por lo que al soltar el cubo sale lanzado a mayor distancia. Por el contrario, en la zona 9, Fig. 6.10c, destaca el movimiento vertical de la mano y la inmediatez del lanzamiento del cubo. Esto hace que el cubo caiga en zonas muy cercanas a la pieza con los sensores con un movimiento vertical.

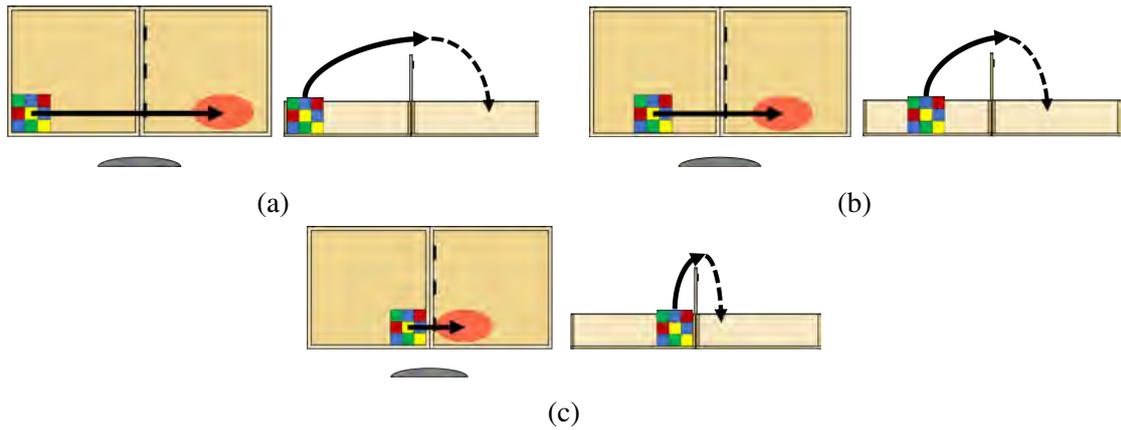


Fig. 6.10. Zonas de agarre cercanas al sujeto. (a) Zona 7, (b) Zona 8 y (c) Zona 9.

Del mismo modo, las zonas centrales 4, 5 y 6 presentan desplazamientos y lanzamientos similares a los anteriores. Cabe destacar que las zonas 4 y 5 son, para un sujeto sano, las zonas de agarre de mayor comodidad ya que la posición del cuerpo respecto al BBT hace posible movimientos de la mano más sencillos. Ver Fig. 6.11

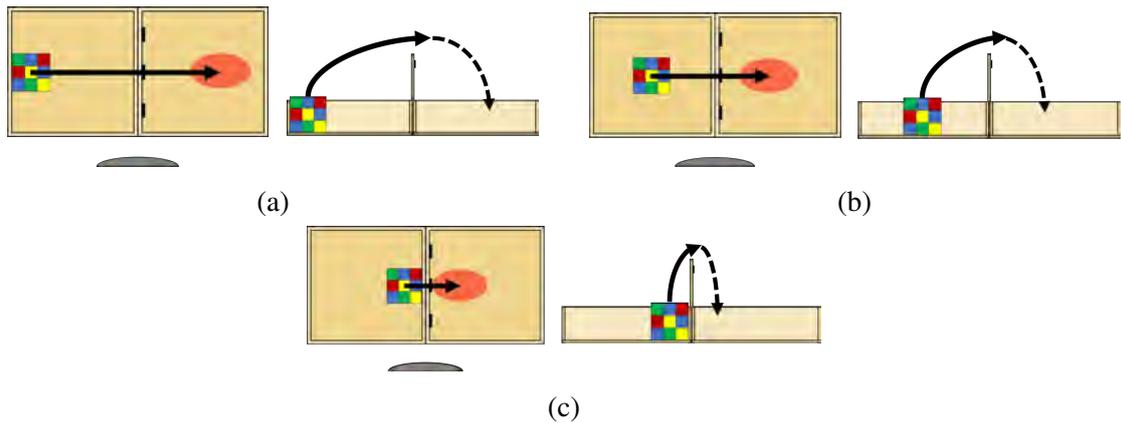


Fig. 6.11. Zonas de agarre a distancia media del sujeto. (a) Zona 4, (b) Zona 5 y (c) Zona 6.

En el caso de los cubos más alejados del usuario, zonas 1, 2 y 3, se observa como aparece una tendencia a realizar una trayectoria diagonal buscando el centro del compartimento de recepción como se representa en la Fig. 6.12. Respecto a la distancia de lanzamiento de cubos aparecen los mismos resultados, lanzamientos más largos para distancias alejadas, Fig. 6.12a y Fig. 6.12b y lanzamientos cortos en zonas próximas a la pieza divisoria, Fig. 6.12c.

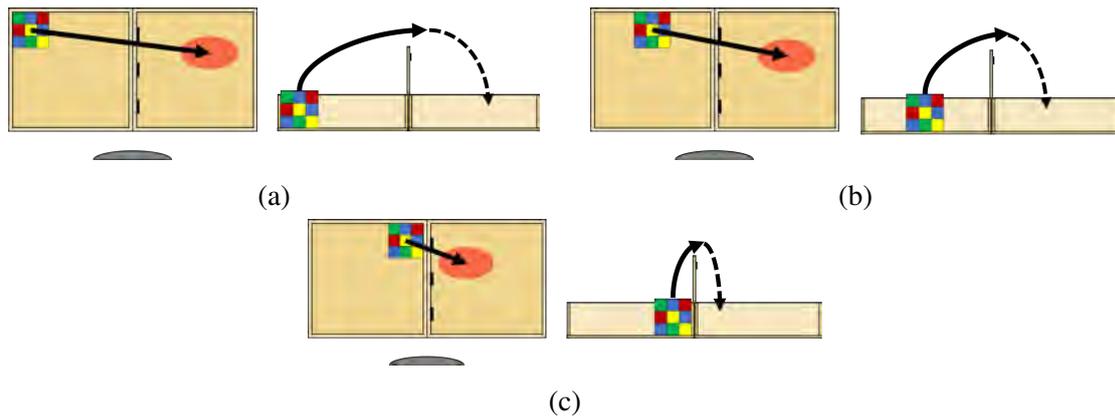


Fig. 6.12. Zonas de agarre a mayor distancia del sujeto. (a) Zona 1, (b) Zona 2 y (c) Zona 3.

Una vez realizados todos los ensayos se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 6.5. Se observa que aparecen fallos de detección en las zonas más alejadas del usuario (zonas 1, 2 y 3). Se puede suponer que el gesto de agarrar un cubo y desplazarlo hacia una zona central imprime mayor velocidad en el lanzamiento, dando lugar a lanzamientos hacia la parte de baja sensorización de los sensores.

En el resto de casos, se observa una tasa de acierto elevada, llegando en la mayoría de casos al 100 %. Del mismo modo, se puede suponer que los cubos agarrados en los laterales más alejados de la pieza divisoria son lanzados a mayor distancia, generando fallos en la detección.

TABLA 6.5. TASA DE ACIERTO EN DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE DESPLAZAMIENTO DE CUBOS POR ZONAS.

Zona	Detección automática (30 cubos)					Acierto (%)
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	
1	29	30	29	29	29	97,33
2	30	28	29	30	29	97,33
3	30	30	30	29	30	99,33
4	30	30	30	30	30	100,00
5	30	30	29	30	30	99,33
6	30	30	30	30	30	100,00
7	30	29	30	30	30	99,33
8	30	30	30	30	30	100,00
9	30	30	30	30	30	100,00

7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

7.1. Planificación temporal del desarrollo del proyecto



7.2. Presupuesto del proyecto

Código	Unidad	Descripción	Medición	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
1		CAPITULO: EQUIPAMIENTO TERAPÉUTICO			
1.1	u	Box & Blocks Test. Suministro de caja de madera portatil y 150 cubos de madera de diferentes colores.	1	215	215
2		CAPITULO: COMPONENTES ELECTRÓNICOS			
2.1	u	Arduino UNO REV 3. Suministro de placa Arduino.	1	20	20
2.2	u	SI1143 Proximity Sensor Suministro de sensores de proximidad fotoeléctricos.	3	15	45
2.3	u	Diodo LED rojo redondo de 5 mm. Suministro de diodo.	1	0.25	0.25
2.4	u	Diodo LED verde redondo de 5 mm. Suministro de diodo.	1	0.25	0.25
2.5	m	Cable plano. Soldadura y crimpado de circuito electronico.	1	2.30	2.30
2.6	u	Conector 4 pines hembra. Suministro y crimpado de conectores.	3	0.15	0.45
2.7	u	Conector PCB pines hembra. Suministro y crimpado de conectores.	4	0.20	0.80
3		CAPITULO: IMPRESIÓN 3D			
3.1	u	Fabricación pieza divisoria BBT. Diseño y fabricación de pieza mediante impresión 3D.	1	15	15

CAPITULO: EQUIPAMIENTO TERAPÉUTICO	
TOTAL	215 €

CAPITULO: COMPONENTES ELECTRÓNICOS	
TOTAL	65 €

CAPITULO: IMPRESIÓN 3D	
TOTAL	15 €

TOTAL PROYECTO	295 €
-----------------------	--------------

8. CONTEXTO SOCIOECONÓMICO

Uno de los análisis más interesantes que se pueden realizar sobre este sistema de automatización de la puntuación del BBT es su valor tanto social como económico en los sistemas sanitarios, así como su posible repercusión.

Según la Estadística de Gasto Sanitario Público del Sistema Nacional de Salud Español de 2016 [29] publicado por el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad de España el gasto sanitario público en el año 2016 en España supuso 66.678 millones de euros, de los cuales 1.227 millones fueron destinados a traslado, prótesis y aparatos terapéuticos. Esta inversión es de gran importancia ya que marca las bases de un buen proceso de recuperación o rehabilitación.

La automatización de la puntuación de un sistema de evaluación física como es el BBT busca facilitar la labor del terapeuta, proporcionándole resultados objetivos de forma inmediata. Esto supone la liberación de tareas del terapeuta ya que se elimina la función de conteo de cubos. De este modo solo debería atender a la correcta realización de la prueba, centrando toda su atención en los movimientos realizados. Así, se podría conseguir una evaluación más completa combinando la información de la puntuación y la de la destreza manual.

Por otro lado, al eliminar la tarea de conteo, el terapeuta puede trabajar con mayor número de pacientes a la vez, ya que la labor que requiere mayor concentración es la de obtención de la puntuación final. Para sujetos con problemas de movilidad a los que hubiera que prestar más atención se podrían realizar evaluaciones de dos o tres pacientes a la vez, pero para evaluaciones de pacientes con mayor movilidad y que se conozca de antemano que realizan la prueba siguiendo las normas BBT correctamente se podría trabajar con grupos mayores. El hecho de llevar a cabo la prueba por más de un paciente a la vez supone un ahorro de tiempo a tener en cuenta, permitiendo la atención de mayor número de personas en un menor periodo de tiempo.

Esta agilización de la evaluación repercute directamente en los intereses de los pacientes, que buscan una atención sanitaria lo más rápida posible. De esta manera se puede ofrecer un diagnóstico de tratamiento o un proceso de rehabilitación lo antes posible, buscando la mínima demora en la recuperación del paciente.

Atendiendo a la repercusión económica, cabe destacar que el sistema automático propuesto no reduce costes sanitarios por mejorar la salud activamente, sino que ofrece una reducción de tiempo de evaluación de pacientes, acortando las listas de espera.

9. CONCLUSIONES

9.1. Objetivos cumplidos

En este Trabajo de Fin de Grado se ha presentado el desarrollo de un sistema basado en sensores de proximidad para la automatización de resultados del test de destreza y coordinación manual gruesa Box & Blocks Test. Se ha comprobado como se han conseguido los objetivos propuestos, proponiendo una solución sencilla y de bajo coste para la automatización de la puntuación de la prueba BBT.

Por un lado, se ha comprobado la efectividad del sistema en el conteo automático de cubos, llegando a desplazar hasta un número de 150 cubos en varios ensayos, obteniendo una tasa de acierto promedio del 96,62 %. Estos resultados presentan un porcentaje elevado de acierto teniendo en cuenta que los ensayos realizados estaban centrados simplemente en el conteo de cubos, sin tener en cuenta la mecánica del BBT. Acotando estos resultados a los ensayos realizados con movimientos característicos del BBT, se presenta una efectividad cercana al 100 %, obteniendo tasa de acierto promedio del $98,22 \pm 1,41$ en el desplazamiento de hasta 150 cubos. Se ha comprobado como este valor se mantiene constante a pesar del paso del tiempo y las elevadas de cantidades de cubos detectados.

Analizando los posibles fallos de detección, cabe destacar la presencia de interferencias en la señal de los sensores y la generación de una zona de baja o nula detección en las partes del compartimento más alejadas de los sensores. Respecto a las interferencias generadas por la detección de las paredes del compartimento han sido filtradas en su totalidad, aplicando una Supresión de Primer Plano (FGS) y alisando los valores de la señal. Además, con este método se consigue discriminar posibles objetos cercanos al BBT. Por el contrario, las interferencias al detectar un cubo presentan una mayor amplitud y no en todas las ocasiones son filtradas por el sistema, generando detecciones dobles. Este evento aparece con una frecuencia muy pequeña, sucediendo en un único ensayo de todos los realizados. Respecto a las zonas de baja o nula detección, se puede considerar como una zona en la que no es habitual que caigan cubos por la propia mecánica de la prueba. Cabe destacar que, en cualquier caso, el desplazamiento de un cubo en estas zonas sigue siendo válido en la puntuación BBT. Nótese, que durante una prueba normal BBT se llegan a perder entre 0 y 3 cubos como máximo debido a estos fallos en la detección.

Teniendo en cuenta el diseño propuesto, se ha comprobado cómo tanto la implementación de los sensores en la pieza divisoria como el sistema de cableado no entorpece ni altera el desarrollo normal del test. Mediante el sistema de 3 sensores se ha conseguido sensorizar por completo las zonas de mayor probabilidad de caída de un cubo, además de ofrecer un sistema de conectores rápido y cómodo.

Considerando las normas del BBT, la media de cubos desplazados por personas jó-

venes es de 77 ± 31 cubos, lo que refuerza la viabilidad del método propuesto, ya que la tasa de acierto es aceptable hasta los 150 cubos. Finalmente, ofrece una solución de la puntuación BBT objetiva y automática al personal clínico presente durante la prueba, presentándole información de la puntuación total y análisis gráficos del desarrollo de esta. Por este motivo, se puede considerar a este sistema una propuesta válida y útil en entornos hospitalarios para para la automatización de la puntuación del Box & Blocks Test.

9.2. Líneas futuras de trabajo

Uno de los puntos a mejorar del sistema de sensores en un futuro es aumentar el porcentaje de detección en zonas alejadas. Una de las características que presenta material del BBT es su fabricación en madera, de manera que con cada desplazamiento de cubo se produce un fuerte sonido por el golpe entre la pieza y la base del compartimento. Este sonido se podría aprovechar para tener un segundo dato en la detección. De este modo se podría detectar la caída de un cubo en las zonas de baja intensidad de detección. Para ello se podría implementar un micrófono orientado hacia la zona de recepción. Cabe destacar que sería necesario estudiar la señal sonora generada y analizar si este sistema sería susceptible a fallos debido a ruido del entorno como la voz de las personas o el sonido al cerrar una puerta.

Por otro lado, este proyecto está diseñado para poder ser incorporado a otro para optimizar la automatización completa del test. Una de las líneas por las que se podría seguir es en la implementación de este sistema al ABBT presentado en [2], [20]. Teniendo en cuenta la efectividad del sistema de sensores, podría operar como soporte de detección del ABBT. El sistema de sensores informaría al sistema de visión en que momento se ha desplazado un cubo para que este analice la imagen. Además, gracias a la interfaz gráfica del ABBT la prueba sería más simpática para el paciente.

Finalmente, otro de las posibles líneas futuras de desarrollo sería la sensorización del compartimento donde se encuentran inicialmente los cubos para analizar las características de cada agarre. La implementación de un sistema Leap Motion en este compartimento podría aportar datos del agarre en cada uno de los cubos, presentando una información aprovechable para el terapeuta. Del mismo modo, sería necesario estudiar si la instalación de un sensor de visión en el BBT entorpecería la prueba por su presencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. J. M. F. van der Putten, J. C. Hobart, J. A. Freeman y A. J. Thompson, “Measuring change in disability after inpatient rehabilitation: Comparison of the responsiveness of the barthel index and the functional independence measure”, *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, vol. 66, n.º 4, pp. 480-484, 1999.
- [2] E. D. Oña et al., “El automatizado box & blocks test sistema automático de evaluación de destreza manual gruesa”, en *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática*, CEA-IFAC, 2016, pp. 619-626.
- [3] Tyromotion Inc, [Online; Accedido 12-Mayo-2018], 2007. [En línea]. Disponible en: <https://tyromotion.com/>.
- [4] K. Kontson, I. Marcus, B. Myklebust y E. Civillico, “Targeted box and blocks test: Normative data and comparison to standard tests”, *PLOS ONE*, vol. 12, n.º 5, pp. 1-15, mayo de 2017.
- [5] J. Desrosiers, A. Rochette, R. Hébert y G. Bravo, “The minnesota manual dexterity test: Reliability, validity and reference values studies with healthy elderly people”, *Canadian Journal of Occupational Therapy*, vol. 64, n.º 5, pp. 270-276, 1997.
- [6] Instrument, Lafayette, “The minnesota dexterity test examiner’s manual”, USA, Lafayette Company, 1998.
- [7] ———, “Purdue pegboard test: User instructions”, Lafayette, IN: Lafayette Instrument, 2002.
- [8] E. Wade, A. R. Parnandi y M. J. Matari, “Automated administration of the wolf motor function test for post-stroke assessment”, en *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on-NO PERMISSIONS*, IEEE, 2010, pp. 1-7.
- [9] SaliaRehab, *Action research arm test*, [Online; Accedido 20-Abril-2018], 2012. [En línea]. Disponible en: <http://saliarehab.com/arat.html>.
- [10] R. C. Lyle, “A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research.”, *International Journal of Rehabilitation Research*, vol. 4, n.º 4, pp. 483-492, 1981.
- [11] T. Lee, K. Leo, E. Chew, L. Zhao y S. Sanei, “Automated scoring of rehabilitative tests via time-frequency informed singular spectrum analysis”, en *Computational Intelligence for Multimedia Understanding (IWCIM), 2015 International Workshop on*, IEEE, 2015, pp. 1-5.
- [12] A. R. Fugl-Meyer, L. Jääskö, I. Leyman, S. Olsson y S. Steglind, “The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance.”, *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, vol. 7, n.º 1, pp. 13-31, 1975.

- [13] A. Deakin, H. Hill y V. M. Pomeroy, “Rough guide to the fugal-meyer assessment: Upper limb section”, *Physiotherapy*, vol. 89, n.º 12, pp. 751-763, 2003.
- [14] P. Otten, J. Kim y S. H. Son, “A framework to automate assessment of upper-limb motor function impairment: A feasibility study”, *Sensors*, vol. 15, n.º 8, pp. 20 097-20 114, 2015.
- [15] E. D. Oña, A. Jardón y C. Balaguer, “Towards a framework for rehabilitation and assessment of upper limb motor function based on serious games”, en *6th International Conference on Serious Games and Applications for Health (IEEE SeGAH 2018)*, [Pending publication], 2018.
- [16] J. Kowalczewski, S. L. Chong, M. Galea y A. Prochazka, “In-home tele-rehabilitation improves tetraplegic hand function”, *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 25, n.º 5, pp. 412-422, 2011.
- [17] Rehabtronics Inc, *Rejoyce*, [Online; Accedido 30-Mayo-2018]. [En línea]. Disponible en: <https://www.blog.rehabtronics.com/rejoyce>.
- [18] J. Kowalczewski, E. Ravid y A. Prochazka, “Fully-automated test of upper-extremity function”, en *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, IEEE, 2011, pp. 7332-7335.
- [19] C.-P. Hsiao, C. Zhao y E. Y.-L. Do, “The digital box and block test automating traditional post-stroke rehabilitation assessment”, en *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2013 IEEE International Conference on*, IEEE, 2013, pp. 360-363.
- [20] E. D. Oña, A. Jardón y C. Balaguer, “The automated box and blocks test an autonomous assessment method of gross manual dexterity in stroke rehabilitation”, en *Towards Autonomous Robotic Systems*, Y. Gao, S. Fallah, Y. Jin y C. Lekakou, eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 101-114.
- [21] J. D. Lemos, A. M. Hernandez y G. Soto-Romero, “An instrumented glove to assess manual dexterity in simulation-based neurosurgical education”, *Sensors*, vol. 17, n.º 5, p. 988, 2017.
- [22] V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman y K. Weber, “Adult norms for the box and block test of manual dexterity”, *American Journal of Occupational Therapy*, vol. 39, n.º 6, pp. 386-391, 1985.
- [23] Physiopedia, *Box and block test — physiopedia*, [Online; Accedido 20-Abril-2018], 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.physio-pedia.com/index.php?title=Box_and_Block_Test&oldid=180301.
- [24] Lab-Volt Ltda., *Flúidos. sensores*. Canadá: Lab-Volt Quebec Ltda., 2001, ISBN: 2-89289-503-0.
- [25] Contaval, *Tipos de sensores fotoeléctricos*, [Online; accessed 15-Enero-2018]. [En línea]. Disponible en: <http://www.contaval.es/tag/autorreflexivas-sin-supresion-de-fondo/>.

- [26] Keyence Corporation, *Fundamentos de sensores*, [Online; Accedido 19-Enero-2018]. [En línea]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/>.
- [27] Universitat Politècnica de València (UPV), *Robots en la upv*, [Online; Accedido 27-Febrero-2018], 2018. [En línea]. Disponible en: <http://robotica.webs.upv.es/es/inicio/>.
- [28] Modern Device, *Si1143 proximity sensors*, [Accedido 30 May 2018]. [En línea]. Disponible en: <https://moderndevice.com/product/si1143-proximity-sensors/>.
- [29] J. M. Lillo Fernández de Cuevas y M. d. C. Rodríguez Blas, “Estadística de gasto sanitario público 2016”, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, inf. téc., mar. de 2018.

ANEXO I. APLICACIÓN NON-TOUCH

Introducción

Durante el desarrollo de este proyecto se ha estudiado en profundidad el funcionamiento de los sensores de proximidad SI1143. El conocimiento de sus características ha generado una serie de ideas para implementar dentro del propósito final del título de este Trabajo de Fin de Grado, Aplicación de sensores de proximidad para automatización de tareas en entornos hospitalarios. En este Anexo se va a presentar la idea de desarrollar una aplicación Non-Touch que mejore la comodidad de pacientes ingresados en entornos hospitalarios, facilitando la interacción con el entorno desde la propia cama.

Caso de estudio

La estancia de un paciente en las instalaciones de un hospital o centro de salud no es una experiencia agradable a priori. Las reducidas actividades que se pueden realizar desde la cama se reducen a ver la televisión, escuchar la radio o la lectura de un libro. En estos casos es necesario el uso de un mando a distancia, manipular algún tipo de pulsador o rueda, o pasar las páginas de un libro. En muchas ocasiones, los pacientes no tienen la posibilidad de estar acompañados durante las 24 horas del día y disponer de la ayuda para utilizar estos aparatos. Además, se puede dar el caso de que el propio paciente, debido a que tiene las manos inmovilizadas por un tratamiento o a un déficit en su destreza manual, directamente no sea capaz de manipularlos.



Fig. 9.1. Habitación de hospital.

Del mismo modo, el equipamiento médico de las habitaciones de un hospital disponen de dispositivos de comunicación entre paciente y personal médico, como es el pulsador de emergencia. En la Fig. 9.1 aparecen varios de los elementos de una habitación de hospital que habitualmente se utilizan durante la estancia.

Finalmente, atendiendo de forma general al resto de instalaciones de una habitación, se puede regular la posición de la cama, encender y apagar las luces y ajustar el nivel

de las persianas. En estos casos, para instalaciones hospitalarias estándar, es necesario levantarse de la cama.

Propuesta de aplicación Non-Touch

Atendiendo a estas necesidades, se propone un dispositivo basado en el funcionamiento del sensor de proximidad SI1143, con el que se pueda navegar dentro de un menú de opciones digital sin necesidad de manipular mandos a distancia o tocar pantallas. Dicha navegación se realizaría con movimientos simples de desplazamiento de la mano por encima del dispositivo sin ningún tipo de contacto.

El dispositivo sería portátil para poder adaptarlo a la posición más cómoda para el paciente, ya sea en una posición tumbada en la cama o sentada en una silla. Para visualizar las opciones del menú se podría disponer de una pantalla con un soporte articulado, como la mostrada en la Fig. 9.2. Este tipo de pantallas cada vez están más presentes en las instalaciones de entornos hospitalarios y serían una buena opción para mostrar por pantalla las opciones por las que navegar y la información seleccionada.



Fig. 9.2. Pantalla táctil articulada instalada en una habitación de hospital.

Alguna de las aplicaciones que se podrían incluir en el menú se pueden diferenciar entre entretenimiento, comodidad y asistencia clínica:

- Entretenimiento:
 - ON/OFF de televisor. Cambio de canal. Regulación de volumen.
 - ON/OFF de radio. Cambio de emisora. Regulación de volumen.
 - Lectura de libros electrónicos. Paso de páginas. Regulación de zoom de página.
- Comodidad:
 - ON/OFF de luces de la habitación.
 - Regulación del nivel de persianas.
 - Regulación de posición de cama.

- Asistencia clínica:
 - Llamada de emergencia.
 - Acceso a horarios de consultas.

La mecánica de funcionamiento del dispositivo se basaría en el desplazamiento de la mano sobre la zona de detección del sensor, reconociendo trayectorias básicas de movimientos de izquierda a derecha y de acercamiento y alejamiento.

Posible implementación de la aplicación Non-Touch

Tal y como se ha presentado el funcionamiento del sensor en el Capítulo 3, sección Características de detección de proximidad, se pueden implementar una serie de aplicaciones aprovechando los dos tipos de análisis de detección: detección mediante flanco de entrada en el área infrarroja y distancia de detección.

Detección de desplazamiento de mano. Análisis de flancos de entrada

Mediante la detección del flanco entrada de una mano se puede conocer la trayectoria aproximada que sigue. En el caso de este sensor presenta tres flancos claros, izquierdo, derecho y superior correspondientes a cada uno de los LED de los que dispone. Como se ha comentado en el apartado Características de detección de proximidad cuando un objeto entra en la zona de detección la señal correspondiente a uno de los LED aumenta su valor antes que las demás. Este hecho puede ser aprovechado para interpretar un movimiento en una acción dentro de la aplicación. Un desplazamiento de la mano sobre el sensor, como el mostrado en la Fig. 9.3, puede interpretarse como una orden de desplazamiento en las opciones de un menú.



Fig. 9.3. Desplazamiento de mano sobre el sensor de izquierda a derecha.

En la Tabla 9.1 se muestran las posibles ordenes que se podría implementar en función flanco de entrada.

TABLA 9.1. RELACIÓN ENTRE MOVIMIENTO Y ORDEN DE EJECUCIÓN DENTRO DE LA APLICACIÓN

Movimiento de mano	Flanco activado	Orden
De izquierda a derecha	Flanco izquierdo. LED 1	Desplazar menú hacia la izquierda
De derecha a izquierda	Flanco derecho. LED 2	Desplazar menú hacia la derecha
De arriba a abajo	Flanco superior. LED 3	Seleccionar opción del menú

Detección de proximidad de la mano. Análisis de los valores reales de la señal ADC

En función de la proximidad de la mano al sensor se obtienen unos valores de la señal ADC que varían en función de la distancia. Cuanto más cerca esté la mano del sensor mayor serán estos valores. Esta variación no es lineal, pero se pueden ajustar los valores para el objetivo que se desee.

Uno de los ejemplos más sencillos de entender para representar esta idea es un sistema que regule el volumen en función de la distancia de la mano. Cuanto más alejada se encuentre la mano menor sería el volumen. A medida que esta se vaya acercando al sensor el volumen iría aumentando hasta el valor deseado. En la Fig. 9.4 se muestra este simple movimiento.



Fig. 9.4. Desplazamiento vertical de mano sobre el sensor.

Navegación por menú

La navegación por el menú debería ser lo mas visual y sencilla posible para poder ser utilizada por cualquier tipo de persona. Las instrucciones de navegación deberían quedar claras para no generar errores durante la realización de los diferentes movimientos.

La Fig. 9.5 muestra un ejemplo de implementación de este menú en el que los iconos de las opciones se ven claros y están ordenados de forma horizontal. Esta disposición está pensada para desplazarse por las distintas opciones realizando movimientos de mano de un lado a otro, simulando el movimiento de los iconos. Como se puede apreciar, se indica con una flecha el sentido de movimiento para avanzar dentro del menú. Además, sobre el icono central se muestra el sentido de movimiento para seleccionar la opción (movimiento de arriba abajo). Una vez seleccionada la opción a la que se desea entrar el usuario solo tendría que realizar este último movimiento para seleccionarla. Del mismo modo,

cada opción presentaría otra serie de ítems a seleccionar, acciones a realizar, o parámetros a manipular. Estos se gestionarían mediante la mecánica de movimientos presentada: desplazamiento de mano y proximidad de mano al sensor.



Fig. 9.5. Ejemplo de implementación de menú para la aplicación.

Propuesta de diseño del dispositivo

El dispositivo debe ser portátil, con una estructura sencilla y que no moleste al paciente. En un principio, la implementación de detección de movimientos se puede realizar mediante un único sensor. Durante el desarrollo de la aplicación sería conveniente prototipar el dispositivo tanto con uno como con dos sensores para conocer las ventajas de cada uno. Mediante el uso de dos sensores se podrían reconocer mayor número de trayectorias.

Una propuesta del primer prototipado del dispositivo se muestra en la Fig. 9.6.



Fig. 9.6. Prototipo dispositivo Non-Touch. (a) Dispositivo Non-Touch. (b) Vistas dispositivo Non-Touch.

Ejemplo de lectura de un libro digital

Para representar la mecánica del dispositivo se van a mostrar el desarrollo de navegación por menú para seleccionar la opción de lectura de un libro y la posterior lectura de este atendiendo al paso de páginas y al ajuste del zoom de la pantalla. Se muestran en los diagramas de las Fig. 9.7 y Fig. 9.8 respectivamente.

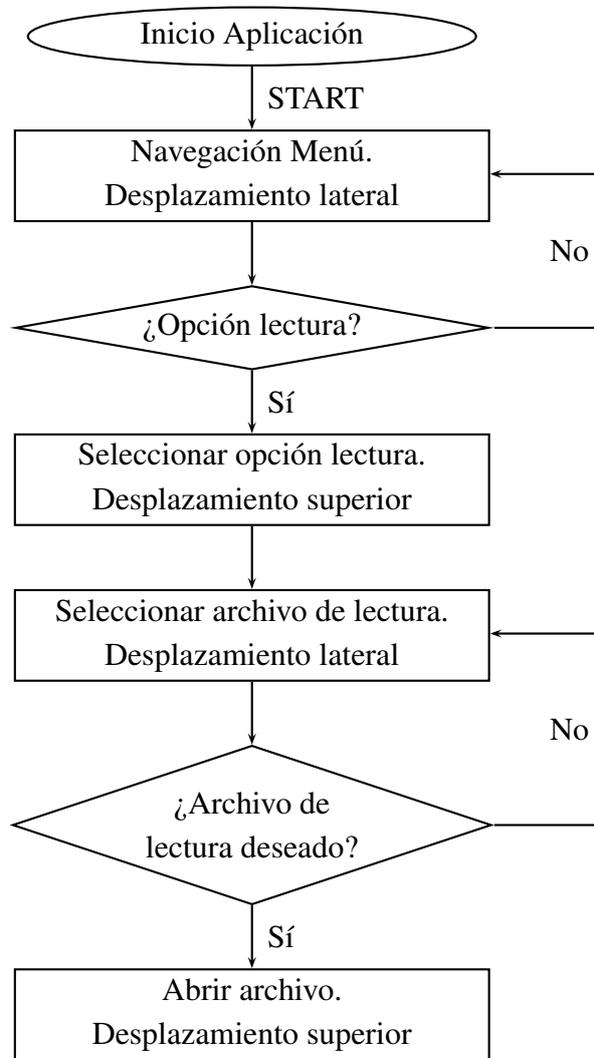


Fig. 9.7. Diagrama general del proceso de navegación por menú y selección de lectura de libro.

Una vez abierto el archivo se podrían pasar páginas simulando este mismo gesto sin necesidad de contacto alguno e incluso aumentar la imagen para una mejor lectura.

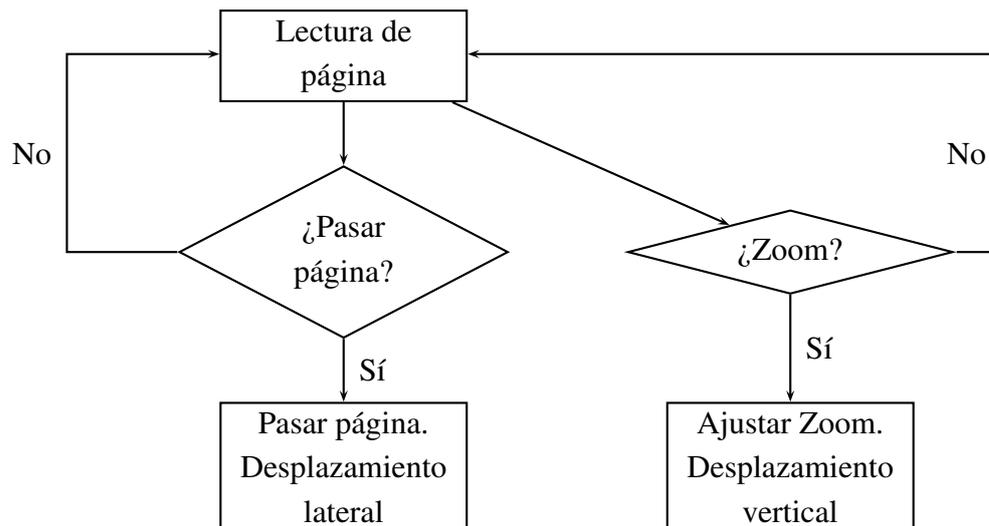


Fig. 9.8. Diagrama de lectura de libro.

Conclusiones

Adecuando este prototipo a su uso en entornos hospitalarios puede desempeñar una gran labor, facilitando la interacción de los pacientes con los elementos presentes en su entorno y dando la posibilidad de manejarlos a personas impedidas y que debido a su condición no pueden manipularlos. Además, puede emplearse como un dispositivo de llamada de emergencia. Una de las opciones que se pueden implementar es la acción de agarrar el dispositivo, haciendo que el sensor detecte presencia a muy pocos milímetros de él. En caso de que el paciente necesite ayuda y tuviera la destreza suficiente para agarrar el dispositivo realizaría de forma inmediata el aviso al personal médico. Esta opción, a primera vista, es más rápida que la búsqueda por los alrededores de la cama del pulsador de emergencia.

Por otro lado, habría que analizar las posibles complicaciones que se pudieran dar durante su funcionamiento. El hecho de ser un dispositivo para ser portable abre un abanico de posibilidades de que un objeto distinto a la mano del paciente interactúe con él. La propia sábana de la cama podría tapar el sensor y generar una falsa llamada de emergencia. Del mismo modo, si el paciente se queda dormido y posa la mano sobre el sensor se obtendría el mismo resultado erróneo.

Además, habría que analizar con determinación la población clínica que podría manejarlo, ya que un paciente que se encuentra totalmente inmovilizado o que se encuentre en un estado que no presenta apenas movilidad no serían capaces de operar con él.

Finalmente, este dispositivo puede ser una opción sencilla y de bajo coste para una aplicación Non-Touch, ya que el precio de uno de estos sensores es mucho menor a dispositivos comerciales actuales de reconocimiento de gestos por visión como son Kinect® o Leap Motion®.