

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE WEARABLE RECOLECTOR DE ENERGÍA
CORPORAL PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN
EN INTERIORES**

**Tesis para obtener el título profesional de
INGENIERO MECATRÓNICO**

AUTOR

Markyño Da'sa La Torre Lezama

ASESOR:

Laureano Serafín Rodrigo Rodríguez Polo

Lima, Abril, 2024

Informe de Similitud


Yo, **Laureano Serafín Rodrigo Rodríguez Polo**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado:

“Diseño de wearable recolector de energía corporal para la identificación y localización en interiores”

Del autor **Markyño Da’sa La Torre Lezama** dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 11%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software **Turnitin** el 21/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 10 de Enero de 2024

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Rodríguez Polo Laureano Serafín Rodrigo	
DNI: 40224529	 Firma
ORCID: 0000-0002-6686-9142	

RESUMEN

Para comparar cuánto produce un trabajador peruano en contraste con el resto del mundo, se analizó el aporte al Producto Bruto Interno que un trabajador produce por hora. Los resultados son alarmantes, por más que Perú ha gozado de uno de los crecimientos más altos en los últimos años, sin embargo, el promedio del aporte por hora trabajada es de 14 dólares. El país que lidera la región de Sudamérica es Uruguay, con 37 dólares aportados al PBI por hora trabajada. Potencias como Estados Unidos y Alemania generan 79 y 75 dólares respectivamente. Luxemburgo con 109 dólares es el país que más gana por hora trabajada, ubicándose en el puesto 1° de la lista mundial de trabajadores productivos. El año 2015 por primera vez las personas empleadas en China superaron a Perú con 12 dólares por hora de aporte. Por supuesto que este es un estudio objetivo que no toma en consideración las desigualdades económicas, tecnológicas, educativas, culturales y sociales entre cada país. Un estadounidense en Perú producirá menos que en su país por las diferencias mencionadas anteriormente, pero es el trasfondo de lo que estas diferencias significan, aquellas que impulsan a observar que el Perú tiene un problema de producción nacional de forma generalizada.

Existe entonces, una necesidad de mejorar los tiempos de productividad en las empresas peruanas. La presente tesis se enfocará un sistema que optimice la productividad en el sector industria.

Se propone un wearable integrable en un sistema de monitoreo laboral que permita la identificación y localización del personal. El diseño contempla un recolector de energía corporal, que, mediante elementos piezoeléctricos, transforma la energía cinética de una persona al caminar en energía eléctrica. Este sistema de recarga autosuficiente elimina el proceso de recarga convencional, despreocupando al usuario de que algún día se vaya a acabar la batería. El presente trabajo muestra las investigaciones preliminares para dar una solución al monitoreo laboral de forma óptima y llega hasta el diseño completo del wearable, incluyendo la mecánica, electrónica y los algoritmos de procesamiento principales. Finalmente se muestran las conclusiones, recomendaciones para una siguiente iteración y en los anexos una reflexión personal del punto de vista bajo el que se concibió el presente trabajo.

A Dios por la oportunidad de aprender y poner a las mejores personas en mi camino.

A mi papá Marco por ser mi ejemplo y norte para seguir.

A mi mamá Kory por no rendirse nunca, por enseñarme a leer y escribir.

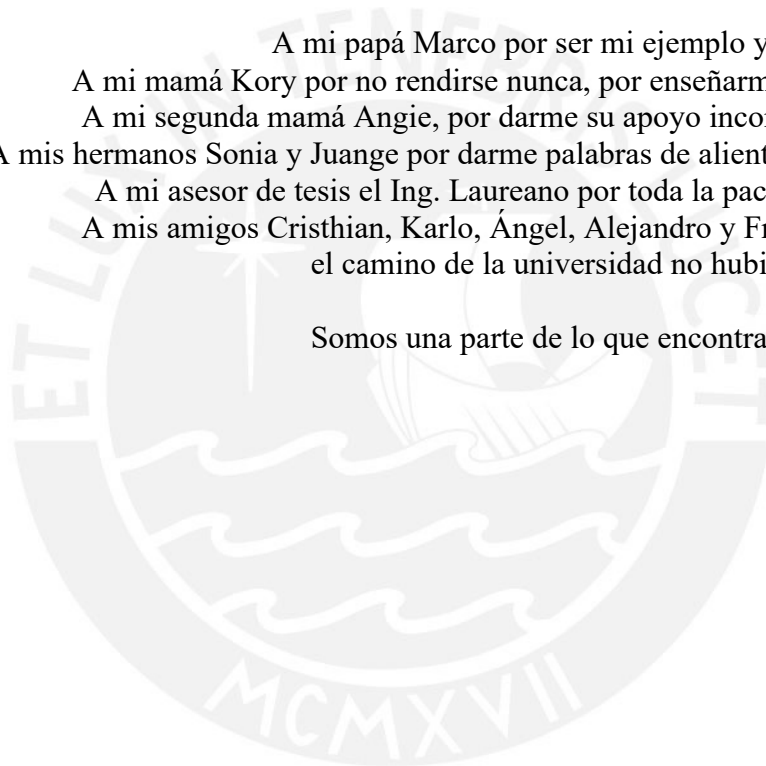
A mi segunda mamá Angie, por darme su apoyo incondicional siempre.

A mis hermanos Sonia y Juange por darme palabras de aliento cuando me caía.

A mi asesor de tesis el Ing. Laureano por toda la paciencia y sabiduría.

A mis amigos Crithian, Karlo, Ángel, Alejandro y Franco que sin ellos
el camino de la universidad no hubiera sido la misma.

Somos una parte de lo que encontramos en el camino.



ÍNDICE DE CONTENIDO

Tabla de contenido

RESUMEN	3
ÍNDICE DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
INTRODUCCIÓN	11
1 CAPÍTULO: ANTECEDENTES	12
1.1 PERÚ Y SU CONTEXTO REGIONAL	12
1.2 LA CULTURA PERUANA DE TRABAJO	15
1.3 MANIFESTACIONES DE LA BAJA PRODUCTIVIDAD	15
1.4 TECNOLOGÍAS DE MONITOREO LABORAL	16
1.5 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS	17
2 CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO	19
2.1 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE DISTANCIA	20
2.1.1 TRIANGULACIÓN	20
2.1.2 TIEMPO DE VUELO	20
2.1.3 VISIÓN POR COMPUTADORA	21
2.2 TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN	21
2.2.1 TIEMPO DE ARRIBO (TOA)	22
2.2.2 INDICADOR DE FUERZA DE LA SEÑAL RECIBIDA (RSSI)	22
2.3 CATEGORÍAS DE IDENTIFICACIÓN	23
2.4 RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	24
3 CAPÍTULO: ESTADO DEL ARTE	25
3.1 TECNOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	25
3.1.1 BASADOS EN BLUETOOTH	27
3.1.2 BASADOS EN IDENTIFICACIÓN POR RADIO FRECUENCIA (RFID)	27
3.1.3 BASADOS EN WIFI	28
3.1.4 BASADOS EN BANDA ULTRA ANCHA (UWB)	29
3.1.5 BASADOS EN ULTRASONIDO O ACÚSTICOS	29
3.1.6 BASADO EN LUZ INFRARROJA	30
3.1.7 BASADOS EN NAVEGACIÓN POR ESTIMACIÓN	31
3.2 TECNOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN	31
3.2.1 IDENTIFICACIÓN BIOMÉTRICA POR VOZ	31
3.2.2 IDENTIFICACIÓN BIOMÉTRICA POR ESCÁNER DE RETINA	32
3.2.3 IDENTIFICACIÓN BIOMÉTRICA POR HUELLA DIGITAL	33
3.2.4 SISTEMA HÍBRIDO DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN EN BASE A IMÁGENES.	34
3.3 TECNOLOGÍAS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	35
3.3.1 RECOLECCIÓN POR VIBRACIÓN	35
3.3.2 RECOLECCIÓN POR VARIACIÓN DE PRESIÓN	35
3.3.3 RECOLECCIÓN POR BIOMECÁNICA	36

4	<u>CAPÍTULO: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL</u>	37
4.1	DEFINICIÓN DE NECESIDADES	37
4.1.1	NECESIDADES DEL CLIENTE	37
4.1.2	NECESIDADES DEL USUARIO	37
4.2	LISTA DE REQUERIMIENTOS	37
4.3	ESTRUCTURA DE FUNCIONES	40
4.3.1	WEARABLE O TRANSMISOR	40
4.4	MATRIZ MORFOLÓGICA	43
4.5	CONCEPTOS SOLUCIÓN	45
4.5.1	CONCEPTO SOLUCIÓN 1	45
4.5.2	CONCEPTO SOLUCIÓN 2	48
4.5.3	CONCEPTO SOLUCIÓN 3	50
4.6	EVALUACIÓN DE LOS CONCEPTOS SOLUCIÓN	54
5	<u>CAPÍTULO: DISEÑO DEL WEARABLE TRANSMISOR DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN ALIMENTADO POR RECOLECCIÓN DE ENERGÍA</u>	57
5.1	INTEGRACIÓN DEL WEARABLE TRANSMISOR DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN ALIMENTADO POR RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	57
5.2	DISEÑO ELECTRÓNICO DEL WEARABLE	58
5.2.1	PRINCIPIO DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA	58
5.2.2	DIAGRAMA FUNCIONAL DE BLOQUES	59
5.2.3	COMPONENTES ELECTRÓNICOS	61
5.2.4	CÁLCULOS ELÉCTRICOS	63
5.2.5	ESQUEMÁTICO	70
5.3	DISEÑO MECÁNICO DEL WEARABLE	70
5.3.1	CONSIDERACIONES ERGONÓMICAS	70
5.3.2	ENSAMBLE GENERAL, VISTA EXPLOTADA Y SUB ENSAMBLES	71
5.3.3	DESPIECE	81
5.3.4	ANÁLISIS AMBIENTAL	88
5.4	DISEÑO DE SISTEMA DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN EN INTERIORES	88
5.4.1	INFRAESTRUCTURA DE SOPORTE	88
5.4.2	ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN	92
5.4.3	MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN CON ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS	94
6	<u>COSTOS</u>	100
6.1	COMPONENTES MECÁNICOS	100
6.2	COMPONENTES ELECTRÓNICOS	101
6.3	MATRICES	101
6.4	COSTO TOTAL	102
	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	103
	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	105

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA 1-1: TASA DE CRECIMIENTO DEL PBI PER CÁPITA EN %. DATOS OBTENIDOS DE THE CONFERENCE BOARD, 2021.....	12
FIGURA 1-2: APORTE AL PBI POR HORA TRABAJADA EN USD. DATOS OBTENIDOS DE THE CONFERENCE BOARD, 2021.	13
FIGURA 1-3: PRODUCTIVIDAD DE UN TRABAJADOR EXTRANJERO A COMPARACIÓN DE UN EMPLEADO EN PERÚ. DATOS OBTENIDOS DE THE CONFERENCE BOARD, 2021.	14
FIGURA 2-1: EJEMPLO DE UN SENSOR CMOS MODELO REFLECTIVE. FUENTE: KEYENSE, 2021.	20
FIGURA 2-2: EJEMPLO DE UN SENSOR REFLECTIVO MODELO DE TIEMPO DE VUELO TOF. FUENTE: KEYENSE, 2021.	20
FIGURA 2-3: EJEMPLO DE EMISIÓN Y RECEPCIÓN DE ONDA ELECTROMAGNÉTICA. FUENTE: BERKOVIC & SHAFIR, 2012.	21
FIGURA 2-4: RELACIÓN ENTRE LA BASE B, DISPARIDAD D, DISTANCIA FOCAL F Y PROFUNDIDAD Z. FUENTE: BING KANG, WEBB, LAWRENCE ZITNICK, & KANADE.	21
FIGURA 2-5: VISUALIZACIÓN DE TRILATERACIÓN DE GPS PARA LA OBTENCIÓN DE COORDENADAS. FUENTE: GISGEOGRAPHY, 2021.	22
FIGURA 2-6: VISUALIZACIÓN DE UN SISTEMA POR INDICADOR DE FUERZA DE LA SEÑAL RECIBIDA. FUENTE: CORBLEY, 2017.	23
FIGURA 3-1: FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN IPS. FUENTE: ALARIFI, Y OTROS, 2016.	26
FIGURA 3-2: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN PROXIMIDAD. FUENTE: KACZMARCZYK & BOROWICZ, 2015.	27
FIGURA 3-3: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN RFID. FUENTE: TSUBOI & UEDA, 2013.	28
FIGURA 3-4: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN WIFI. FUENTE: RODRIGUES, 2015.	28
FIGURA 3-5: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN UWB. FUENTE: KINEXON, 2017.	29
FIGURA 3-6: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN ULTRASONIDO. FUENTE: YUCEL, OZKIR, & YAZICI, 2012.	30
FIGURA 3-7: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN LUZ INFRARROJA. FUENTE: WARD, Y OTROS, 2005.	30
FIGURA 3-8: REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN NAVEGACIÓN POR ESTIMACIÓN. FUENTE: OPEN SHOE, 2021.	31
FIGURA 3-9: ESPECTOGRAMA DE UNA NOTA DE VOZ. FUENTE: ZANUY, 2008.	32
FIGURA 3-10: EJEMPLO DE UN PATRÓN DE RETINA (IZQUIERDA) E IRIS (DERECHA) ESCANEADA. FUENTE: TRADER, 2014.	32
FIGURA 3-11: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE HUELLAS POR ESCÁNER ÓPTICO. FUENTE: TRIGGS, 2021.	33
FIGURA 3-12: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE HUELLAS POR ESCÁNER CAPACITIVO. FUENTE: MAINGUET, 2021.	33
FIGURA 3-13: EJEMPLO DE DIGITALIZACIÓN DE ROSTRO PARA LA OBTENCIÓN DE PATRONES FUENTE: JAKE, 2017.	34
FIGURA 3-14: MODELO DE UN RECOLECTOR DE ENERGÍA POR VIBRACIÓN DE UN SOLO GRADO DE LIBERTAD. FUENTE: CHONGFENG & XINGJIAN, 2017.	35
FIGURA 3-15: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: CHONGFENG & XINGJIAN, 2017.	36
FIGURA 3-16: VOLTAJE DEL GENERADOR PIEZOELÉCTRICO VERSUS EL TIEMPO, DESPUES DE UN IMPACTO APLICADO AL GENERADOR. FUENTE: HARAB, 2010.	36
FIGURA 3-17: CONFIGURACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN RECOLECTOR DE ENERGÍA BIOMECÁNICO. FUENTE: DONELAN, Y OTROS, 2008.	36
FIGURA 4-1: ESBOCE DE DIAGRAMA DE COMUNICACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	41
FIGURA 4-2: ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL WEARABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	42
FIGURA 4-3: VISTA EXPLOSIÓN SUPERIOR DEL CONCEPTO SOLUCIÓN 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	46
FIGURA 4-4: VISTA EXPLOSIÓN INFERIOR DEL CONCEPTO SOLUCIÓN 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	47
FIGURA 4-5: VISTA SUPERIOR DE LA PARTE INFERIOR Y TAPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	47
FIGURA 4-6: PERSPECTIVA DEL CONCEPTO SOLUCIÓN 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 4-7: VISTA EN DETALLE DE LA CONEXIÓN DE SUJETADORES DE CELDA PELTIER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 4-8: DETALLE DE LOS SUJETADORES DE CELDA PELTIER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	50
FIGURA 4-9: ESQUEMÁTICO DE PREPARACIÓN DE UN U-TENG: FUENTE: (KUMAR MALLINENI, Y OTROS, 2017).....	51
FIGURA 4-10: VISTA EN PERSPECTIVA Y LATERAL DEL CONCEPTO SOLUCIÓN 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
FIGURA 4-11: VISTA EN PERSPECTIVA DE LA BASE INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	52
FIGURA 4-12: VISTA SUPERIOR DE LA BASE INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
FIGURA 4-13: VISTA EN PERSPECTIVA INFERIOR DE LA TAPA QUE SOSTIENE LOS RESORTES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
FIGURA 4-14: VISTA EN PERSPECTIVA DE LA TAPA PROTECTORA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
FIGURA 4-15: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
FIGURA 4-16: RADAR DE LA EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS CONCEPTOS SOLUCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
FIGURA 4-17: RADAR DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS CONCEPTOS SOLUCIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	56
FIGURA 5-1: VISTA ORTOGONAL DEL SISTEMA INTEGRADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
FIGURA 5-2: DEFORMACIÓN DE UN ELEMENTO PIEZOELÉCTRICO: FUENTE: PIEZOELEMENTS, 2021.	58

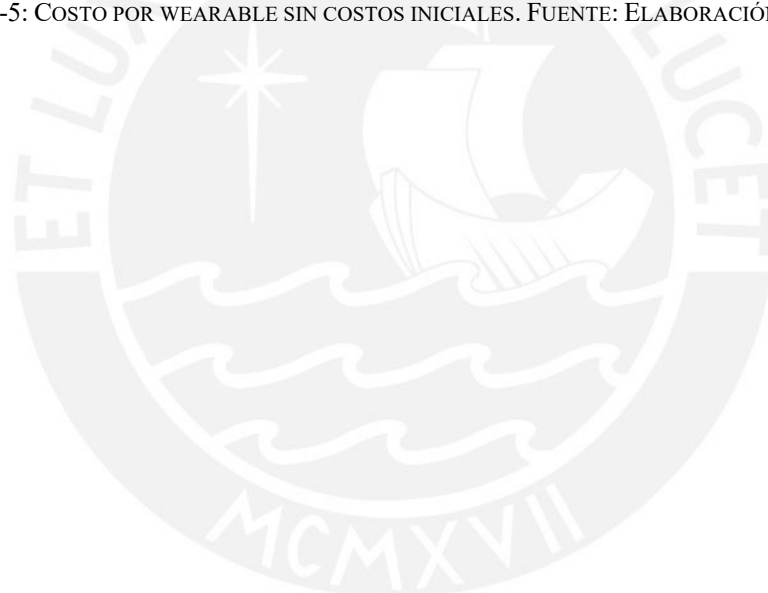
FIGURA 5-3: DISCO CERÁMICO PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: PIEZOELEMENTS, 2021.....	58
FIGURA 5-4: DIAGRAMA ELÉCTRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 5-5: CIRCUITO PROPUESTO PARA SENSAR SEÑALES PIEZOELÉCTRICAS. FUENTE: MA, GUHAO, WEITAO, MAHBUB , & WEN, 2021.	60
FIGURA 5-6: SIMULACIÓN DE UN PASO PARA EL ADC DEL MICROCONTROLADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA....	60
FIGURA 5-7: SoC nRF52832. FUENTE: NORDIC SEMICONDUCTORS.	62
FIGURA 5-8: MEDIDAS DE UN DISCO PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: PIEZOELEMENTS, 2021.....	62
FIGURA 5-9: CIRCUITO REQUERIDO POR EL REGULADOR DE VOLTAJE TPS61200. FUENTE: TEXAS INSTRUMENTS, 2021.....	63
FIGURA 5-10: REGULADOR DE VOLTAJE TPS61200: FUENTE: TEXAS INSTRUMENTS, 2021.	63
FIGURA 5-11: CIRCUITO PARA MEDIR VOLTAJE PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
FIGURA 5-12: IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO ANTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
FIGURA 5-13: GRÁFICA DE VOLTAJE GENERADO POR UN DISCO PIEZOELÉCTRICO DE 1 CM DE RADIO VS TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65
FIGURA 5-14: CIRCUITO PARA MEDIR CORRIENTE PIEZOELÉCTRICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
FIGURA 5-15: IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO ANTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	66
FIGURA 5-16: GRÁFICA DE VOLTAJE GENERADO POR UN DISCO PIEZOELÉCTRICO DE 1 CM DE RADIO CON RESISTENCIA DE 1 KOHM VS TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	66
FIGURA 5-17: GRÁFICA DE VOLTAJE GENERADO POR UN DISCO PIEZOELÉCTRICO DE 1 CM DE RADIO CON RESISTENCIA DE 100 OHM VS TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	66
FIGURA 5-18: CIRCUITO PARA MEDIR ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
FIGURA 5-19: IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO ANTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	67
FIGURA 5-20: GRÁFICA DE VOLTAJE GENERADO POR UN DISCO PIEZOELÉCTRICO DE 1 CM DE RADIO CON 10 PRESIONES A UN CAPACITOR DE 1000uF VS TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	67
FIGURA 5-21: CANTIDAD DE PASOS PROMEDIO DIARIO POR NACIONALIDAD. FUENTE: TIM, HICKS, KING, DELP, & JURE, 2017	69
FIGURA 5-22: HUESOS DEL PIE. FUENTE: ANATOMÍA TOPOGRÁFICA, 2021.....	70
FIGURA 5-23: REPARTO DE CARGAS SEGÚN LA ALTURA DEL TALÓN. FUENTE: C. ROLDÁN, 2016.....	70
FIGURA 5-24: POLÍMERO VISCOELÁSTICO SORBOTHANE. FUENTE: ISOLATE IT, 2021.....	71
FIGURA 5-25: VISTA ORTOGONAL FRONTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72
FIGURA 5-26: VISTA ORTOGONAL POSTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
FIGURA 5-27: VISTA EXPLOTADA ORTOGONAL FRONTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 5-28: VISTA EXPLOTADA ORTOGONAL POSTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	75
FIGURA 5-29: DOBLEZ DE PIEZOELÉCTRICO SIN DAÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	76
FIGURA 5-30: ENSAMBLE DE RECOLECTOR DE 1 DISCO PIEZOELÉCTRICO, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 5-31: VISTA EXPLOTADA SUPERIOR E INFERIOR DEL RECOLECTOR DE 1 DISCO PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 5-32: ENSAMBLE DE RECOLECTOR DE 2 DISCOS PIEZOELÉCTRICOS, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 5-33: ACOPLÉ ENTRE LA TAPA MEDIA DE RECOLECTOR Y EL RESORTE DE CONTACTO VARIABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 5-34: VISTA EXPLOTADA SUPERIOR E INFERIOR DEL RECOLECTOR DE 2 DISCOS PIEZOELÉCTRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 5-35: ENSAMBLE DE RECOLECTOR DE 3 DISCOS PIEZOELÉCTRICOS, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 5-36: VISTA EXPLOTADA SUPERIOR E INFERIOR DEL RECOLECTOR DE 3 DISCOS PIEZOELÉCTRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
FIGURA 5-37: VISTA ORTOGONAL SUPERIOR, INFERIOR Y LATERAL DEL PROTECTOR SUPERIOR DE PLANTILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
FIGURA 5-38: VISTA ORTOGONAL SUPERIOR E INFERIOR DE LA CARCASA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 5-39: VISTA DEL ESPACIO PARA LOS ELECTRÓNICOS Y LOS RECOLECTORES ACOPLADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 5-40: VISTA DE LA POSICIÓN PARA ACOPLAR LA ANTENA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 5-41: VISTA ORTOGONAL SUPERIOR E INFERIOR DEL SOPORTE PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ...	83
FIGURA 5-42: VISTA SUPERIOR DEL SOPORTE PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 5-43: VISTA ORTOGONAL SUPERIOR DE LA TAPA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 5-44: VISTA SUPERIOR Y ORTOGONAL INFERIOR DE LA TAPA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 5-45: POSICIÓN DE LOS TORNILLOS EN LA TAPA PRINCIPAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	84
FIGURA 5-46: SOPORTE DE RECOLECTOR DE UN DISCO, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 5-47: SOPORTE DE RECOLECTOR DE DOS DISCOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 5-48: SOPORTE DE RECOLECTOR DE TRES DISCOS, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	85
FIGURA 5-49: TAPA DE RECOLECTOR, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 5-50: DISCO PIEZOELÉCTRICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85

FIGURA 5-51: CONTACTO DEL CÁTODO, VISTA SUPERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	85
FIGURA 5-52: ANILLO PROTECTOR INICIAL, VISTA SUPERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	86
FIGURA 5-53: ANILLO PROTECTOR MEDIO, VISTA SUPERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	86
FIGURA 5-54: ANILLO TRANSMISOR DE PRESIÓN, VISTA SUPERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	86
FIGURA 5-55: RESORTE DE CONTACTO VARIABLE, VISTA ORTOGONAL SUPERIOR Y LATERAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	87
FIGURA 5-56: TAPA MEDIA RECOLECTORA, VISTA SUPERIOR E INFERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	87
FIGURA 5-57: ANTENA DEL WEARABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	87
FIGURA 5-58: FORMA DEL PCB. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	88
FIGURA 5-59: DIAGRAMA DE COMUNICACIÓN EN LA MALLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	89
FIGURA 5-60: ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL RECEPTOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	90
FIGURA 5-61: ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL LOCALIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	90
FIGURA 5-62: ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL BUS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	91
FIGURA 5-63: ESTRUCTURA DE FUNCIONES DEL NODO MAESTRO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	92
FIGURA 5-64: ESQUEMA DE LOCALIZACIÓN DE NODOS. FUENTE: PLANO EXTRAÍDO DE VIPNOTIC, 2021.	93
FIGURA 5-65: PLANTILLA CON PIEZOELÉCTRICO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
FIGURA 5-66: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA PRUEBA. FUENTE: OPTOGAIT, 2015.	94
FIGURA 5-67: PATRONES DE CAMINATA CON DISTINTAS VELOCIDADES PARA UNA MISMA PERSONA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	96
FIGURA 5-68: COMPARACIÓN ENTRE DATA INICIAL Y DATA PRE-PROCESADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	97
FIGURA 5-69: PARÁMETROS DE SIMILITUD.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	98
FIGURA 5-70: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ALGORITMIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	99



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: ENERGÍA ELÉCTRICA DISPONIBLE UTILIZABLE POR GENERADORES PIEZOELÉCTRICOS. FUENTE: (GONZÁLEZ, RUBIO, & FRANCESC, 2001)	24
ESQUEMA 3-1: CLASIFICACIÓN DE INDOOR POSITIONING SYSTEMS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ...	26
TABLA 4-1: LISTA DE EXIGENCIAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
TABLA 4-2: LISTA DE EXIGENCIAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	38
TABLA 4-3: LISTA DE EXIGENCIAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	39
TABLA 4-4: MATRÍZ MORFOLÓGICA DEL WEARABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	43
TABLA 4-5: EVALUACIÓN TÉCNICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
TABLA 4-6: EVALUACIÓN ECONÓMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	54
TABLA 5-1: REQUERIMIENTOS PARA SELECCIONAR UN MICROCONTROLADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	61
TABLA 5-2: ALTERNATIVAS DE MICROCONTROLADORES CON LOS REQUISITOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	61
TABLA 5-3: CARACTERÍSTICAS DEL NRF52832. FUENTE: NORDIC SEMICONDUCTOR.....	62
TABLA 5-4: CARACTERÍSTICAS DEL DISCO PIEZOELÉCTRICO 20T-3.6A1. FUENTE: PIEZOELEMENTS. ...	62
TABLA 5-5: CARACTERÍSTICAS DEL TPS61200. FUENTE: TEXAS INSTRUMENTS, 2021.....	63
TABLA 6-1: COSTO DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	100
TABLA 6-2: COSTO DE LOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	101
TABLA 6-3: COSTO DE LAS MATRICES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	101
TABLA 6-4: COSTOS INICIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	102
TABLA 6-5: COSTO POR WEARABLE SIN COSTOS INICIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	102



INTRODUCCIÓN

Se realizó un experimento de auto control laboral durante 13 meses por la Universidad de Columbia y Harvard (Kremer, Kaur, & Mullainathan), utilizando trabajadores de entrada de datos. Los autores determinaron que con un modelo de pago en donde eran remunerados de acorde a la cantidad de trabajo satisfactoriamente completado la mayoría bajaba su productividad al inicio del mes, pero trabajaban con más esfuerzo cuando se acercaba el día de pago. Cuando se les planteó un cambio en el contrato penalizándolos por fallar los objetivos de producción y remunerándolos por completarlos, aquellos que tenían dificultad para las entregas aceptaron inesperadamente, consiguiendo grandes ganancias para la empresa y mayor pago para ellos mismos. Como se observa, tener índices en la producción por trabajador sirve como una base para recompensas y aumentos por mérito. Sin embargo, medir la eficiencia del personal se complica cuando las tareas son de naturaleza estocástica.

La situación se complica en el Perú donde la cultura de trabajo tiene una inclinación paternalista (Kofman, 2015). La productividad es propensa a disminuir cuando la figura de autoridad no se encuentra, causando uno de los índices de productividad más bajos de Sudamérica según la base de datos de la organización internacional The Conference Board.

Acotando la problemática hacia el sector industria, se quiere optimizar la productividad proponiendo un sistema de localización e identificación del personal en tiempo real. Dicho sistema nos brinda los datos geo-analíticos para evaluar los flujos de movimiento de cada trabajador, con la finalidad de reevaluar la posición geográfica de las tareas. Así mismo, incrementa la seguridad del personal y de la empresa, dando paso a acciones de emergencia más rápidas.

Por estos motivos la presente tesis aborda el diseño de un wearable que permita identificar y conocer la posición de un trabajador en su entorno laboral, a través de la recolección de energía corporal. Estas métricas sirven como datos de entrada para la optimización de los puestos laborales y permiten el control del personal.

1 CAPÍTULO: ANTECEDENTES

1.1 Perú y su contexto regional

Para analizar las métricas de producción de un país, se divide el PBI entre las horas trabajadas por el número de la población laboralmente activa. El PBI, se refiere a Producto Bruto Interno y describe los bienes y servicios que han sido producidos por los residentes dentro de los límites económicos de un país durante un año. En esencia, mide el valor que fue creado dentro una economía y ese valor creado está ligado a la capacidad de una sociedad para producir.

Como se observa en la Figura 1-1, el Perú es uno de los países que más ha crecido en los últimos 10 años. Usando los datos del “Growth Accounting and Total Labor Productivity 2020”, estudio realizado por la organización internacional The Conference Board. Se comparó al Perú con países sudamericanos y potencias mundiales para tener un panorama de la producción laboral nacional en un contexto continental y mundial.

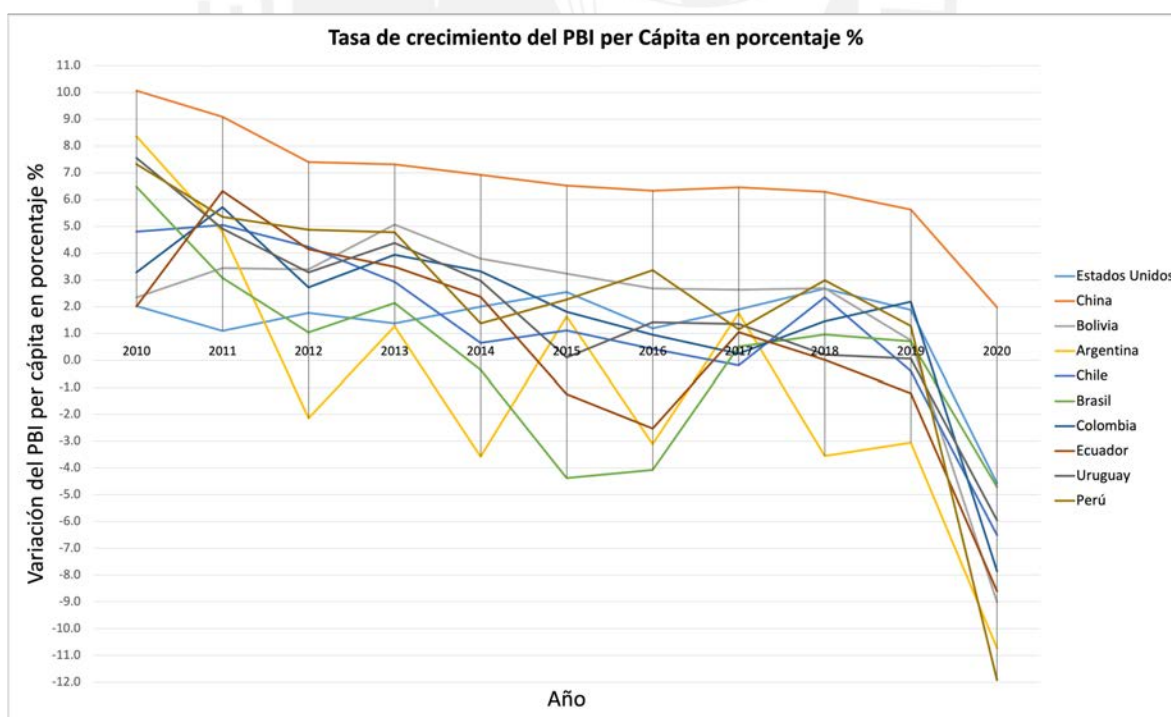


Figura 1-1: Tasa de crecimiento del PBI per cápita en %. Datos obtenidos de The Conference Board, 2020.

El Perú fue el país con la mayor tasa de crecimiento del PBI per cápita en porcentaje durante 8 años seguidos, siendo superada por Chile en 2015 y

actualmente es el país con la tasa más baja de crecimiento de todos los países analizados en la gráfica. Se observa así mismo una tendencia mundial a la desaceleración económica en Sudamérica siendo el Perú el país más afectado. Las potencias mundiales se mantienen con un crecimiento no fluctuante. En la gráfica también se visualiza que el año 2020 es un año atípico debido a la pandemia causada por el Covid-19, en donde todos los países sin excepción decrecieron su economía.

Por otro lado, se encuentran diversos modelos estadísticos que estiman la productividad de un país en base al PBI por persona empleada. Se toman en cuenta distintos factores como la población empleada en un país y las horas anuales trabajadas en promedio de acorde a su ley laboral respectiva.

Se observa en la Figura 1-2 que en 2020 un trabajador promedio de Estados Unidos agregó 79 dólares por hora trabajada. Uruguay lidera la región hispanoamericana con 37 dólares americanos aportados a su PBI por hora trabajada. Un trabajador que radica en Perú aporta en promedio 14 dólares al PBI nacional por cada hora trabajada, el monto más bajo de todos los países analizados, solo por encima de Bolivia.

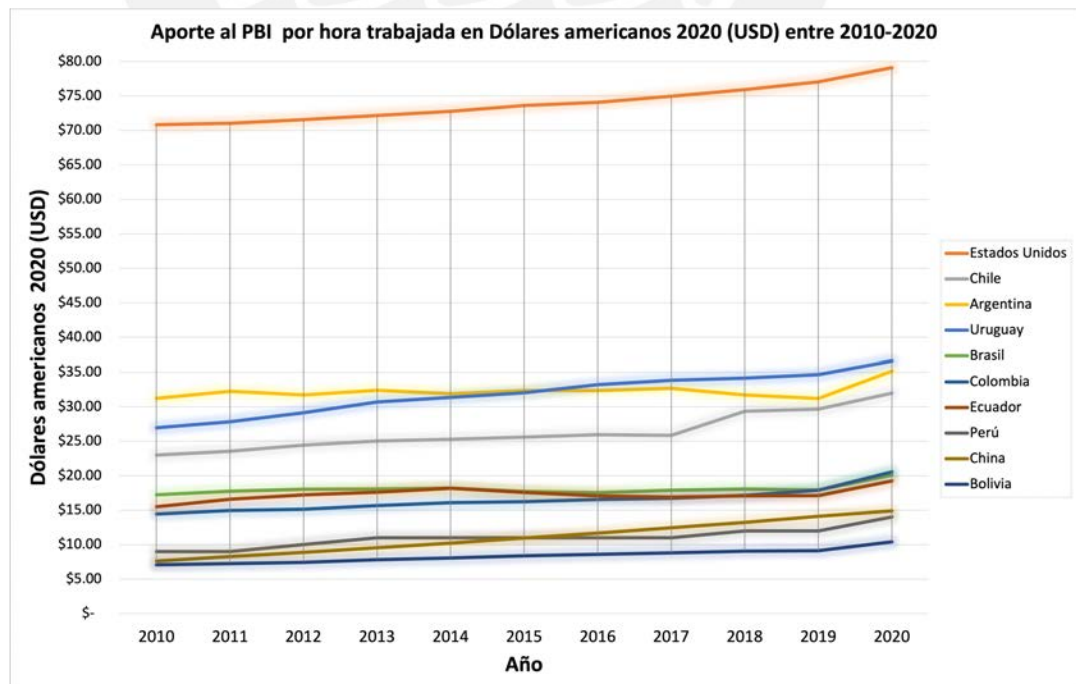


Figura 1-2: Aporte al PBI por hora trabajada en USD. Datos obtenidos de The Conference Board, 2021.

Para visualizarlo en contexto en la Figura 1-3, en 2020 un trabajador en Luxemburgo produce 7.80 veces más que el trabajador promedio en Perú. Un trabajador en Estados Unidos produce casi tanto como 6 trabajadores en Perú. Cada persona empleada en Uruguay, Chile y Argentina produce más del doble de dinero en el mismo tiempo que una persona empleada en Perú. Perú tiene el tercer aporte más bajo al PBI de la región, por encima de Paraguay y Bolivia. El año 2015 por primera vez las personas empleadas en China superaron a Perú en producción por hora.

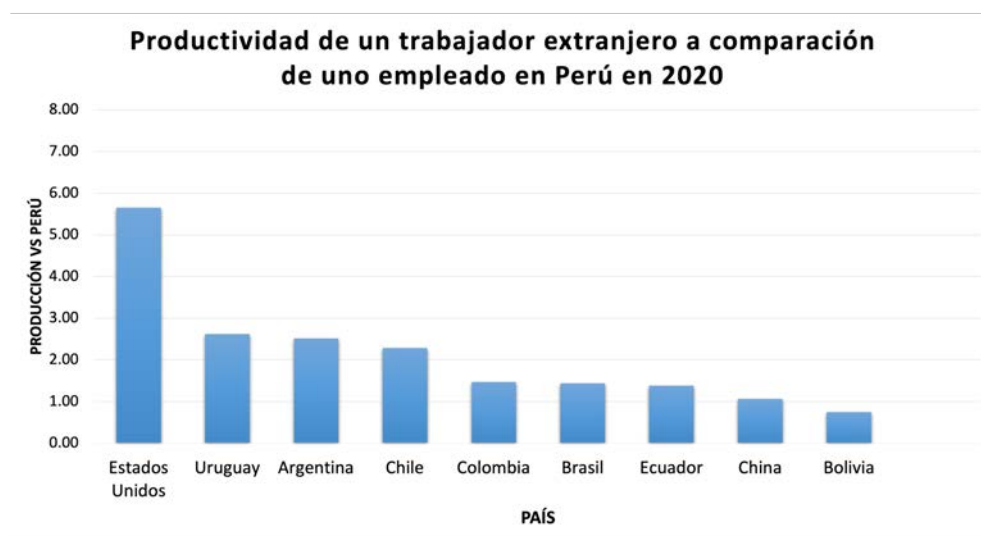


Figura 1-3: Productividad de un trabajador extranjero a comparación de un empleado en Perú. Datos obtenidos de The Conference Board, 2020.

Es una malinterpretación de datos decir que un trabajador chileno produce dos veces más que un peruano, porque el estudio no toma en consideración las nacionalidades. Lo que se evalúa es el producto bruto interno de un país por cada persona empleada en su legislación respectiva, pudiendo ser la persona empleada oriunda o extranjera.

Por otro lado, es un estudio objetivo que no toma en cuenta las desigualdades económicas, tecnológicas, educativas, culturales y sociales entre cada país. Un estadounidense en Perú producirá menos que en su país por las diferencias mencionadas anteriormente, pero es el trasfondo de lo que estas diferencias significan, aquellas que impulsan a observar que el Perú tiene un problema de producción nacional de forma generalizada.

1.2 La cultura peruana de trabajo

De acuerdo a Fred Kofman, en el Perú las empresas tienden a formarse con una cultura paternalista (Kofman, 2015). Este tipo de cultura tiene una gran desventaja, si no hay una figura de autoridad el rendimiento tiende a decrecer. Una empresa con una estructura de mando vertical tiene varios niveles de responsabilidad que burocratizan la rapidez de las decisiones tomadas por la cúpula y crean distancia entre los trabajadores con menos responsabilidades y los líderes principales. La lejanía generada provoca que los trabajadores no sientan que pueden hacer un cambio y, por lo tanto, que sólo se enfoquen en no cometer errores. Es la cultura paternalista una de las principales causas que producen que un trabajador peruano se limite solo al trabajo que le mandan hacer, habiendo excepciones, pero no de forma generalizada.

Kofman recalcó que una estructura horizontal, las decisiones se toman con métodos más participativos, los trabajadores tienden a estar más comprometidos con la visión de la empresa. Sienten que son mejor escuchados y están contribuyendo a una causa en común. Por otro lado, un trabajador comprometido tenderá a aumentar su productividad incluso cuando la persona al mando no está, debido a que se siente responsable por las operaciones de la empresa y quiere que esta sea exitosa.

Pero incluso en la autonomía se requieren otras formas de control. Un proceso administrativo, logístico o industrial con flujos de trabajo diseñados a medida no usan personal de más para una misma tarea. De acuerdo a lo observado, por la forma en que se diseñan los puestos, existen procesos en donde una persona tiene que esperar a que culmine un proceso previo para poder avanzar, creando tiempos muertos. Estos procesos acarrear horas perdidas pudiendo ser optimizados pero no hay forma de monitorearlos.

1.3 Manifestaciones de la baja productividad

Según un estudio sobre la cultura del trabajo en America Latina (Mario, Gabriel, Annalisa, & Sebastian, 2015), el problema de productividad en las empresas se manifiesta como:

- Poco compromiso del personal laboral y procrastinación.

- Altos índices de ausentismo.
- Horas extras innecesarias, provocando altos costos de producción.
- Tardanzas y suplantación de identidad en el sistema de asistencia.
- Adulteración al sistema de asistencias, posibilidad de cambiar las tardanzas posteriormente.
- Engaño al sistema de asistencia, un usuario sujeto al sistema de asistencia biométrico está sujeto al control cuando ingresa y cuando sale, mas no durante las actividades laborales.

Estos problemas de productividad en la empresa se pueden solucionar con mejores tecnologías de monitoreo laboral.

1.4 Tecnologías de monitoreo laboral

A continuación, se presentará un caso del uso de tecnología para poder medir la productividad laboral.

Amazon.com recibió patentes para una pulsera que recolecta información de la posición y movimientos de cada trabajador en sus almacenes (United States Patent and Trademark Office, 2018), vibrando estratégicamente para guiar sus acciones. Esta pulsera también reduce el tiempo necesario para preparar nuevos empleados, ya que el dispositivo los guía durante su actividad laboral.

Dentro de las tecnologías de monitoreo, encontramos a los nearables. Estos son dispositivos electrónicos que emiten señales acerca de su locación, movimiento y temperatura. Sirven para añadir una capa de inteligencia contextual entre locales estáticos como tiendas, museos, aeropuertos y los usuarios presentes que portan el nearable. Usualmente estos gadgets incluyen sensores como acelerómetro, termómetro, monitoreo de frecuencia cardíaca.

Un wearable, es un término utilizado en inglés para un dispositivo tecnológico que se usa como parte de la vestimenta de un usuario. La presente tesis plantea un wearable proyectado para ser de uso masivo, por lo tanto, requiere ser económico para que empresas e instituciones lo consideren. La integración del sistema no debe requerir de cambios

estructurales en los inmuebles y debe ser portable. El wearable debe ser eficientemente energético para que dure más de una jornada laboral de 8 horas. Uno de los factores más relevantes es que no sea invasivo, el diseño debe evitar utilizar componentes visibles exteriormente. Por último, el dispositivo tiene que enviar información inalámbricamente de la identificación y localización en tiempo real.

El wearable servirá para obtener métricas que optimicen el estudio de la productividad laboral. Ayudará al diseño de los puestos, con los datos se podrá tener un análisis del flujo de trabajo para identificar los tiempos muertos y las tareas repetitivas. Se podrá identificar a las personas y esta posibilidad será útil incluso en casos de emergencia cuando se requiere saber qué personas se han quedado dentro de una instalación y en qué habitación se encuentran. Se definen a este tipo de dispositivos como tecnologías de monitoreo laboral, siendo su uso un buen primer paso para las firmas que buscan maximizar su productividad.

1.5 Objetivo general y específicos

El objetivo del presente trabajo consiste en diseñar un wearable que permita la identificación constante de una persona y la transmisión de su posición utilizando únicamente la energía corporal del usuario.

Objetivos específicos:

- Analizar la problemática para fundamentar la relevancia del sistema.
- Analizar el estado del arte y los métodos contemporáneos para la transmisión de posición e identificación.
- Implementar en el diseño un sistema de recolección de energía para mayor autonomía.
- Definir los requerimientos obligatorios y deseados del sistema con todas las consideraciones mencionadas en el objetivo general.
- Obtener tres conceptos solución como base para obtener una solución final de acuerdo con el balance técnico-económico siguiendo la norma VDI 2221 y las normas técnicas vigentes.

- Plantear el sistema en base a cálculos, flujos de trabajo y estrategias de control preestablecidos.
- Diseñar el proyecto definitivo con planos eléctricos, mecánicos y análisis económico, se probarán las partes sensibles del sistema con una implementación real.
- Determinar los costos estimados para la fabricación de la solución a proponer.



2 CAPÍTULO: MARCO TEÓRICO

Localizar es el proceso en donde personas, equipos y otros objetos se reducen a un punto en el espacio y pueden ser mapeados. La localización se clasifica de dos formas, dependiendo del contexto en donde se desea posicionar: localización en interiores y localización en exteriores. Cada uno de estas categorías requieren tecnologías distintas porque, por ejemplo, el Sistema de Posicionamiento Global o GPS es una tecnología eficiente para localización en exteriores, pero las ondas de radio con las que trabaja carecen de intensidad para penetrar paredes de edificios. La medición de distancia es una de las técnicas más utilizadas para localizar. Desde ultrasonidos, visión por computadora, campo electromagnético, los medios cambian, pero las técnicas no. El enfoque estará delimitado por aquellas técnicas que sean compatibles con las redes de sensores inalámbricas o por sus siglas en inglés WSN. Los WSN se refieren a un grupo de sensores estratégicamente ubicados que monitorean y graban fenómenos que suceden dentro de la red. Se fijan técnicas inalámbricas de monitoreo por el enfoque de obtener métricas en tiempo real de una persona en movimiento.

Se mencionará también las técnicas de identificación más comunes. Estos métodos se encuentran en la rama de tecnología de "Identificación automática y captura de datos" o (AIDC por sus siglas en inglés). Son métodos que colectan información del objeto de estudio, para compararlos con una base de datos previamente establecida y confirmar si tienen los mismos atributos. Algunas de las tecnologías caen en la categoría de AIDC son: Identificación biométrica (huella digital), cintas magnéticas (seguridad en centros comerciales o libros de biblioteca), reconocimiento óptico de caracteres, identificación por RFID, reconocimiento de voz y código de barras. Se delimita los métodos investigados a tecnologías que permitan la identificación itinerante de las personas, dejando de lado las que requieren mucha infraestructura o complejidad para ser funcionales.

Por último, el presente capítulo cerrará con las técnicas más comunes de recolección de energía corporal (energy harvesting) debido a que el wearable va a contemplar un sistema para obtener el 100% de su energía del usuario.

2.1 Técnicas de medición de distancia

En este apartado se observa las técnicas de medición que tienen un rango de funcionamiento mayor a los 5 metros.

2.1.1 Triangulación

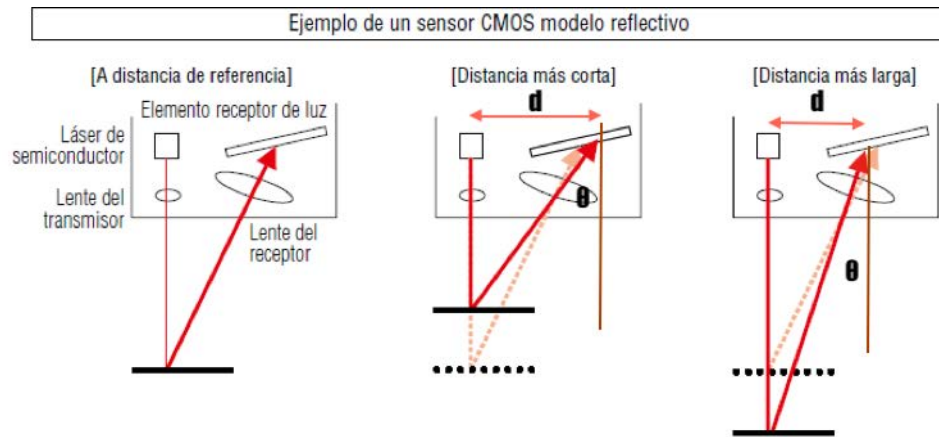


Figura 2-1: Ejemplo de un sensor CMOS modelo reflectivo. Fuente: Keyense, 2021.

En el lente del transmisor y el receptor forman un ángulo recto. Cuando el haz de luz rebota en el objeto, se mide el ángulo (θ) y la distancia entre el láser y el punto de rebote al elemento receptor de luz (d). Con estos dos datos se determina:

$$\text{distancia al Objeto} = \frac{\text{distancia EmisorReceptor}}{\tan \theta}$$

2.1.2 Tiempo de vuelo

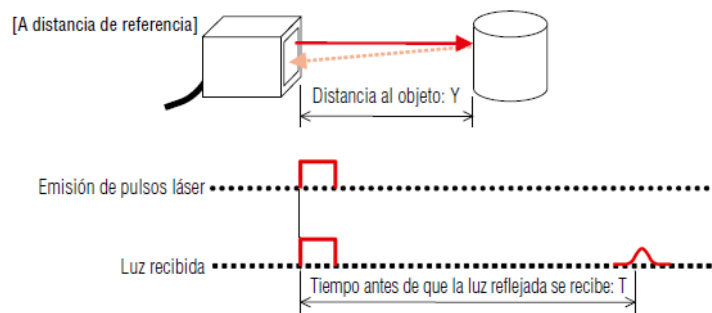


Figura 2-2: Ejemplo de un sensor reflectivo modelo de tiempo de vuelo TOF. Fuente: Keyense, 2021.

El sensor mide el tiempo T que ha transcurrido desde que la señal salió del sensor, rebotó en la superficie del objeto analizado y regresó. La fórmula para el láser es de la siguiente manera:

$$\text{distancia al Objeto} = \frac{\text{Velocidad de la luz} \times \text{Tiempo transcurrido}}{2}$$

Bajo el mismo concepto la distancia se mide con ondas electromagnéticas si se conoce el tiempo transcurrido, la intensidad y su desfase.

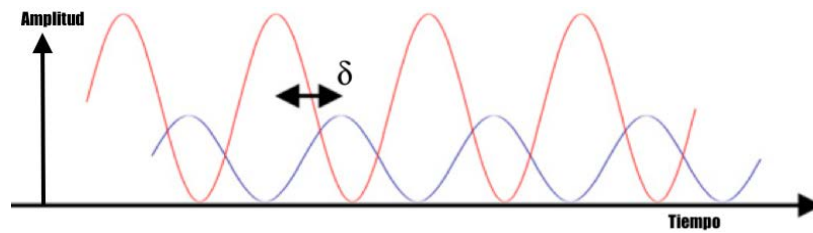


Figura 2-3: Ejemplo de emisión y recepción de onda electromagnética. Fuente: Berkovic & Shafir, 2012.

2.1.3 Visión por computadora

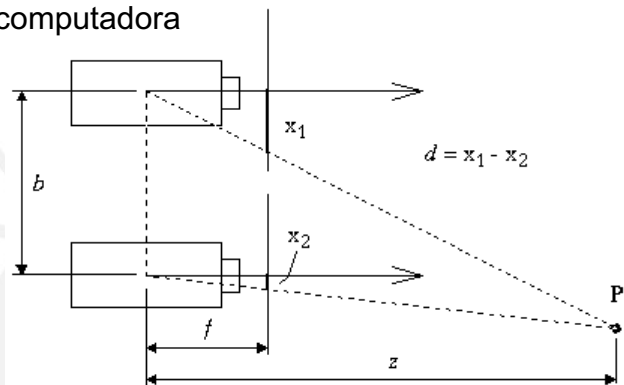


Figura 2-4: Relación entre la base b , disparidad d , distancia focal f y profundidad z . Fuente: Bing Kang, Webb, Lawrence Zitnick, & Kanade.

La estereoscopia es un proceso por el cual dos fotos del mismo objeto tomadas con un ángulo ligeramente distinto son vistas en simultáneo, creando la impresión de profundidad. En esta disposición de elementos con dos cámaras colocadas en paralelo se calcula la profundidad del punto P con las siguientes ecuaciones (Bing Kang, Webb, Lawrence Zitnick, & Kanade):

$$d = x_1 - x_2$$

$$P = \frac{f \times b}{d}$$

2.2 Técnicas de localización

Existen dos categorías en donde la tecnología actual adquiere sus principios para obtener las coordenadas de un punto sin importar si éste está en movimiento.

2.2.1 Tiempo de Arribo (ToA)

Es la técnica que combina el método de tiempo de vuelo explicado anteriormente y la trilateración. La trilateración se utiliza para determinar locaciones absolutas o relativas midiendo la distancia entre los puntos emisores de la señal y el receptor. La diferencia entre trilateración y triangulación es que el primero mide distancias y el segundo mide ángulos.

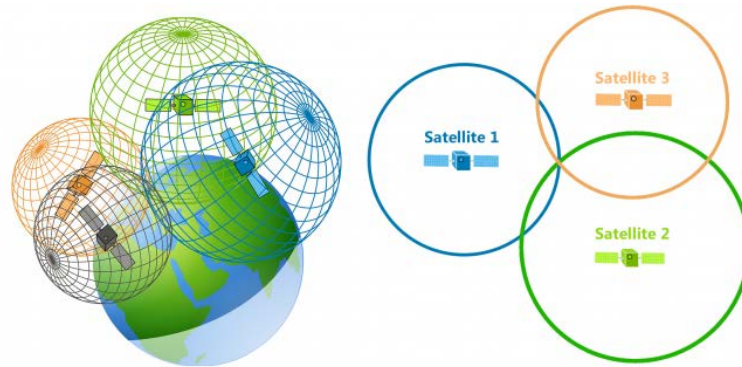


Figura 2-5: Visualización de trilateración de GPS para la obtención de coordenadas. Fuente: GISGeography, 2021.

Como se puede observar de la Figura 2-5, con el primer satélite midiendo la distancia, se delimita que el punto observado se encuentra en el radio del satélite 1. Cuando un segundo satélite recibe la distancia del punto a localizar se delimita la posición del punto a la intersección entre los radios R_1 y R_2 . Finalmente, cuando entra un tercer satélite, se obtiene la posición relativa del punto exacto con respecto a los satélites.

Los GPS actuales utilizan la técnica ToA. Miden la velocidad y el tiempo de viaje de las ondas de radio entre el nodo estático y los no localizados para estimar la posición del nodo desconocido. Los resultados son altamente confiables, sin embargo, requiere de mucho poder computacional.

2.2.2 Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI)

O RSSI por sus siglas en inglés, la distancia entre el receptor y transmisor es estimada midiendo fuerza de la señal en el receptor. Cuando la distancia entre ambos incrementa, el poder de la señal disminuye.

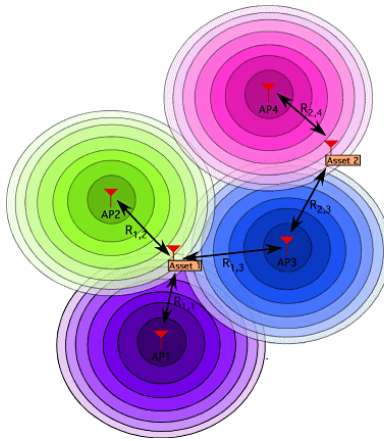


Figura 2-6: Visualización de un sistema por indicador de fuerza de la señal recibida. Fuente: Corbley, 2017.

Para medir la distancia se utiliza un derivado de la ecuación de transmisión de Friss.

$$P_R = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\lambda)^2 d^2}$$

Donde:

Pt = poder de transmisión.

Gt = Ganancia de la antena transmisora.

Gr = Ganancia de la antena receptora.

λ = longitud de onda del transmisor en metros.

d = la distancia en metros.

Con la distancia, a través de la trilateración se obtienen la posición exacta de un punto relativo en el espacio. La principal diferencia entre TOA y RSSI es que el primero necesita dos periodos de tiempo para generar un diferencial y estimar la locación. Por otro lado, RSSI lo calcula con parámetros predefinidos sin necesidad del tiempo.

2.3 Categorías de identificación

En el presente apartado se presentan los 3 tipos de categorías de identificación para personas.

Por posesión: La autenticación lo permite algo que el usuario tiene. Por ejemplo: llaves, tarjetas RFID, pulseras, tickets. Esta categoría tiene la seguridad más baja por su naturaleza intercambiable.

Por conocimiento: La autenticación se produce con información que el usuario sabe. Por ejemplo: contraseñas, preguntas de seguridad.

Por rasgo inherente o biométrico: La autenticación evalúa una característica innata del usuario. Por ejemplo, escáner de retina, reconocimiento de voz, reconocimiento facial, escáner de huella digital. Esta

categoría es la más segura, pero se recomienda que un proceso delicado lleve por lo menos dos de estas categorías para garantizar una identificación fuerte.

2.4 Recolección de energía

El movimiento de una persona está caracterizado por tener movimientos de larga amplitud y bajas frecuencias. Estudios han demostrado que una persona de 68kg con una velocidad de 2 pasos/segundo genera una potencia máxima de 67 W (T.Starner, 1996). Sin embargo, si se toma en consideración la pérdida de energía en durante los movimientos esta disminuye considerablemente.

Tabla 2-1: Energía eléctrica disponible utilizable por generadores piezoeléctricos. Fuente: (González, Rubio, & Francesc, 2001)

Actividad	Pérdidas de energía mecánica	Eficiencia electro mecánica	Pérdidas de energía eléctrica	Consumo por actividad diaria	Poder eléctrico disponible
Respirar	10	11.2	10	100	74.8 mW
Caminar	75	50	10	16.6	1.265 W

Según un artículo científico publicado por Gonzáles, Rubio y Francesc (González, Rubio, & Francesc, 2001), se determinó que la energía aprovechable por un wearable diariamente mientras una persona camina es de 1.265 W. El objetivo del wearable propuesto es recolectar la mayor cantidad de esta energía y transmitir la identificación y posición del usuario sin necesidad de cargarlo.

3 CAPÍTULO: ESTADO DEL ARTE

Por lo detallado en el marco teórico, las tres funciones principales del presente sistema mecatrónico serán posicionar, identificar y recolectar energía en tiempo real. Se evaluará el estado del arte de las tecnologías de localización en interiores. Asimismo, se mostrarán las distintas categorías de identificación para ser utilizados en un wearable. Si una persona lleva puesto un nodo que permite la localización e identificación se intuye que el sistema cuenta con un microcontrolador necesario para el procesamiento de las señales y un sistema de alimentación energética, siendo este último importante en su eficiencia energética para que el sistema dure varias horas. Por último, se evaluarán los sistemas de recolección de energía actuales que se usarán para alimentar todo el sistema.

3.1 Tecnología de localización en interiores

Se conocen a los sistemas de localización en interiores como IPS (Indoor Positioning System) y determinan la posición de un objeto continuamente en tiempo real. Utilizan distintos medios como luz, ondas de radio, campos electromagnéticos, señales acústicas, radares, para localizar objetos o personas dentro de un edificio. Todos estos sistemas varían en precisión, costo, tecnología, escalabilidad y eficiencia energética. Existen 5 métricas que determinan la calidad de un IPS: “(1) La precisión y exactitud del sistema; (2) el área cubierta y su resolución; (3) la latencia para actualizar las posiciones; (4) impacto en la infraestructura del inmueble; y (5) el efecto de errores aleatorios en el sistema causados por interferencia de señales.” (Alarifi, y otros, 2016) En los siguientes párrafos se cubrirá 5 de las tecnologías más usadas en este campo.

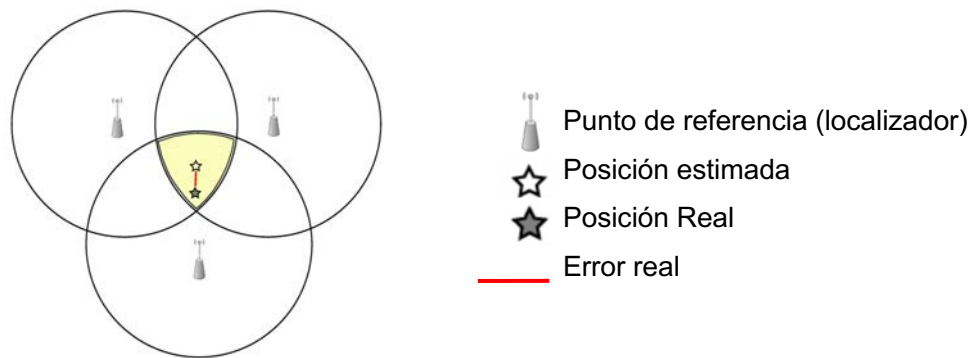
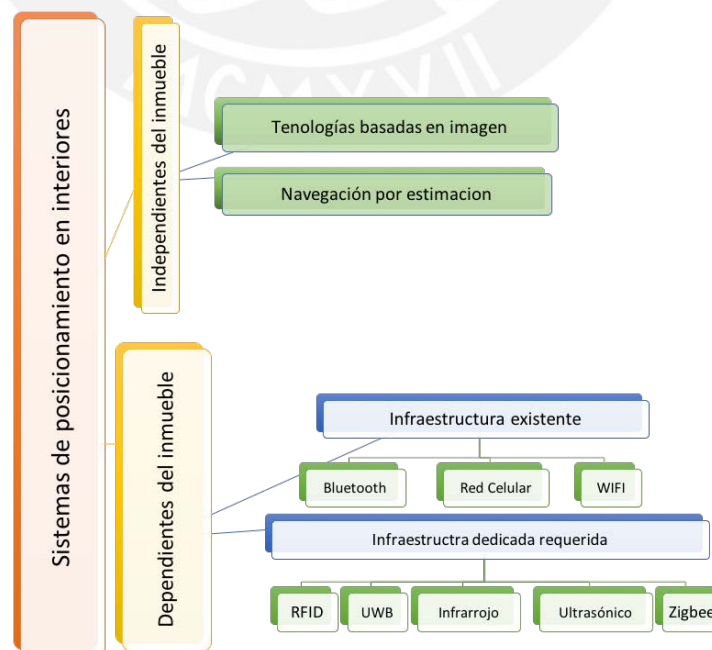


Figura 3-1: Funcionamiento básico de un IPS. Fuente: Alarifi, y otros, 2016.

Dentro de las tecnologías de IPS, como se observa en el esquema 3.1 los sistemas caen en dos categorías dependiendo de la infraestructura que los soporta: dependientes del inmueble e independientes de inmueble. La primera se refiere a sistemas que dependen de una tecnología existente dentro del edificio o del mapa de su estructura. Esta categoría contiene dos subcategorías, los sistemas IPS que requieren de infraestructura dedicada o IPS que dependen de la infraestructura existente del inmueble. La necesidad para obtener infraestructura dedicada se determina por la naturaleza del edificio. Por ejemplo, la mayoría de los edificios tienen Wifi, pero pocos tienen identificación de radiofrecuencia. Por otro lado, los sistemas independientes del inmueble no requieren dispositivos especiales dispersos por todos los ambientes. Por ejemplo, un sistema de navegación por estima con unidades de movimiento inercial podría utilizar un algoritmo para saber su posición en todo momento conociendo la aceleración y dirección de movimiento.



Esquema 3-1: Clasificación de Indoor Positioning Systems. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Basados en Bluetooth

Este sistema triangula la posición de una persona dentro de un ambiente con beacons. Un beacon es un transmisor o receptor bluetooth de baja energía (BLE). Análogamente se entiende al beacon transmisor como un faro que transmite repetidamente una sola señal, que los demás beacons receptores captan una vez que el beacon transmisor entra a su rango de alcance. Una desventaja es su corto alcance de 30-50 metros con línea de vista ininterrumpida por paredes u objetos contundentes. Sin embargo, la mayor ventaja está en su bajo costo y eficiente consumo energético. Este sistema utiliza el método de localización por RSSI.

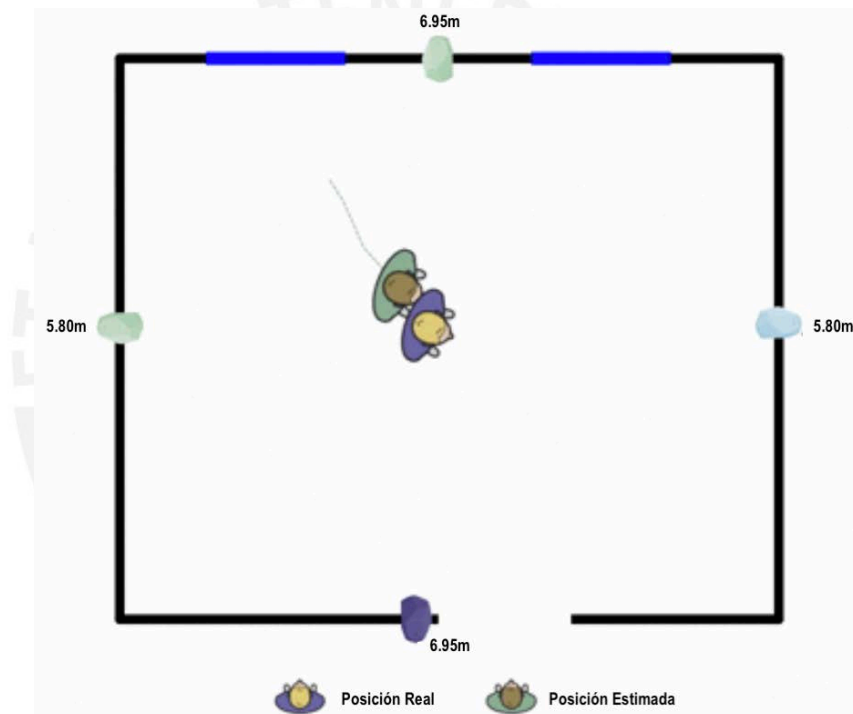


Figura 3-2: Representación de un Sistema basado en proximidad. Fuente: Kaczmarczyk & Borowicz, 2015.

3.1.2 Basados en Identificación por Radio Frecuencia (RFID)

Los sistemas de radio frecuencia utilizan ondas de radio para identificar a una persona. Consiste en intercambiar diferentes señales de radio entre dos componentes principales, los emisores y los tags. Los tags reciben ondas de radio de los emisores y transforman la onda en energía que utilizan para reenviar una señal de vuelta. Funcionan parecido al sistema descrito anteriormente por que ambos son basados en proximidad, cambiando únicamente el medio por el que se transmiten las señales.

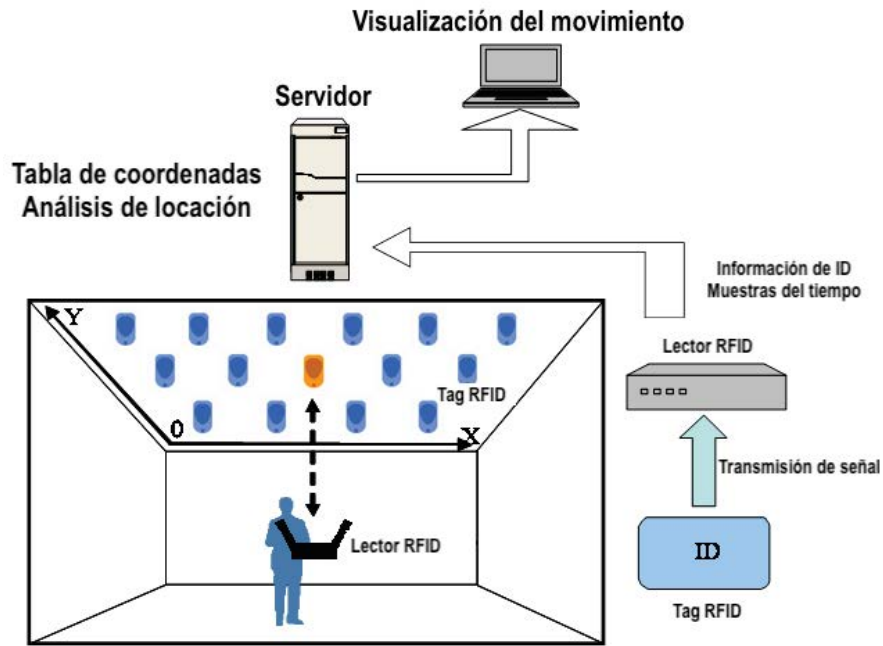


Figura 3-3: Representación de un sistema basado en RFID. Fuente: Tsuboi & Ueda, 2013.

3.1.3 Basados en Wifi

En este sistema las personas portan tags transmisores que mandan paquetes de información a los puntos de acceso Wifi. Estos puntos de acceso reportan el tiempo y la intensidad de la señal durante la lectura a un algoritmo de backend que entrega como output la ubicación, enviándolo a la nube. Este sistema tiene un error estimado de 3 a 5 metros y para alcanzar este nivel de precisión se necesita como mínimo 3 routers Wifi para descomponer la señal de cada tag. Los routers y tags son regularmente costosos y menos eficientes en el consumo de energía que sus alternativas. Este sistema combina los métodos de localización por ToA y RSSI.

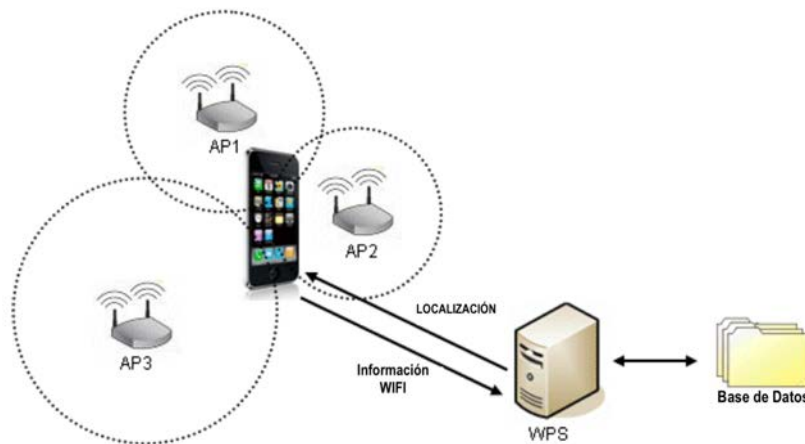


Figura 3-4: Representación de un sistema basado en WIFI. Fuente: Rodrigues, 2015.

3.1.4 Basados en Banda Ultra Ancha (UWB)

Consiste en transmisores con una señal de pulso en el espectro de los Ghz. Debido a la alta frecuencia y la banda ancha, su precisión es la más alta entre los sistemas de localización. Sin embargo, los dispositivos UWB son los más costosos de su categoría. Este sistema utiliza el método de localización por ToA.



Figura 3-5: Representación de un sistema basado en UWB. Fuente: KINEXON, 2017.

3.1.5 Basados en ultrasonido o acústicos

Los sistemas basados en ultrasonidos funcionan con el método ToA y RSSI. Un tag emite el sonido en un rango ultrasónico, rango imperceptible para el oído humano. Los receptores en el ambiente captan estos sonidos y localizan la posición del punto en el que provino. La ventaja más grande de usar el sonido es que cuando el sonido rebota en un obstáculo se genera un fenómeno llamado multitrayecto. Estimar los sonidos que vienen de un trayecto directo o multitrayecto depende de la velocidad del sonido dividido entre el ancho de banda, dando como consecuencia resultados más precisos (Ray, 2018). Estos sistemas pueden funcionar tan bien como los UWB, pero el costo depende de tu situación actual. Si se está haciendo una construcción desde el principio, hacer las conexiones en todos los ambientes para el sistema sonar no va a ser tan costoso, pero si se planea colocar este sistema en un edificio existente la instalación puede ser costosa. Sin embargo, los tags que emiten el sonido son asequibles.

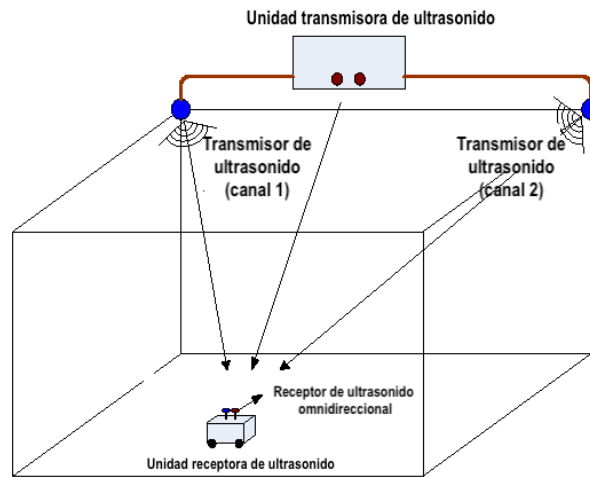


Figura 3-6: Representación de un sistema basado en ultrasonido. Fuente: Yucel, Ozkir, & Yazici, 2012.

3.1.6 Basado en Luz Infrarroja

Los sistemas infrarrojos utilizan pulsos de luz infrarroja como los que se encuentran en los controles remotos para localizar señales dentro de un edificio. Los módulos receptores tienen que ser instalados en todos los ambientes del edificio y cuando un tag IR emita la señal, aquel receptor que se encuentre más cercano y sin obstáculos en la línea de visión captará la localización. Este sistema localiza la posición a un nivel de habitación y no un nivel de metros, por lo que garantiza que no habrá falsos positivos ni interferencia ya que cada tag tiene una trama de información única la cual es enviada periódicamente. Si bien los tags y lectores son económicos y energéticamente eficientes, la mayor desventaja es que todos los cuartos necesitan el lector infrarrojo instalado en el techo. Ocurre la misma situación que los sistemas basados en ultrasonidos, cuando el edificio es nuevo, la instalación es sencilla, pero cuando se coloca el sistema a inmuebles existentes los costos aumentan.

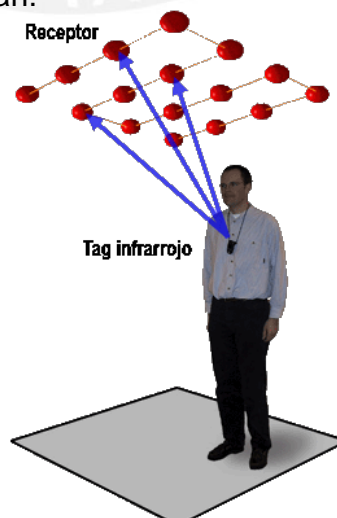


Figura 3-7: Representación de un sistema basado en luz infrarroja. Fuente: Ward, y otros, 2005.

3.1.7 Basados en navegación por estimación

Este sistema utiliza sistemas micro electromecánicos (MEMS) de movimiento inercial, como acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para calcular la posición relativa de un dispositivo en el espacio. Debe tener definido un sistema de referencia para empezar a hacer las estimaciones. Este sistema es uno de los más complejos debido al drift que tiene la tecnología de movimiento inercial actual. El error acumulativo (drift) que adquieren los sensores en el tiempo y provocan falsas coordenadas de localización. Por este motivo el sistema de navegación por estimación (dead reckoning) requiere de ayudas externas para mejorar su precisión y contener errores.

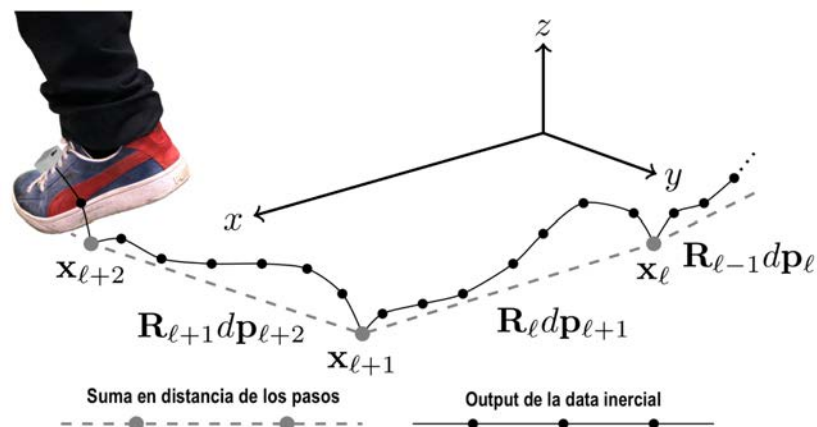


Figura 3-8: Representación de un sistema basado en navegación por estimación. Fuente: Open Shoe, 2021.

3.2 Tecnología de identificación

3.2.1 Identificación biométrica por voz

La identificación por voz consiste en procesar las vibraciones que se producen al hablar a través de un convertor analógico a digital. Una vez obtenido el espectrograma normalizado, se extrae la frecuencia para comparar con una base de frecuencias pre definidas. Este tipo de identificación se combina con una clave para obtener mejores garantías de autenticación. Sin embargo, una desventaja de este sistema es que requiere de mucho poder computacional.

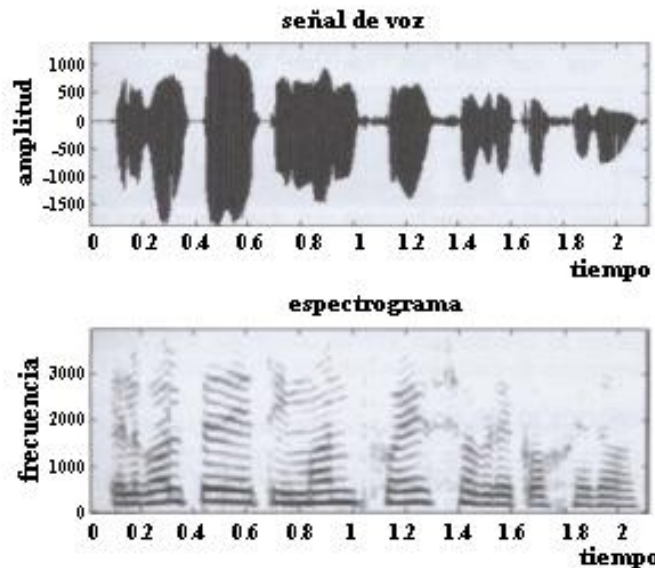


Figura 3-9: Espectrograma de una nota de voz. Fuente: Zanuy, 2008.

3.2.2 Identificación Biométrica por Escáner de Retina

La retina consta de capas celulares sensibles a la luz que ayudan al ojo a transformar la data visual en señales eléctricas para enviarlas por el nervio óptico hasta el cerebro. Estas capas contienen un patrón de vasos capilares que sirven como una marca única de identidad. Los componentes principales de un escáner de retina son, un láser infrarrojo, un lente y un espejo escáner tipo MEMS. Cabe resaltar que el escáner de retina no mide el color del iris por que son dos procesos de identificación distintos. Para el escáner de iris se usa una cámara de alta resolución que compara el patrón de colores en los ojos con una base de datos pre establecida. La ventaja de este método es su seguridad debido a que el sujeto de estudio tiene que estar prestando atención para validar la autenticación. Sin embargo, este método requiere de mucha inversión, se utiliza para procesos delicados que requieren una fiabilidad excesiva y la precisión del resultado puede ser afectada por alguna enfermedad que afecte los vasos capilares.

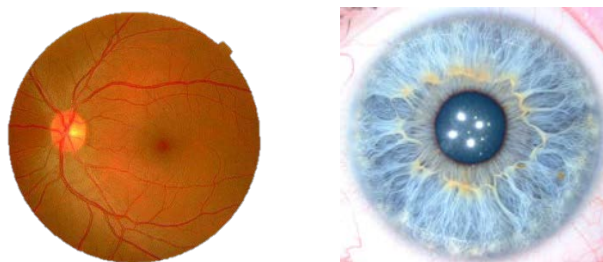


Figura 3-10: Ejemplo de un patrón de retina (izquierda) e iris (derecha) escaneada. Fuente: Trader, 2014.

3.2.3 Identificación Biométrica por Huella Digital

Esta es la forma más común de identificación y consiste en una digitalización fina del relieve de las huellas digitales para realizar una autenticación. Incorporarlos es la tendencia actual en los dispositivos de consumo masivo que tienen data sensible como celulares o laptops. Su precio se ha vuelto mucho más asequible y existen distintos métodos para obtener el relieve.

- Escáner óptico:

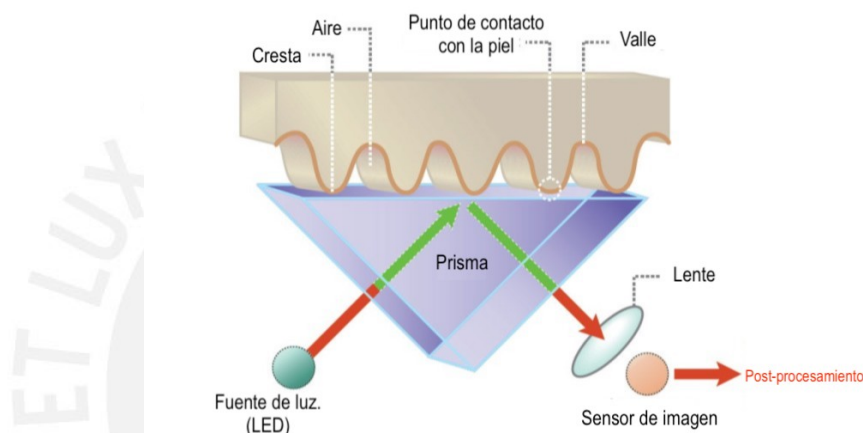


Figura 3-11: Sistema de adquisición de huellas por escáner óptico. Fuente: Triggs, 2021.

Fue el primer método creado para capturar los patrones de las huellas digitales, consiste en emitir luz sobre un lado del prisma y del lado contrario colocar un sensor de imagen que pueda captar los patrones únicos de las huellas como las crestas; puntos en contacto con la piel y los valles o partes del dedo que no tocan el prisma.

- Escáner capacitivo:

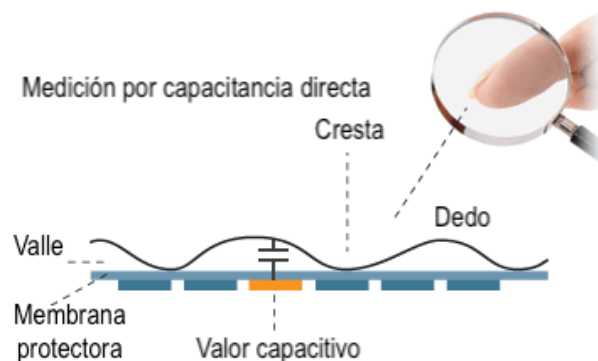


Figura 3-12: Sistema de adquisición de huellas por escáner capacitivo. Fuente: Mainguet, 2021.

Este escáner cuenta de una matriz de sensores capacitivos que distinguen entre las crestas y los valles de las huellas. La precisión depende de la resolución del sensor, que al mismo tiempo depende del tamaño de la matriz con la que adquiere los datos. Son fiables y es actualmente la tecnología en boga que utilizan los celulares para desbloquearse. La ventaja principal es que son robustos, económicos y requieren de poco espacio para implementarse.

Estas tecnologías requieren de una medición temporal pero cuando se trata de medición permanente pocas tecnologías permiten este tipo de control sin distraer al usuario ni presentarse de forma invasiva.

3.2.4 Sistema híbrido de localización e identificación en base a imágenes.

Los sistemas basados en imagen cumplen los dos propósitos deseados al mismo tiempo. Utilizan cámaras y visión por computadora para determinar la locación en tiempo real. Se utilizan distintos tipos de cámaras como las normales de vigilancia con luz infrarrojo, las cámaras omnidireccionales y las tridimensionales. La diferencia está en la cantidad de información que se puede extraer de ellas. Su éxito está determinado por los algoritmos de backend y la capacidad de procesamiento. Este sistema necesita de fuerte inversión para obtener cámaras con alta resolución que permitan el reconocimiento, sin embargo, no solamente sirve para el propósito de localización si no también de seguridad.



Figura 3-13: Ejemplo de digitalización de rostro para la obtención de patrones Fuente: Jake, 2017.

3.3 Tecnologías de recolección de energía

En esta sección se mostrarán algunas de las tecnologías de recolección más modernas.

3.3.1 Recolección por vibración

Este tipo de tecnología utiliza sistemas micro electromecánicos para transformar las vibraciones en energía eléctrica. Idealmente están modelados como un imán móvil dentro de una bobina de cobre. El movimiento crea un campo electromagnético y una corriente que es posteriormente aprovechada por un circuito de almacenamiento de energía.

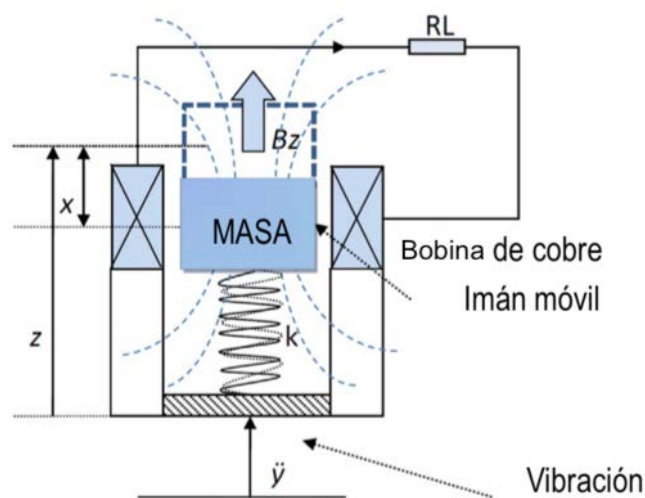


Figura 3-14: Modelo de un recolector de energía por vibración de un solo grado de libertad. Fuente: Chongfeng & Xingjian, 2017.

3.3.2 Recolección por variación de presión

A través de placas piezoeléctricas se transforma la variación de presión en energía. Si se aplica la presión entre las caras de un generador piezoeléctrico, el voltaje aumenta como lo muestra la Figura 3-16. Actualmente este es uno de los métodos más conocidos y simples de fabricar.

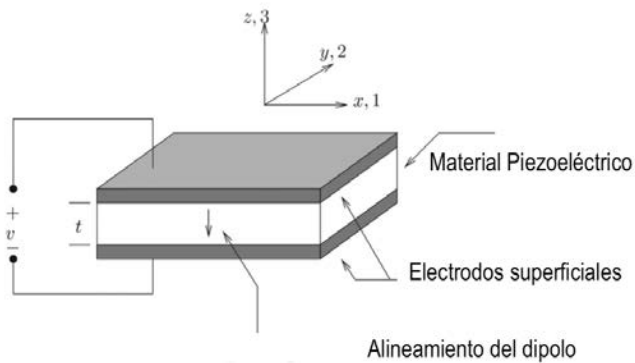


Figura 3-15: Diagrama esquemático de un transductor piezoeléctrico. Fuente: Chongfeng & Xingjian, 2017.

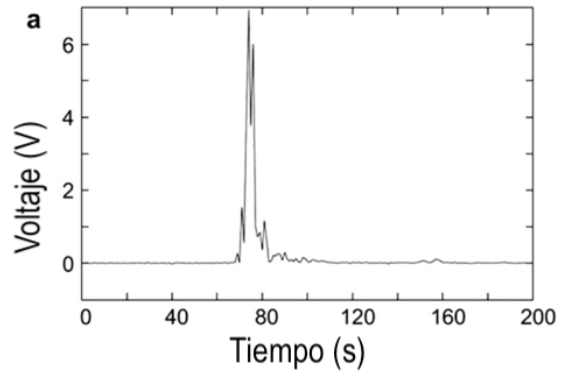


Figura 3-16: Voltaje del generador piezoeléctrico versus el tiempo, después de un impacto aplicado al generador. Fuente: Harab, 2010.

3.3.3 Recolección por biomecánica

Este recolector de energía biomecánico funciona asistiendo al músculo durante el trabajo negativo. La energía es generada cuando la persona frena, ayudando a disminuir el desgaste físico y generando en promedio 10 veces más energía que un recolector piezoeléctrico. En la Figura 3-17 se observa en la sección A, cómo el sistema se acopla a las piernas. La sección B muestra los componentes internos del dispositivo que transmite el movimiento hacia el generador. Finalmente, la sección C se muestran los componentes internos del generador de electricidad.

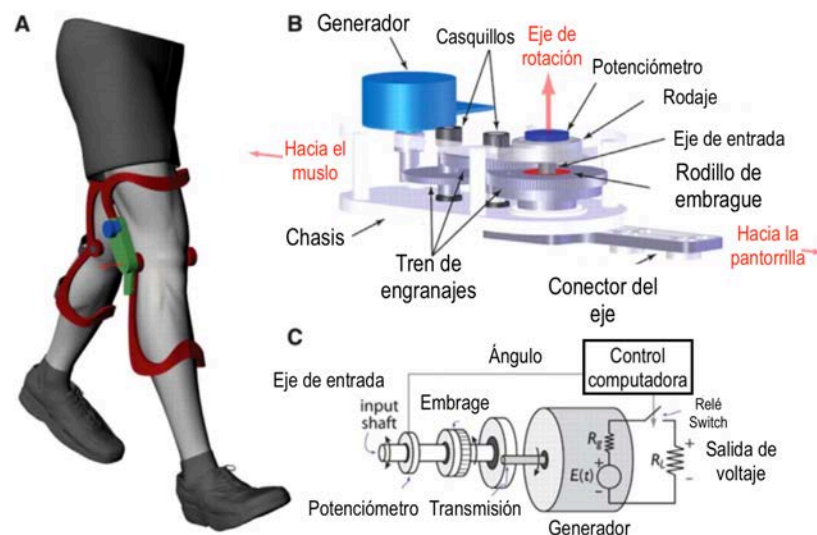


Figura 3-17: Configuración esquemática de un recolector de energía biomecánico. Fuente: Donelan, y otros, 2008.

4 CAPÍTULO: REQUERIMIENTOS Y DISEÑO CONCEPTUAL

Los requerimientos se determinan por las necesidades de los clientes y usuarios a los cuales va dirigido el presente wearable. Se define como **cliente** a toda empresa o institución que quiera tener mejor control sobre los tiempos de productividad en sus trabajadores, el sistema está dirigido a plantas de producción y a oficinas. Se delimita al **usuario** del wearable como el trabajador que tenga un espacio de trabajo limitado geográficamente.

4.1 Definición de necesidades

4.1.1 Necesidades del cliente

- Identificar a sus trabajadores en tiempo real.
- Transmitir la ubicación.
- El sistema entregue estadísticas por grupo.
- El sistema entregue reportes por trabajador.

4.1.2 Necesidades del usuario

- Sea discreto.
- No distraiga.
- De gran autonomía.
- Sea confortable y fácil de llevar.

4.2 Lista de requerimientos

Tabla 4-1: Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág. 1 de 3
		Revisión 5
PROYECTO	DISEÑO DE WEARABLE RECOLECTOR DE ENERGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	Última revisión: 02/05/2021
		Revisado: Laureano Rodríguez
CLIENTE	PUCP – Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Elaborado: 02/05/2021
Fecha de cambios	E (exigencia) D (detallado)	Descripción
	E	FUNCIÓN PRINCIPAL <ul style="list-style-type: none"> • Transmitir la ubicación geográfica y temporal de un usuario cumpliendo con el artículo 14 de la Ley 29733.
03/02/2021	D	GEOMETRÍA <ul style="list-style-type: none"> • Carcasa: Ancho < 80 mm Alto < 120 mm Espesor < 20 mm
	E	CINEMÁTICA <ul style="list-style-type: none"> • Estructura no móvil
	E	FUERZAS <ul style="list-style-type: none"> • Peso total < 0.2 newton

Tabla 4-2: Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág. 2 de 3
		Revisión 5
PROYECTO	DISEÑO DE WEARABLE RECOLECTOR DE ENERGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	
		Última revisión: 02/05/2021
		Revisado: Laureano Rodríguez
CLIENTE	PUCP – Facultad de Ingeniería Mecatrónica	
		Elaborado: 02/05/2021
Fecha de cambios	E (exigencia) D (detallado)	Descripción
1/02/2021 1/02/2021	E E E E E	ENERGÍA <ul style="list-style-type: none"> Recolectar la energía (energy harvesting) para la alimentación Desactivación de energía cuando no hay movimiento Temperatura máxima de disipación < 45°C Consumo de corriente < 10 mAh promedio Independiente al 100% de otras fuentes de energía.
17/02/2021	E E	SEÑALES <ul style="list-style-type: none"> Entrada: Señal para autenticar Salida: Señal de la posición Señal con resultado de la autenticación ID del dispositivo
	E D E E	ERGONOMÍA <ul style="list-style-type: none"> El ítem debe ser compatible con las prendas. Ej.: muñeca, bolsillo, talón del pie. No debe ser invasivo Confortable No debe llamar la atención del usuario ni de personas externas
	E D E	MATERIALES <ul style="list-style-type: none"> Material hipo alergénico para la carcasa y demás componentes que estén en contacto con la piel Resistente al polvo y agua: Clasificado como IP67 bajo el estándar IEC 60529 Placa del circuito: Fibra de vidrio epóxica doble cara
	E E	MONITOREO <ul style="list-style-type: none"> Transmitir la posición cada 5 segundos cuando se encuentra en movimiento Verificar cada 10 minutos datos de identificación
	E D E	SEGURIDAD <ul style="list-style-type: none"> Encriptación del ID y data procesada. Antiexplosivo (Según la norma ATEX 2014/34/EU) Los componentes electrónicos estar fijos en la carcasa
	D	PRODUCCIÓN <ul style="list-style-type: none"> Considerar procesos de producción de bajo coste.
	E	TRANSPORTE <ul style="list-style-type: none"> Fácil de transportar
20/01/2021	E D	AMBIENTAL <ul style="list-style-type: none"> Tener un plan para cumplir con la norma técnica peruana NTP 900.064 Contemplar consideraciones ambientales en el diseño para causar el menor impacto ambiental posible.

Tabla 4-3: Lista de exigencias. Fuente: Elaboración propia.

LISTA DE EXIGENCIAS		Pág. 3 de 3
		Revisión 5
PROYECTO	DISEÑO DE WEARABLE RECOLECTOR DE ENERGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN EN INTERIORES	Última revisión: 02/05/2021
		Revisado: Laureano Rodríguez
CLIENTE	PUCP – Facultad de Ingeniería Mecatrónica	Elaborado: 02/05/2021
Fecha de cambios	E (exigencia) D (detallado)	Descripción
	E E E E	OPERACIÓN <ul style="list-style-type: none"> • Ruido < 10dB (ruido promedio de una pisada) • Diseño exterior robusto para uso diario • Funcionamiento en condiciones climáticas de 0-60°C • El sistema de transmisión debe ser resistente al ruido electromagnético e interferencias
	E E	MANTENIMIENTO <ul style="list-style-type: none"> • Vida útil > 1 año • Intervalo de servicio > 1 año
	E	COMUNICACIONES <ul style="list-style-type: none"> • Comunicación inalámbrica de transmisión de datos
	E	LEGAL El sistema cumple con las exigencias legales de acorde al artículo 14 de la Ley 29733.
	D	ENSAMBLAJE <ul style="list-style-type: none"> • Instalación no requiera cambios estructurales en los inmuebles
25/01/2021	E	COSTOS <ul style="list-style-type: none"> • Costo total < 30 dólares americanos

4.3 Estructura de funciones

Se arma la estructura de funciones en la Figura 4-2 de acorde a los requerimientos establecidos. Se identificaron subdominios de mecánica, energía, control, sensores, seguridad y comunicación que cumplen funciones específicas para soportar el funcionamiento del sistema.

4.3.1 Wearable o transmisor

Es el dispositivo que portará el usuario y autentificará la identificación reconociendo patrones característicos del mismo. Se delimita la obtención de la localización a través de la trilateración de señales por RSSI.

Mecánica: El wearable debe contar con una estructura robusta para soportar el uso diario del mismo. Un requerimiento principal es que la energía sea generada por el portador y se pueda almacenar esa energía en una batería, por ese motivo la mecánica del wearable debe aprovechar la energía corporal del usuario para transmitirla fácilmente a los sistemas de recolección (energy harvesting). El diseño debe considerar un lugar de alojamiento de la antena y un material que no interfiera con la señal.

Energía: Analizando distintos métodos se determinará la mejor manera de transformar la energía corporal en energía eléctrica. Posteriormente esa energía eléctrica tendrá que ser acondicionada para cargar un elemento que almacene la energía. Con el elemento cargado a cierto porcentaje se necesitará regular el voltaje para alimentar al sensor de identificación y microcontrolador. Se determinará el sistema de alimentación más compacto.

Control: Este subdominio contempla un microcontrolador energéticamente eficiente para correr la algoritmia del wearable. A través de un sensor se adquirirá una señal de identificación, esta señal se guardará en un historial y se comparará la señal presente con el historial guardado para identificar datos anómalos. Es importante señalar que este sistema de identificación tiene que ser adaptativo. Se encapsularán estos datos juntos con el ID único del transmisor para ser encriptados y transmitidos

inalámbicamente. Cada transmisión será intermitente para optimizar el rendimiento de la batería.

Sensores: Se adquirirá una señal que permita la identificación de la persona, esta señal podrá ser obtenida de sensores físicos o incluso de las mismas señales autogeneradas en el sistema.

Seguridad: Se analizarán métodos que no requieran mucho poder computacional para encriptar los datos encapsulados.

Comunicación: Por requerimiento la transmisión de datos del wearable tiene que ser inalámbrico y tiene que consumir poca energía.

Por el concepto de trilateración un dispositivo no podría reconocer su posición absoluta sin puntos de referencia fijos en un espacio, por lo que se intuye que se necesitará el wearable y otros componentes que permitan la localización. Para obtener la posición absoluta en un espacio geográfico se requieren 3 puntos de referencia y el wearable tiene que enviar información a esos puntos receptores. Un esboce de la estructura de comunicaciones se vería así:

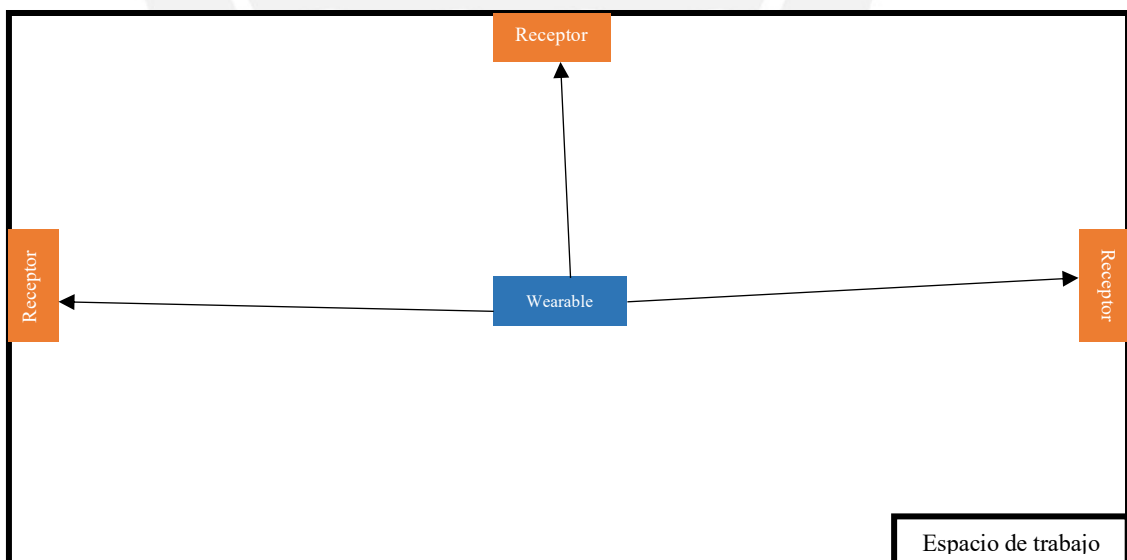


Figura 4-1: Esboce de diagrama de comunicaciones. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el presente trabajo se enfocará en el desarrollo del dispositivo que portarán los usuarios, cuya estructura de funciones se contempla a continuación.

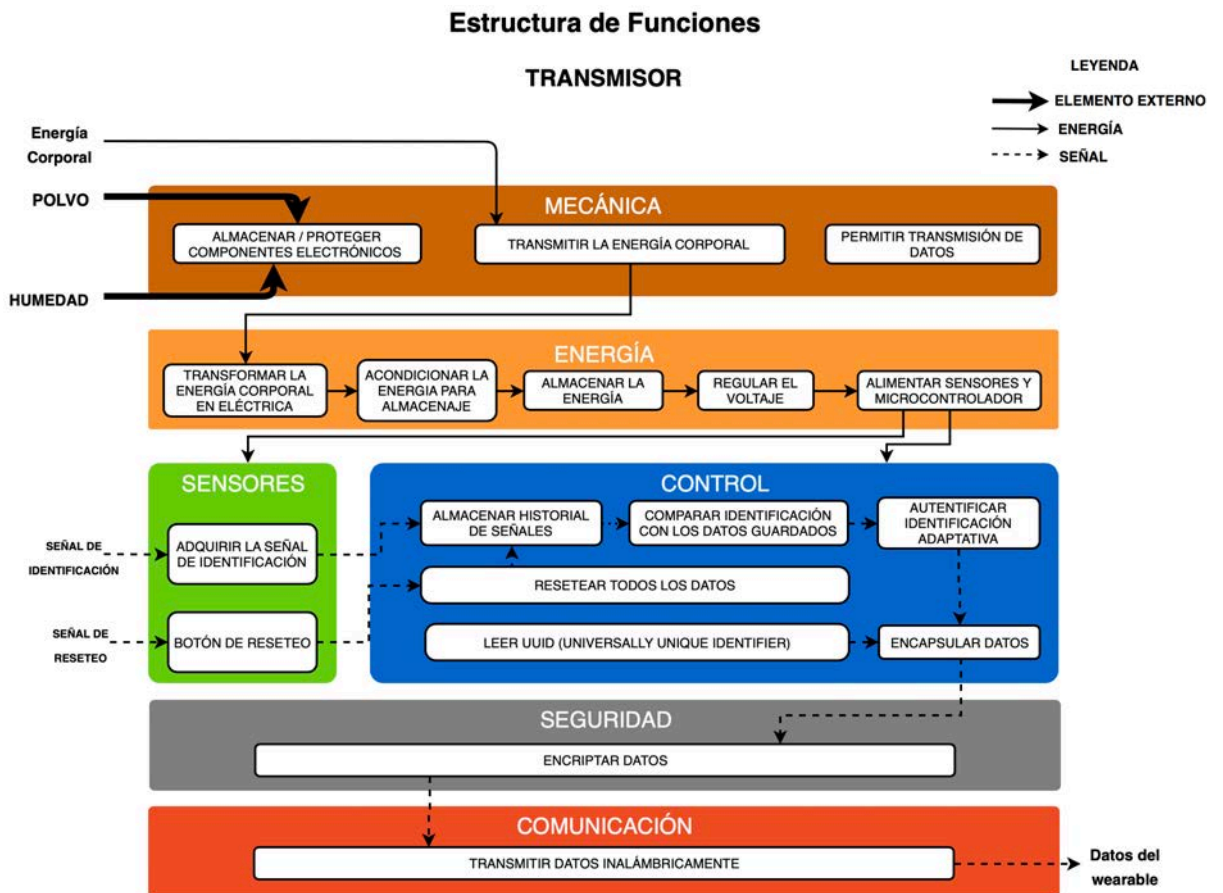






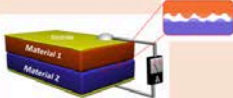









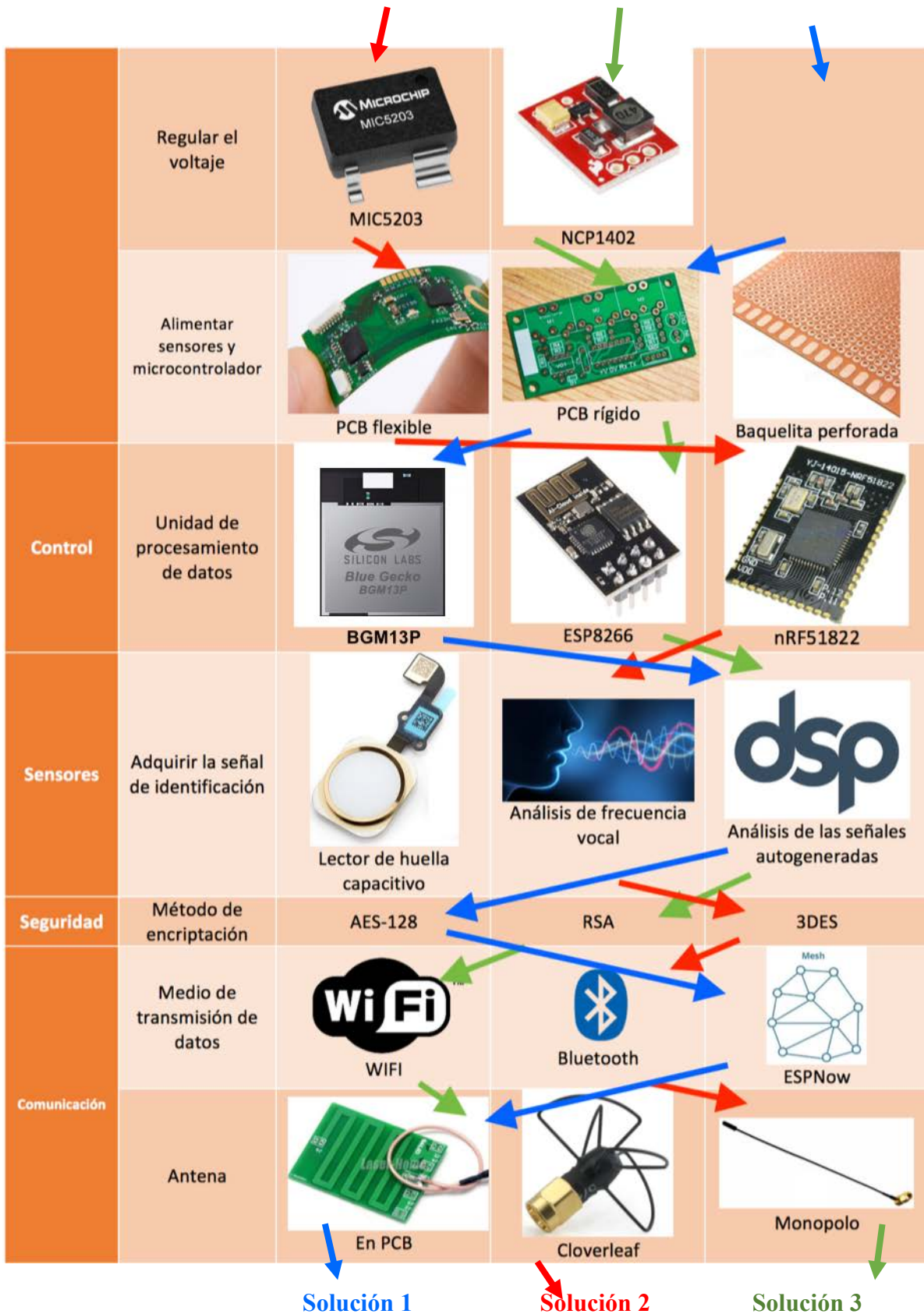
Figura 4-2: Estructura de funciones del wearable. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Matriz morfológica

Se procede con el análisis de los componentes que cumplen las funciones del sistema. La única función que no se está evaluando con alternativas es la de permitir transmisión de datos, debido a que ese requerimiento debe estar embebido en diseño de la carcasa del sistema. Se seleccionarán 3 conceptos solución.

Tabla 4-4: Matriz Morfológica del wearable. Fuente: Elaboración Propia.

Subcategoría	Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Mecánica	Almacenar/ proteger componentes electrónicos	 Plástico	 Acrílico	 Silicona
	Transmitir la energía corporal	 Resortes	 Plástico Flexible	
Energía	Transformar la energía corporal en eléctrica	 Generador termoelectrico	 Generador triboelectrico	 Generador piezoelectrico
	Acondicionar la energía para almacenaje	 TPS61200	 LTC3108-1	 LTC3588 + piezoelectrico
	Almacenar energía	 Super capacitor	 Bateria Li-ion	 Bateria de Li-Po



4.5 Conceptos solución

En este apartado se determinan 3 conceptos solución a partir de la matriz morfológica presentada y se evalúan de acuerdo a un análisis técnico económico para determinar la solución óptima.

4.5.1 Concepto solución 1

El primer concepto solución tiene carcasa de silicona, pero una estructura interior rígida para mantener los electrónicos en su lugar. Lo que transmite la energía corporal es el plástico flexible de la misma silicona y la energía corporal se transformará en eléctrica a través de generadores piezoeléctricos que generan energía cada vez que existe presión en ellos. Este wearable será una plantilla para aprovechar la presión que generan los pies en la planta al caminar.

El acondicionamiento de la energía para el almacenaje será realizado por un TPS61200. Este módulo se especializa en regular el voltaje de una recolección de energía por generadores piezoeléctricos. Tiene una salida seleccionable de 1.8V, 2.5V, 3.3V y 3.6V, suficiente para cargar un súper capacitor. En este concepto se eligió el súper capacitor debido a su atributo principal de soportar varios ciclos de recarga. Se recolectará la energía de cada paso hasta que se almacene la energía suficiente para que el microcontrolador transmita una señal; sin embargo, si se almacena más energía (debido al usuario corriendo o trotando), se transmitirá la señal intermitentemente hasta que el súper capacitor se descargue.

La energía almacenada en el súper capacitor se regulará a 1.8V a través de este TPS61200 hacia el microcontrolador nRF51822 de Nordic Semiconductors. Se eligió esta opción como microcontrolador principal por su consumo en el rango de los microamperios. Esta ventaja nos permite tener activado al microcontrolador por más tiempo.

Para autenticar la identificación de quién está portando el wearable se analizarán las señales autogeneradas por el sistema de alimentación. Cada vez que un usuario pisa, una cantidad determinada de energía entrará al súper capacitor. Ese patrón será almacenado en el tiempo para obtener un modelo, de forma que, si una persona distinta se pone la plantilla, causará un patrón

de carga distinto que será detectado por el microcontrolador y lo transmitirá inalámbricamente.

El método de encriptación para la comunicación será AES-128, un estándar internacional que requiere de poco poder computacional para la trama que se planea enviar. El medio de transmisión contemplado es por bluetooth low energy (BLE), un protocolo embebido en el mismo sistema del nRF51822 que envía tramas por radiofrecuencia utilizando poca energía. Evaluando la confiabilidad, se estará enviando la señal cada cierto intervalo de pasos del usuario, por lo que no es crítico si se pierde una trama debido a que en unos pasos más la señal será transmitida de nuevo.

Finalmente, la antena contemplada es una antena externa flexible, acoplable al nRF51822.

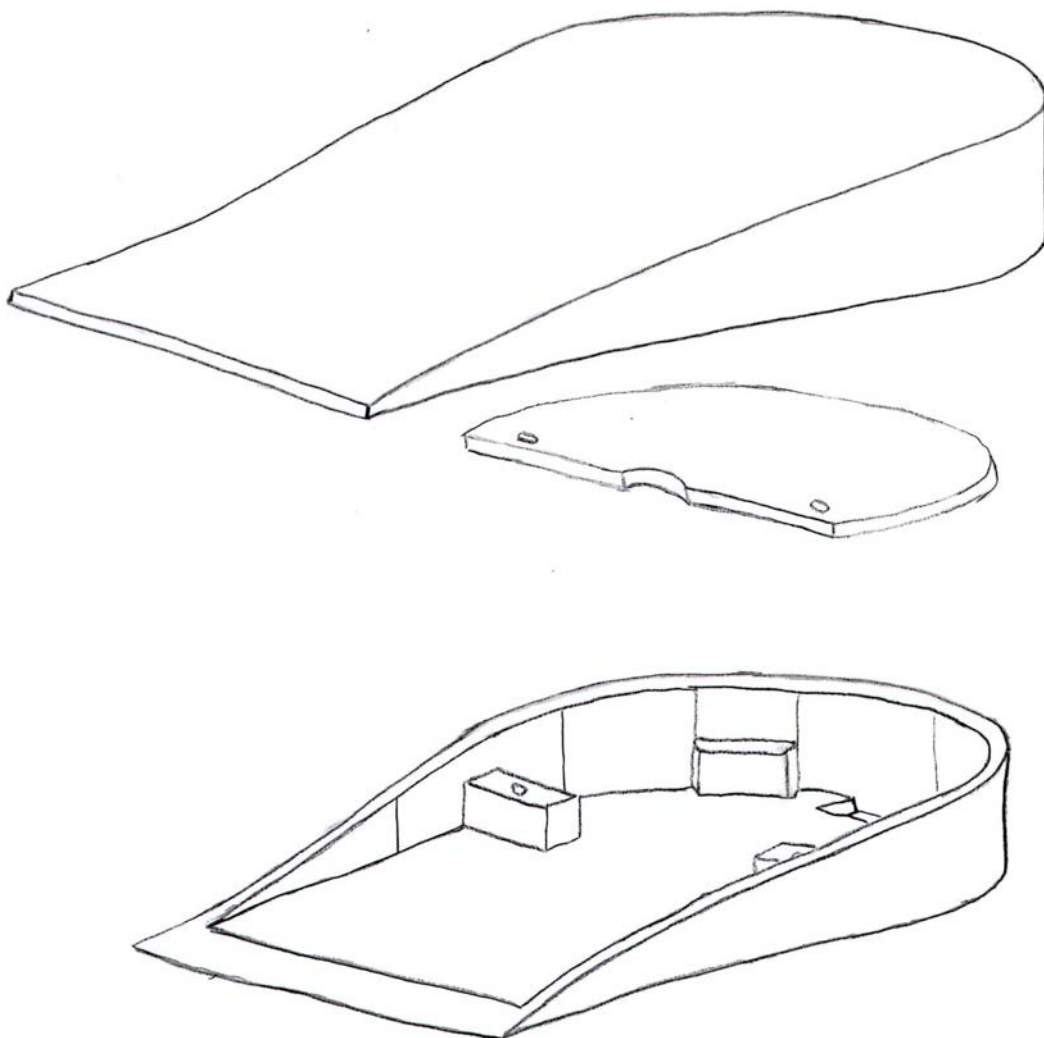


Figura 4-3: Vista explosión superior del concepto solución 1. Fuente: Elaboración propia.

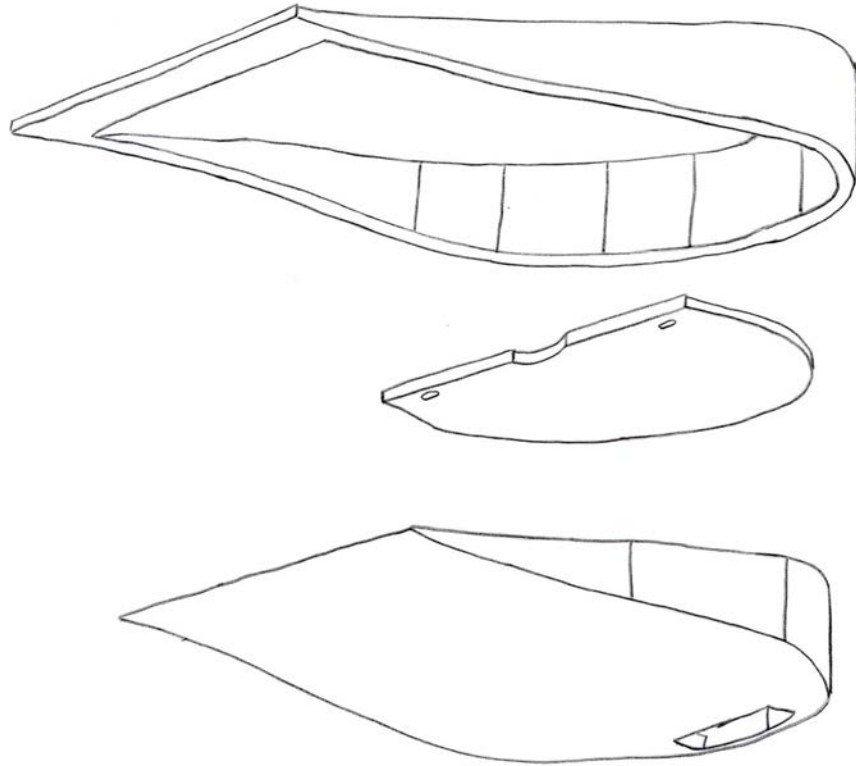


Figura 4-4: Vista explosión inferior del concepto solución 1. Fuente: Elaboración propia.

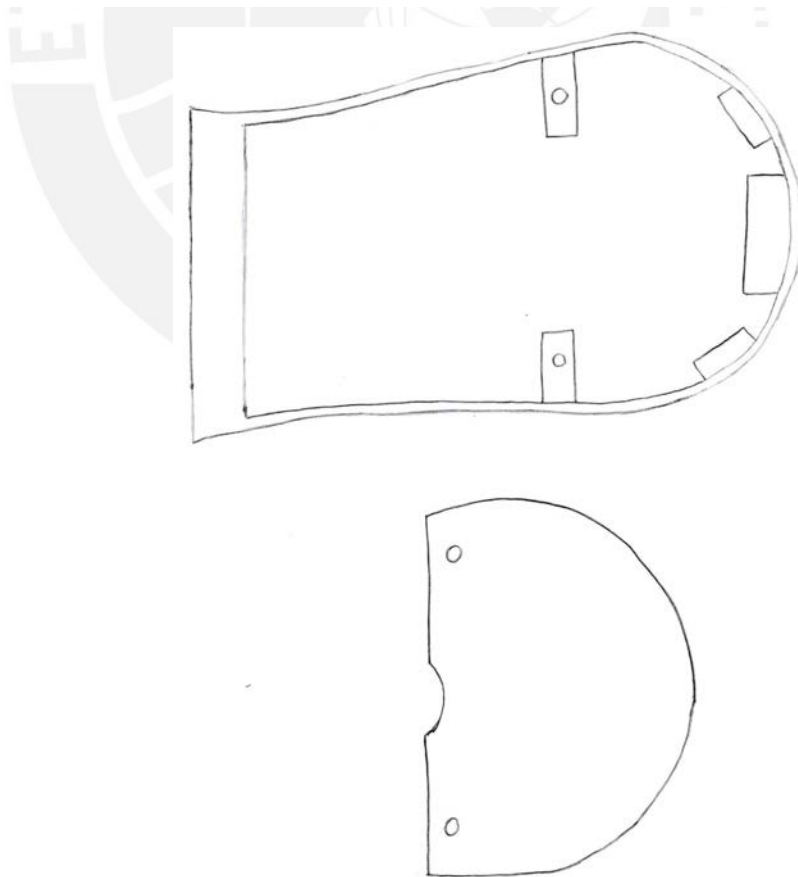


Figura 4-5: Vista superior de la parte inferior y tapa. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Concepto solución 2

En el segundo concepto solución plástico rígido almacena y protege los componentes. Para transmitir la energía corporal generadores termoeléctricos acoplados a plástico flexible estarán pegados a la piel para aprovechar el calor corporal. Se ajustará con una correa a la parte superior del brazo como una pulsera.

En el dominio energético, los generadores termoeléctricos Peltier dan un voltaje pequeño que será aprovechado por el módulo LTC3588 para almacenarlo en un súper capacitor. Habrá un regulador de voltaje MIC5203, ideal por su tamaño y bajo voltaje de caída para alimentar al microcontrolador. Todos los componentes estarán soldados a un PCB flexible.

Como microcontrolador se utilizará al BGM13P. Este chip de la empresa Silicon Labs se eligió debido a su eficiencia energética y radiofrecuencia de largo alcance incluida. A través de un micrófono se analizará el espectro de las frecuencias vocales en la habitación para determinar cual es la que se escucha más seguido y guardarlo en un historial. El microcontrolador activaría un dato anómalo cuando durante mucho tiempo escuchando el espectro de frecuencias no se ha escuchado la frecuencia de voz del usuario.

Para encriptar la data se utilizará 3DES, un módulo de encriptación de bloques simétrico que cifra la data 3 veces cada bloque antes de enviarlo. Para transmitirlo inalámbricamente se utilizará bluetooth baja energía o BLE por su eficiencia energética. El microcontrolador nRF518 incluye un ARM Cortex M0 con BLE que consume aproximadamente 15.5 uA en cada envío de datos por BLE. (Argenox, 2016) Se utilizará una antena estilo monopolo para aumentar el rango de transmisión de datos del BLE.

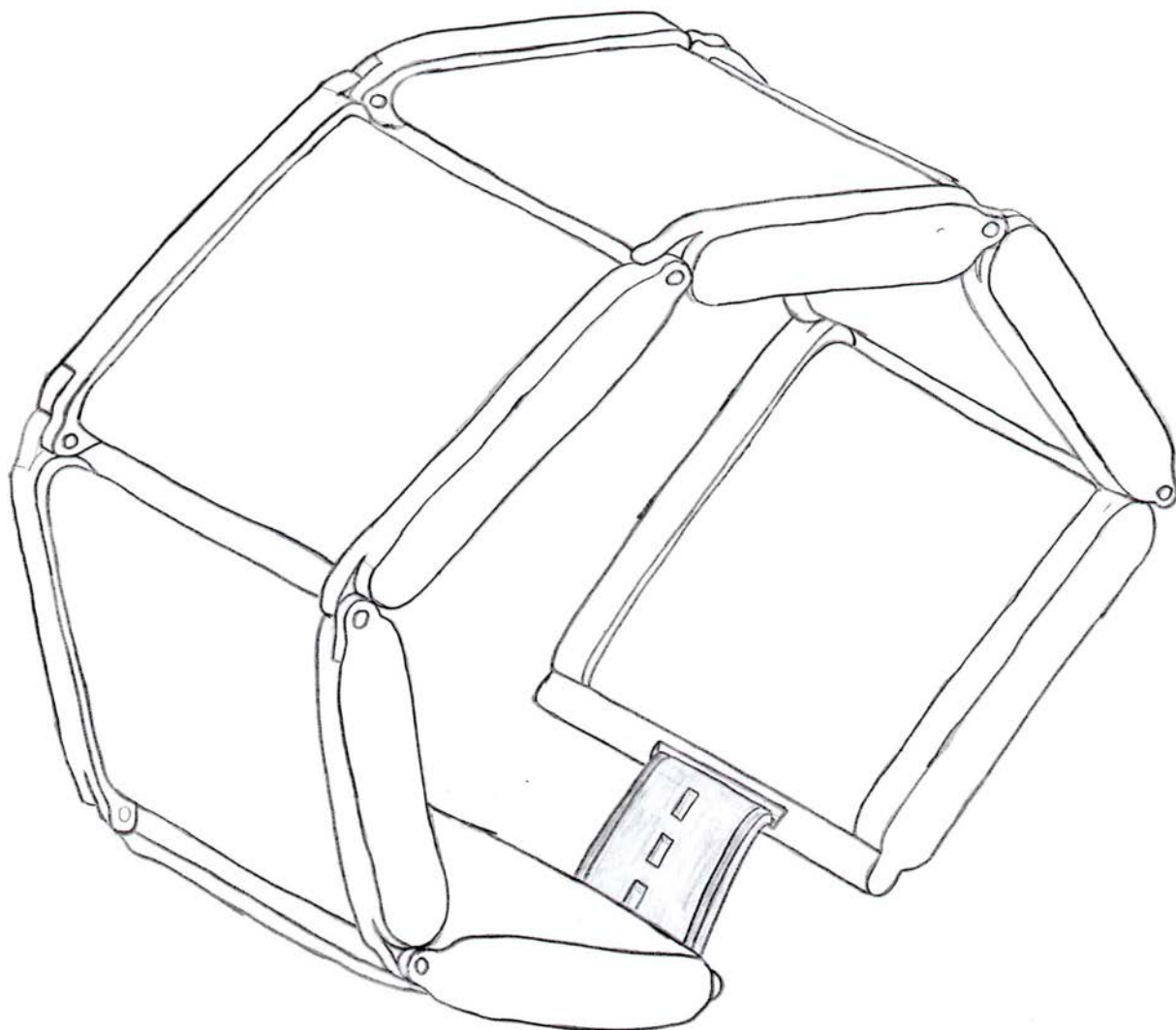


Figura 4-6: Perspectiva del concepto solución 2. Fuente: Elaboración propia.

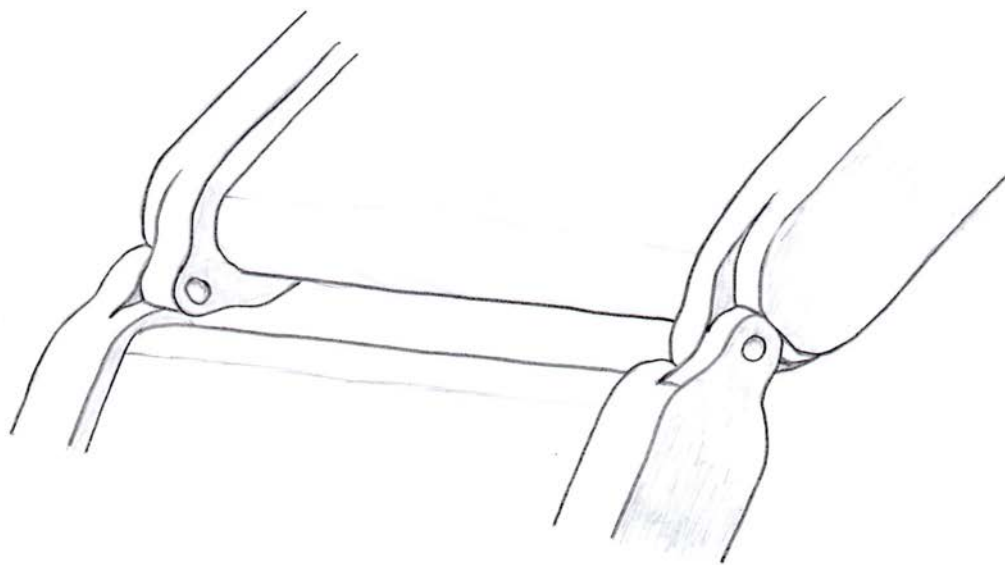


Figura 4-7: Vista en detalle de la conexión de sujetadores de celda Peltier. Fuente: Elaboración propia.

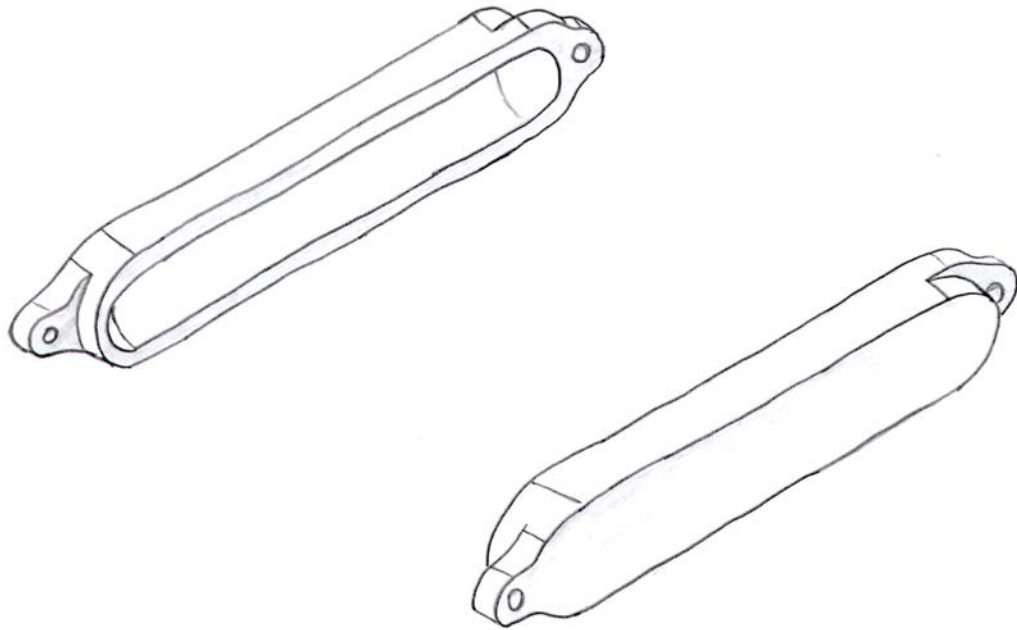


Figura 4-8: Detalle de los sujetadores de celda Peltier. Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Concepto solución 3

En el tercer concepto solución la carcasa estará hecha de acrílico pavonado para que no se visualicen los componentes dentro. Se transmitirá la energía cinética del usuario a través de resortes que tendrán en un extremo la carcasa exterior y, en el otro extremo, generadores triboeléctricos que producen energía cada vez que existe presión en ellos. Debido a que se energiza con energía cinética este wearable también será una plantilla para aprovechar la presión que generan los pies en la planta al caminar. La razón por la cual se utilizan resortes es por que en el ensamble del dispositivo se fijarán los resortes manteniendo energía potencial de tal forma que los elementos triboeléctricos siempre están bajo presión.

Los generadores triboeléctricos aprovechan el movimiento a baja frecuencia y la forma más económica de realizarla es utilizando un U-TENG (Ultra simple nano generador triboeléctrico) con los materiales propuestos por un artículo científico de la universidad de Clemson (Kumar Mallineni, y otros, 2017). La ventaja de estos materiales es que son de fácil acceso a comparación de los materiales de los sistemas TENGs convencionales, como el grafeno. Los U-TENGs utilizan PET (material que se encuentra en las botellas de plástico) cubierto por óxido de indio y estaño. Utiliza también Kapton, una cinta de polimida eléctricamente aislante y resistente al calor.

Se colocan los materiales en esta disposición:

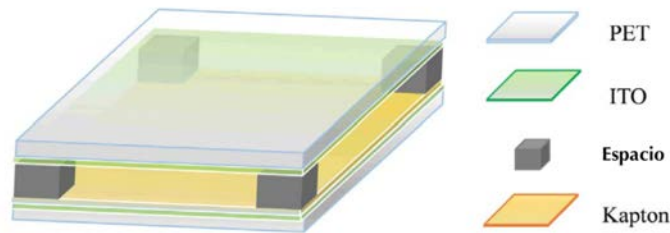


Figura 4-9: Esquemático de preparación de un U-TENG: Fuente: (Kumar Mallineni, y otros, 2017)

La energía eléctrica se genera cuando se juntan las placas del U-TENG, por electroestática las dos placas separadas por un espacio se polarizan, lo que genera un diferencial voltaje que se aprovechará posteriormente. El lugar en que mejor se podría aprovechar la energía corporal es la planta del pie. Cada paso genera la presión suficiente para unir las placas y cuando el pie se encuentra en el aire se separan generando el voltaje. De esta forma la energía recolectada de cada paso se almacena hasta que se tenga la capacidad de arrancar el microcontrolador y enviar la señal. No habría necesidad de cargar el wearable de manera convencional en ningún momento y la eficiencia depende de la electrónica a implementar.

Por otro lado, se eligió el LTC3108-1 un regulador de voltaje ultra bajo, capaz de regular la energía desde 20mV. Tiene una salida seleccionable de 2.5V, 3V, 3.7 y 4.7V, suficiente para acumular la energía en un capacitor hasta que se pueda transferir la carga hacia una batería de litio utilizando una corriente mínima en el proceso. La ventaja principal es que se podrá almacenar bastante energía si es que se camina mucho durante un intervalo corto de tiempo. Aunque el ciclo de vida de una batería de litio sea corto y permita una cantidad limitada de recargas, incluso después de 1000 recargas si la capacidad disminuye en 70% igual se tendrá suficiente energía para alimentar todo el sistema de transmisión por horas en caso la batería este cargada y el usuario no se mueve. Para regular el voltaje de la batería de litio se utilizará el módulo NCP1402 que permite voltaje de entradas de 1 a 3V y lo convierte a un voltaje constante de 3.3V capaz de proporcionar hasta 200mA. Todos los componentes estarán soldados a un PCB rígido.

La unidad de procesamiento de datos elegido es el ESP8266 de la empresa Espressif, módulo característico por tener embebido el soporte para

wifi. La señal de identificación se extraerá de la misma forma que el concepto solución 1, analizando la señal generada por los piezoeléctricos en cada paso que da el usuario. La seguridad se garantizará con el método de encriptación RSA que es un algoritmo pesado, pero la trama a enviar será pequeña y por intervalos intermitentes por lo que no se esperan problemas de velocidad. La comunicación será a través de wifi y la antena a utilizar será la misma que viene en el PCB del módulo.

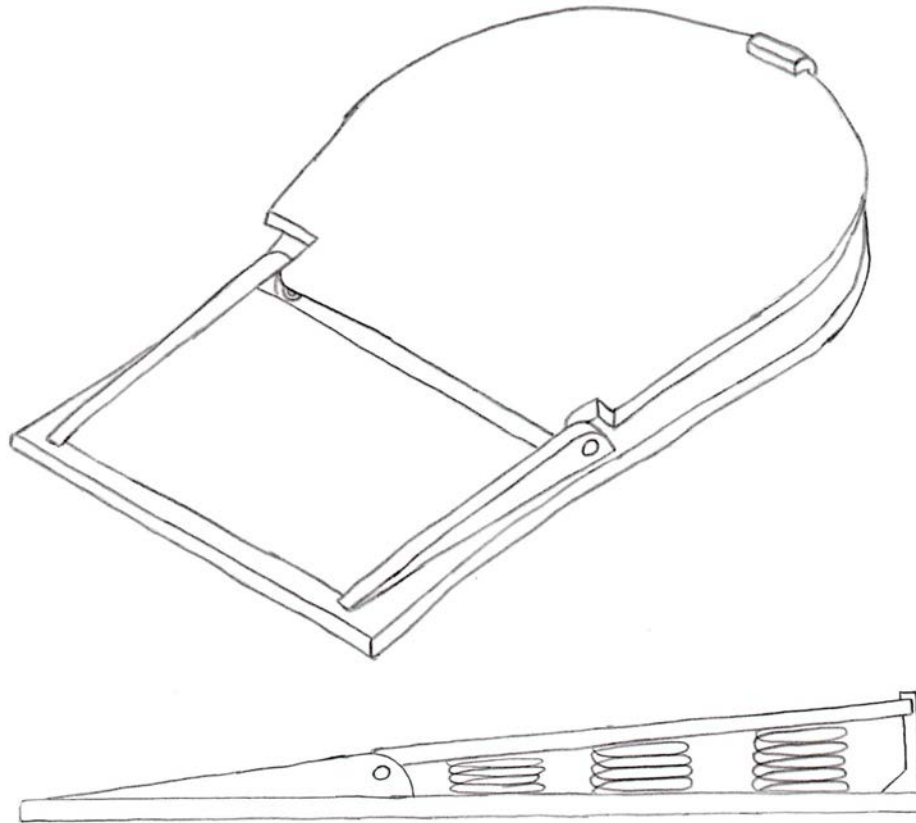


Figura 4-10: Vista en perspectiva y lateral del concepto solución 3. Fuente: Elaboración propia.

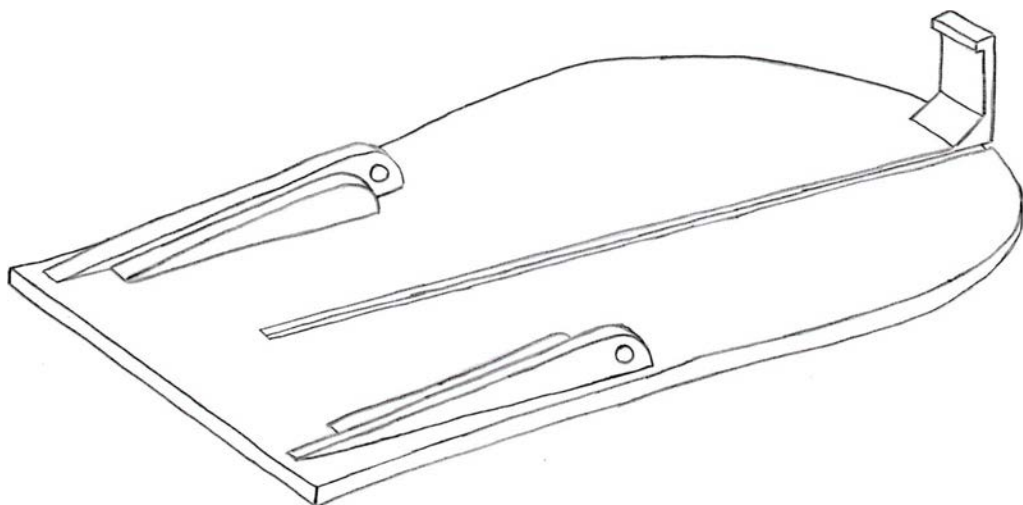


Figura 4-11: Vista en perspectiva de la base inferior. Fuente: Elaboración propia.

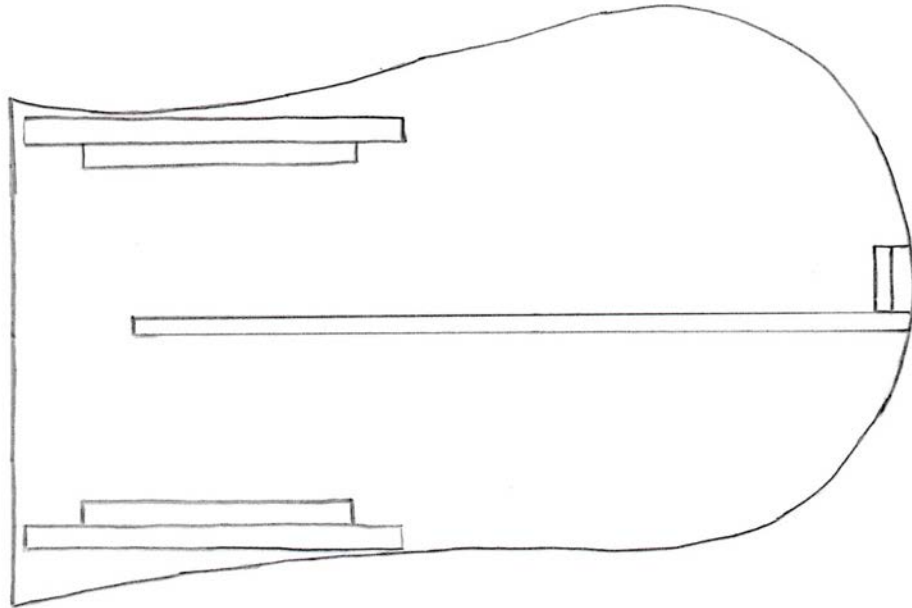


Figura 4-12: Vista superior de la base inferior. Fuente: Elaboración propia.

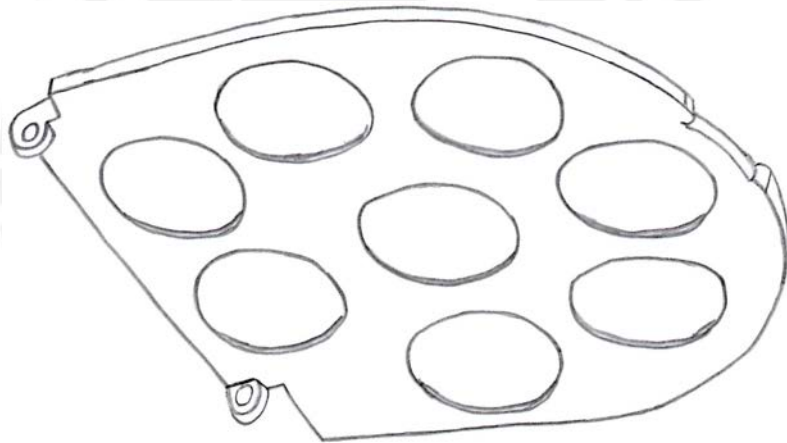


Figura 4-13: Vista en perspectiva inferior de la tapa que sostiene los resortes. Fuente: Elaboración propia.

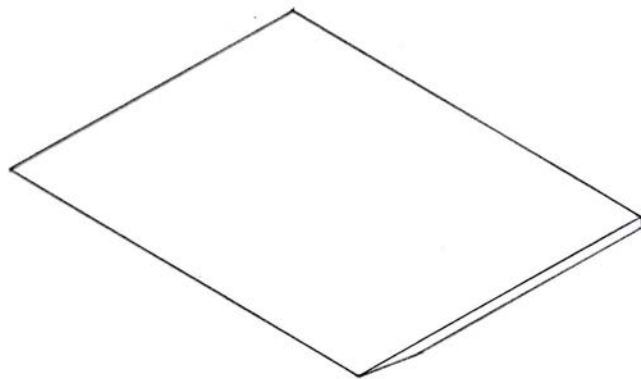


Figura 4-14: Vista en perspectiva de la tapa protectora de componentes electrónicos. Fuente: Elaboración propia.

4.6 Evaluación de los conceptos solución

Se observa de la tabla 4.6 y 4.7 la comparación del puntaje de distintos atributos técnicos y económicos según la norma VDI 2225. El puntaje es de 0 a 4 siendo 0 no satisfactorio hasta 4 muy buena solución. El símbolo g es el peso de importancia que se le da a cada atributo.

Tabla 4-5: Evaluación técnica. Fuente: Elaboración propia.

Conceptos solución		Concepto Solución 1		Concepto Solución 2		Concepto Solución 3		Concepto Solución Ideal	
Atributo	g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg
Funcionamiento	4	4	16	4	16	4	16	4	16
Ergonomía	4	2	8	3	12	2	8	4	16
Eficiencia energética	4	4	16	3	12	3	12	4	16
Confiabilidad	3	3	9	4	12	4	12	4	12
Precisión	3	3	9	4	12	4	12	4	12
Durabilidad	4	4	16	2	8	4	16	4	16
Robustez	4	4	16	3	12	4	16	4	16
Simplicidad	2	3	6	3	6	2	4	4	8
Discreción	4	4	16	1	4	4	16	4	16
Seguridad	3	4	12	3	9	3	9	4	12
Puntaje máximo	35		124		103		121		140
Valor técnico		.89		.74		.86		1	
Orden		1		3		2			

Tabla 4-6: Evaluación económica. Fuente: Elaboración propia.

Conceptos solución		Concepto Solución 1		Concepto Solución 2		Concepto Solución 3		Concepto Solución Ideal	
Atributo	g	p	pg	p	pg	p	pg	p	pg
Costo de componentes electrónicos	4	3	12	3	12	4	16	4	16
Costo de componentes mecánicos	4	3	12	4	16	2	8	4	16
Costo de ensamblaje	3	4	12	2	6	2	6	4	12
Costo de reparación	2	4	8	4	8	3	6	4	8
Puntaje máximo	13		44		42		36		52
Valor económico		.85		.81		.69		1	
Orden		1		3		2			

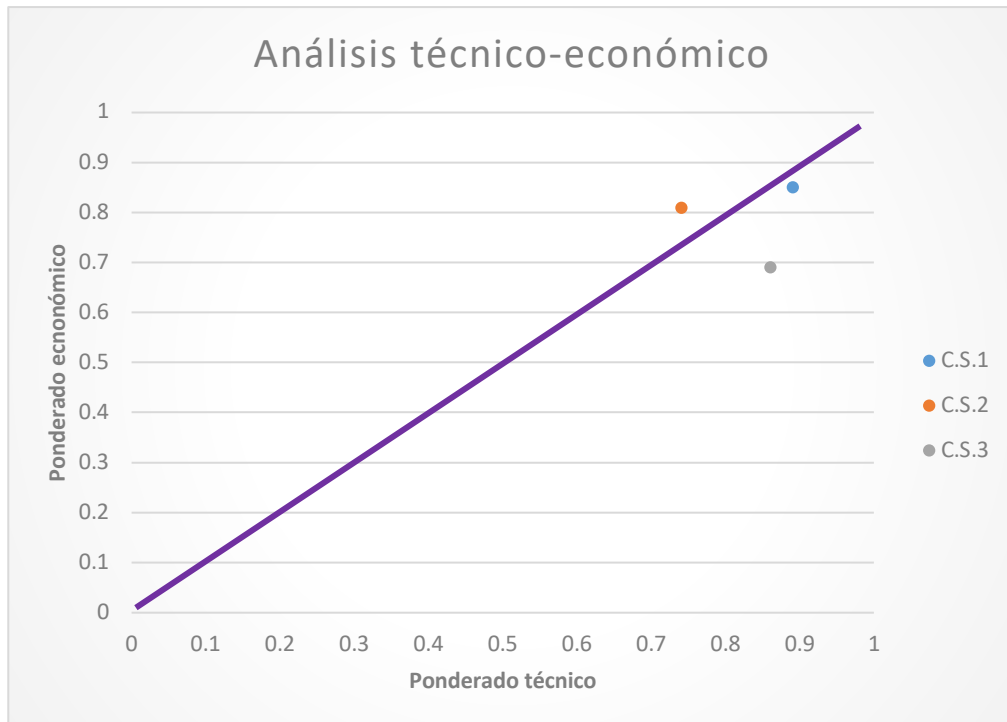


Figura 4-15: Análisis técnico-económico. Fuente: Elaboración propia.

Se concluye del análisis técnico-económico que la mejor opción de diseño del wearable es el concepto solución 1. Sin embargo, se realizaron gráficas radar para observar cuales son los puntos con menor puntaje y mejorarlo.

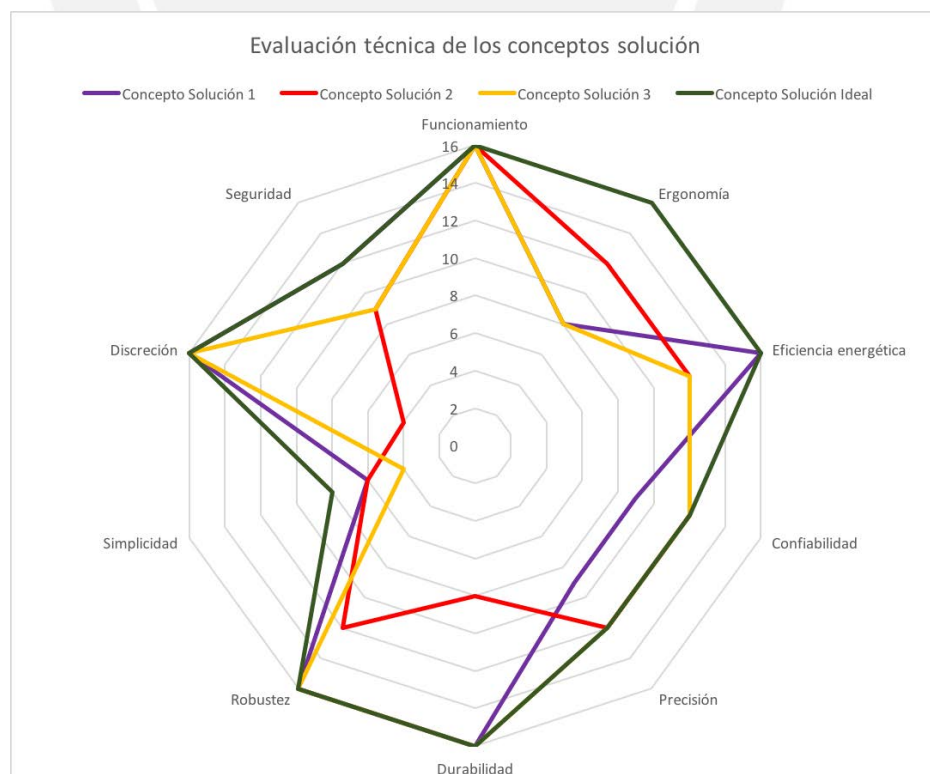


Figura 4-16: Radar de la evaluación técnica de los conceptos solución. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4-16 se observa que ergonomía, confiabilidad y precisión son los puntos con menor puntaje. Para optimizar el concepto solución en ergonomía, se realizará lo más compacto posible. El puntaje de confiabilidad se basó en que las transmisiones podrían ser perdidas debido a que la antena se encuentra en el PCB y no había una antena dedicada, sin embargo, se prestará del concepto solución 3 el colocarle una antena monopolo para aumentar la potencia de la transmisión. La precisión también mejorará con esta solución de tener una estructura dedicada para la antena.

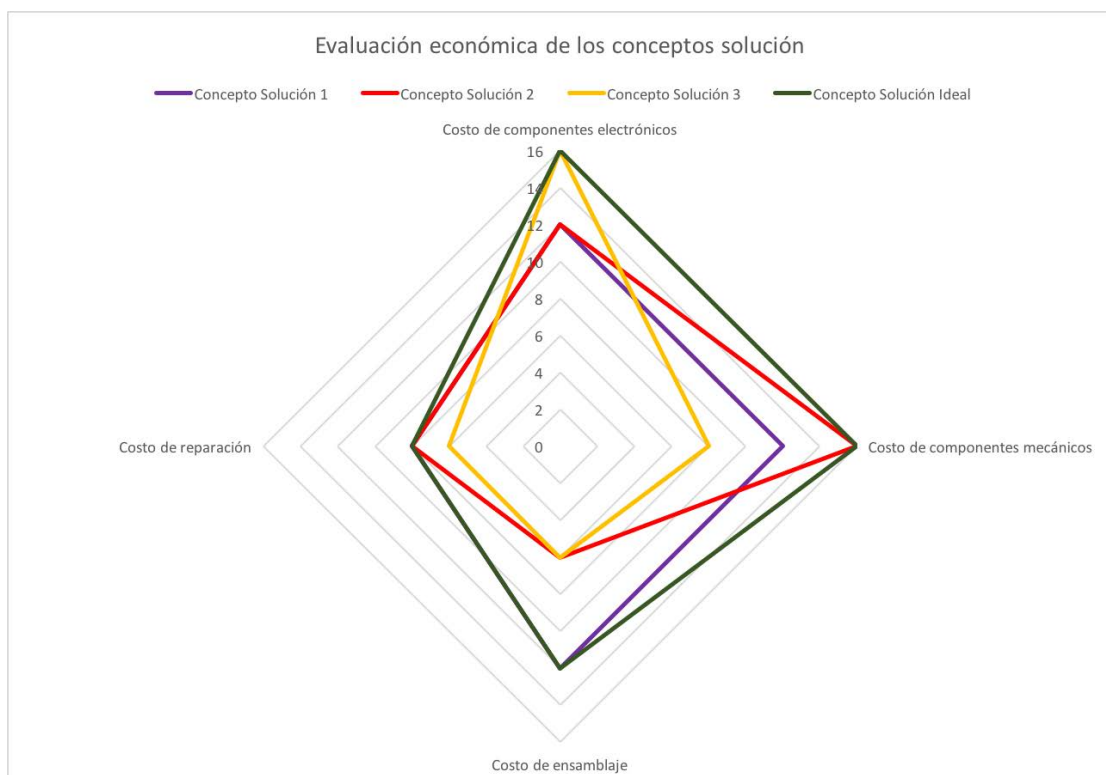


Figura 4-17: Radar de la evaluación económica de los conceptos solución. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4-17 se observa que el sistema no es óptimo en el costo de componentes mecánicos por que se está considerando la fabricación de una matriz para las estructuras de silicona y plástico. Si se masifica el producto el costo unitario serían más bajo que sus alternativas.

5 CAPÍTULO: DISEÑO DEL WEARABLE TRANSMISOR DE LOCALIZACIÓN E IDENTIFICACIÓN ALIMENTADO POR RECOLECCIÓN DE ENERGÍA

En este capítulo se presenta el desarrollo optimizado del diseño conceptual. En primer lugar, se muestra el sistema integrado de los dominios mecánicos, eléctricos y de control. La presente tesis se enfocará en el wearable que portará el usuario y no en los componentes externos, sin embargo, se detallarán las funciones de los elementos externos para que el sistema pueda funcionar correctamente. En segundo lugar, se analizará la electrónica, considerando un sistema de recolección de energía corporal para transformar la energía cinética de los pasos en energía eléctrica. Se detallarán los componentes, diagramas eléctricos y esquemáticos. En tercer lugar, se desarrollará el dominio mecánico, considerando la mejor disposición ergonómica de los elementos seleccionados anteriormente. Por último, se diseñará el sistema de identificación y localización en interiores, se explicará cual es la infraestructura inicial que requiere el wearable para que su data sea procesada. Se realizarán un diagrama de comunicaciones y un mapa de cómo se vería el sistema dentro de un edificio de oficinas. Se desarrollará un experimento para verificar que el reconocimiento sea posible. Se evaluará el sistema de reconocimiento identificando los parámetros de identificación más significativos de una caminata, finalizando con un diagrama de flujo para implementar en el microcontrolador.

5.1 Integración del wearable transmisor de locación e identificación alimentado por recolección de energía

El sistema propuesto es una plantilla que se compone de tres elementos esenciales, el sistema recolector de energía, el sistema de localización y el sistema de identificación.

El primero se encargará de transformar la energía cinética de los pasos en energía eléctrica. El segundo se encargará de enviar una señal para que dispositivos externos puedan triangular la localización del wearable a través de la medición de la intensidad de la señal. El tercero verificará que los

patrones de identificación que se extraen de la caminata de un usuario distinguan cuando el wearable ha sido cambiado a una persona distinta.



Figura 5-1: Vista ortogonal del sistema integrado. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5-1, el usuario lleva la plantilla dentro del zapato. En el interior de la plantilla se encuentran los módulos recolectores de energía que generan un diferencial de voltaje cuando se les aplica presión. En la parte trasera se encuentran los componentes electrónicos. El wearable incluye antena posterior para transmitir la señal a los receptores y el localizador, explicados más adelante. Los detalles del diseño serán vistos a continuación.

5.2 Diseño electrónico del wearable

En este apartado se describirá el principio de recolección de energía y su integración con los demás componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento. Se realizará la selección de componentes, un diagrama electrónico y el esquemático del producto.

5.2.1 Principio de recolección de energía

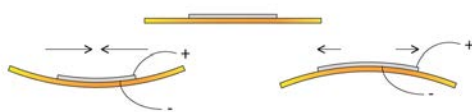


Figura 5-2: Deformación de un elemento piezoeléctrico: Fuente: PiezoElements, 2021.

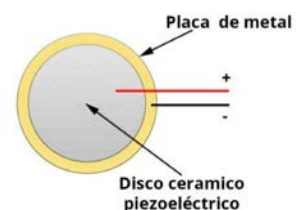


Figura 5-3: Disco cerámico piezoeléctrico. Fuente: PiezoElements, 2021.

Un material piezoeléctrico es aquel que cuando se le aplica tensión mecánica genera un diferencial de voltaje entre sus superficies. De la tabla 2-1 se determina que la mejor fuente de tensión mecánica para el piezoeléctrico es la presión ejercida por la planta del pie. En casos ideales se podría obtener hasta 1.265W de energía de la caminata diaria de una persona.

5.2.2 Diagrama funcional de bloques

Se realizó un diagrama funcional de bloques para representar lo que se va a colocar en el esquemático eléctrico. Como se observa de la Figura 5-4, se tienen que diseñar tres funciones principales, la recolección de energía, la regulación del voltaje, el acondicionamiento de señales para el microprocesador y las conexiones generales. La primera función se encargará de rectificar el voltaje proveniente de los piezoeléctricos. La segunda función se encargará de regular el voltaje para que pueda ser usado por el microcontrolador.

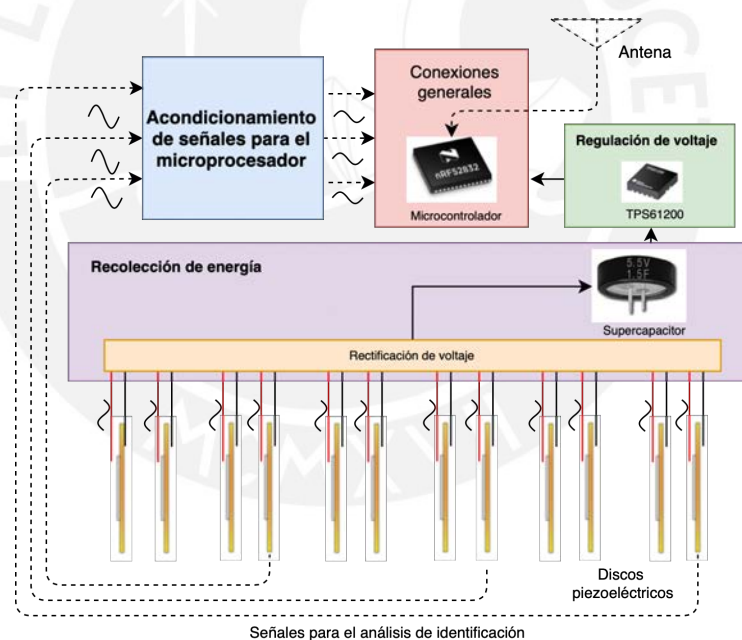


Figura 5-4: Diagrama eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el wearable tiene que ser capaz de identificar patrones de caminata para distinguir cuando se ha cambiado de usuario. Se implementará el circuito descrito en un artículo científico llamado "Recolección de energía y adquisición de datos simultáneos través de recolectores de energía piezoeléctricos" (Ma, Guhao, Weitao, Mahbub , & Wen, 2018). Este circuito visto en la Figura 5-5 permite cargar y obtener los patrones de voltajes

generados por la deformación del disco, servirá para realizar el análisis de señales detallado más adelante.

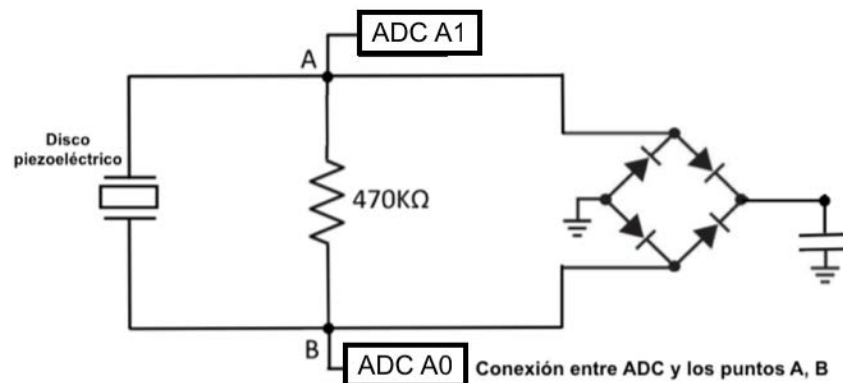


Figura 5-5: Circuito propuesto para sensor señales piezoeléctricas. Fuente: Ma, Guhao, Weitao, Mahbub, & Wen, 2021.

Con el circuito representado en la figura 5-5 se simuló un paso, se colocaron puntas de osciloscopio en los puntos A, B en donde iría el ADC para observar la señal que el microcontrolador tiene que procesar.



Figura 5-6: Simulación de un paso para el ADC del microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el voltaje generado oscila entre 0 y 4 V, por lo tanto, estas señales se deben acondicionar para ser leídas por el ADC por el microcontrolador con un divisor de voltaje. Por último, se implementarán todas las conexiones generales hacia el microcontrolador y la antena de transmisión.

5.2.3 Componentes electrónicos

5.2.3.1 Microcontrolador

En la Figura 5-4 se observa que el microcontrolador tiene que recibir como mínimo la señal de 3 elementos piezoeléctricos requiriendo como mínimo 6 entradas ADC. Debe incluir protocolos de transmisión inalámbrica de bajo consumo y permitir el acoplamiento de una antena externa. Debe ser SMD de empaque miniaturizado, debido a que el espacio para colocar los componentes es limitado. Por otro lado, la tarea más cargada para el microcontrolador es el procesamiento de la señal proveniente de los discos piezoeléctricos al momento que camina el usuario. Como se observa de la Figura 5-6, la duración de la señal es de 4.72 ms, por lo que un microcontrolador veloz y con capacidad de punto flotante que permita hacer operaciones matemáticas sería necesario.

La tabla 5-1 muestra el resumen de los requerimientos esenciales del microcontrolador.

Tabla 5-1: Requerimientos para seleccionar un microcontrolador. Fuente: Elaboración propia.

Requisito	Valor
Número ADCs	6
Protocolos de transmisión inalámbrica de bajo consumo	Si
Modo de bajo consumo	Si
Acoplamiento de antena externa	Si
Conexión SMD	Si
Unidad de punto flotante	Si
Consumo de energía por transmisión	< 2mJ

En la tabla se muestra un comparativo de los microcontroladores hallados en el mercado que cumplen con los requisitos.

Tabla 5-2: Alternativas de microcontroladores con los requisitos. Fuente: Elaboración propia.

Micro controlador	ADCs	Transmisión inalámbrica	Modo de bajo consumo	Antena externa	SMD	Unidad de punto flotante	Consumo por transmisión
ESP32	18	BLE, ESPNow	SI	SI	SI	SI	52 mJ
BGM13P	15	BLE	SI	SI	SI	SI	0.171 mJ
nRF52832	8	BLE	SI	SI	SI	SI	0.02457 mJ

Por su bajo consumo de transmisión, el microcontrolador más óptimo para el sistema es el nRF52832 de la empresa Nordic Semiconductor, visto en la Figura 5-7.



Figura 5-7: SoC nRF52832. Fuente: Nordic Semiconductors.

Además de lo mencionado anteriormente, estas son algunas características técnicas:

Tabla 5-3: Características del nRF52832. Fuente: Nordic Semiconductor.

Características del nRF52832	
RSSI	1dB de resolución
Microprocesador	ARM Cortex – M4 32-bit
Voltaje de entrada	1.7 – 3.6 V
Memoria	512kB flash / 64 kB RAM
Encriptación	AES - 128
Paquete	QFN48 6x6mm
Precio	3.90 USD

5.2.3.2 Recolección de energía

Los elementos utilizados para la recolección de energía serán los discos piezoeléctricos de la empresa PiezoElements. Específicamente el modelo FT-20T-3.6A1. La principal característica de elección es su bajo costo y delgado espesor.

Tabla 5-4: Características del disco piezoeléctrico 20T-3.6A1. Fuente: PiezoElements.

Características del disco piezoeléctrico 20T-3.6A1	
Marca	PiezoElements
D	20 mm
d	14.7 mm
T	0.24 mm
t	0.1 mm

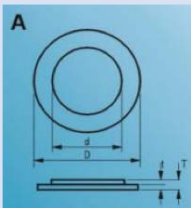


Figura 5-8: Medidas de un disco piezoeléctrico. Fuente: PiezoElements, 2021.

5.2.3.3 Regulador de voltaje

El regulador de voltaje seleccionado es el TPS61200, cuya característica principal es que regula fuentes desde 0.3V a 5.5V a valores ajustables de 1.8V a 5.5V. El voltaje de arranque es 0.5V y continuará regulando hasta que llegue

al umbral de bloqueo de sub tensión cuyo valor es 0.25V. Es perfecto para la aplicación deseada debido a que se recolectará la energía en el capacitor hasta 0.5V para que el dispositivo empiece a regular y parará en 0.25V hasta completar un nuevo ciclo.

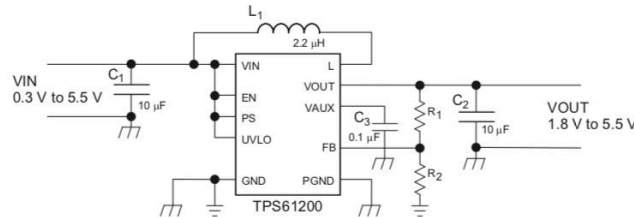


Figura 5-9: Circuito requerido por el regulador de voltaje TPS61200. Fuente: Texas Instruments, 2021.



Figura 5-10: Regulador de voltaje TPS61200: Fuente: Texas Instruments, 2021.

Tabla 5-5: Características del TPS61200. Fuente: Texas Instruments, 2021.

Características del TPS61200	
Voltaje de entrada	0.3 – 5.5 V
Voltaje de salida	1.8– 5.5 V
Corriente quiescente	55µA
Eficiencia	90 %
Precio	1.59 USD

5.2.3.4 Almacenamiento de Energía

Se seleccionó un capacitor como componente para almacenar la energía por dos motivos principales; en principio seguridad, porque tener una batería Li-Po o de alta carga dentro de la plantilla del zapato es peligroso y segundo por su capacidad para soportar varios ciclos de carga. El valor de la capacitancia será determinado en el apartado 5.2.4.4.

5.2.4 Cálculos eléctricos

5.2.4.1 Cálculo de energía necesaria

5.2.4.1.1 Energía utilizada por el microcontrolador

El componente que más consume energía es el microcontrolador nRF52832 y su consumo más crítico es cuando se está transmitiendo la señal. A través de la página web del fabricante Nordic Semiconductors se estima cuanto es la energía consumida por transmisión.

Colocando los siguientes parámetros:

$$\text{Voltaje de nRF52832} = 1.8V$$

$$\text{Intervalo de transmisión BLE} = 20ms$$

$$\text{Carga transmitida} = 2 \text{ bytes}$$

$$\text{Potencia de transmisión} = 0dBm$$

Los resultados obtenidos son:

$$\text{Tiempo de transmisión} = 25.0 \text{ ms}$$

$$\text{Corriente promedio} = 540 \mu A$$

Se analiza la energía necesitada:

$$\text{Energía} = \text{Voltaje} \times \text{Corriente promedio} \times \text{Tiempo de transmisión}$$

$$\text{Energía} = 1.8V \times 540 \mu A \times 25.0 \text{ ms}$$

$$\text{Energía de microcontrolador} = 24.3 \mu J$$

5.2.4.1.2 Energía utilizada por el regulador

$$\text{Energía de regulador} = \text{Voltaje} \times \text{Corriente quiescente} \times \text{Tiempo de transmisión}$$

$$\text{Energía} = 1.8V \times 55 \mu A \times 25.0 \text{ ms}$$

$$\text{Energía de regulador} = 2.475 \mu J$$

5.2.4.1.3 Energía total

$$\text{Potencia total} = (\text{Potencia de microcontrolador} + \text{Potencia de regulador}) * FS$$

Seleccionando un factor de seguridad de 25% para todos los elementos que no se están considerando.

$$\text{Potencia total} = 33.47 \mu J$$

Se requiere recolectar 33.47uJ en el capacitor para realizar una transmisión.

5.2.4.2 Cantidad de piezoeléctricos

5.2.4.2.1 Medición de voltaje

A través de un puente de diodos se midió cuanto voltaje rectificado genera un disco piezoeléctrico de 1 cm de radio:

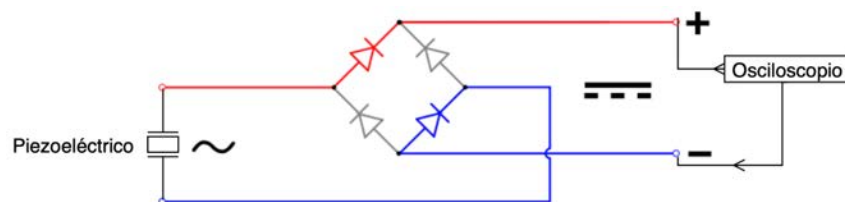


Figura 5-11: Circuito para medir voltaje piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia.

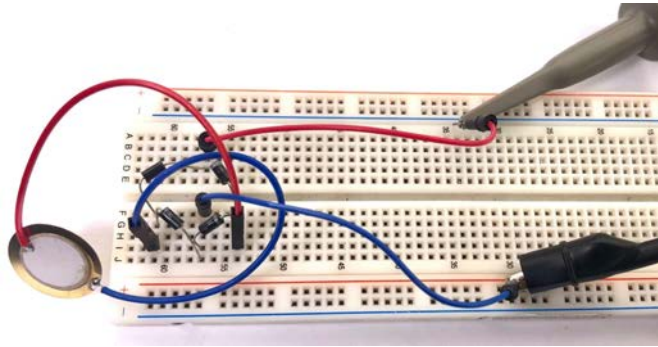


Figura 5-12: Implementación del circuito anterior. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-13 representa la variación de voltaje generado por el disco cuando se le aplica una presión parecida a la de una caminata. Se observa que existen dos picos, el primero generado cuando el disco se deforma al aplicársele presión y el segundo cuando se deja de apretar el disco, dado la deformación debido a la liberación de tensión.

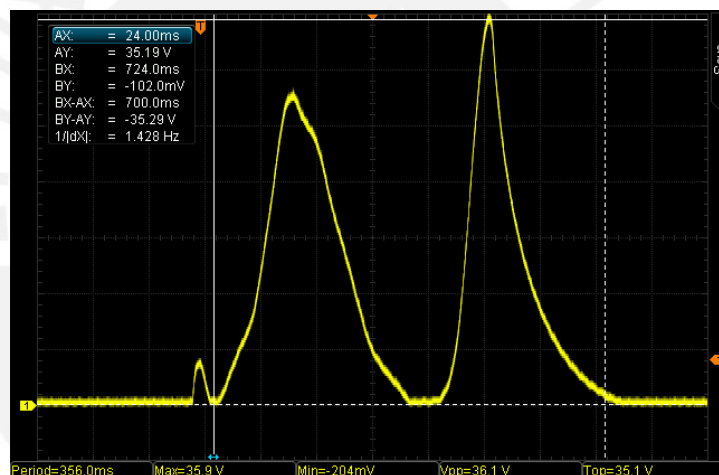


Figura 5-13: Gráfica de voltaje generado por un disco piezoeléctrico de 1 cm de radio vs tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el voltaje pico generado por el piezoeléctrico es de 35.9 V durante 700ms. Gráficas similares de la misma prueba se observan en el capítulo 1 del anexo.

5.2.4.2.2 Medición de corriente

Así mismo se colocó una resistencia para medir la máxima corriente entregada por los discos, con el arreglo descrito a continuación.

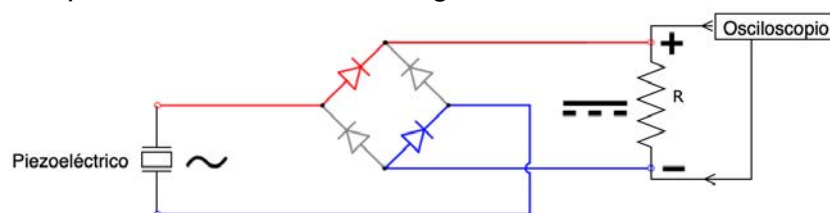


Figura 5-14: Circuito para medir corriente piezoeléctrica. Fuente: Elaboración propia.

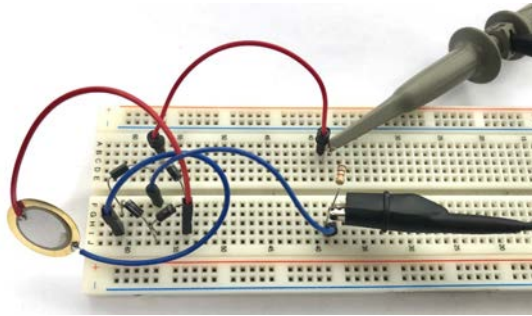


Figura 5-15: Implementación del circuito anterior. Fuente: Elaboración propia.

Con $R = 1 \text{ k}\Omega$.

Se observa de la Figura 5-16 que el máximo voltaje generado en la resistencia de 1000 Ohm es de 3.98V. Mediante la Ley de Ohm se determina que la corriente máxima generada por el piezoeléctrico es de casi 4mA, siendo el promedio 1.5mA.

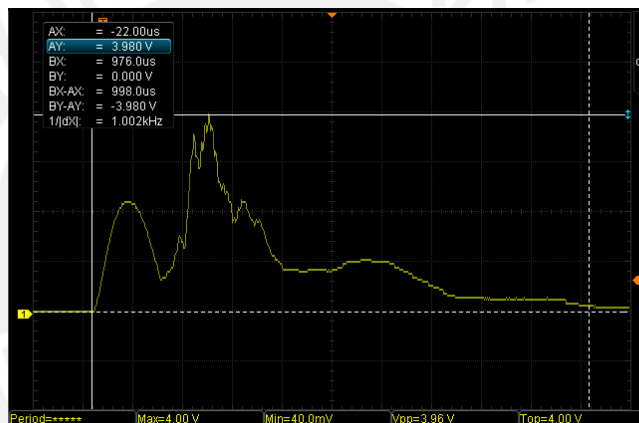


Figura 5-16: Gráfica de voltaje generado por un disco piezoeléctrico de 1 cm de radio con resistencia de 1 kOhm vs tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Con $R = 100 \text{ Ohm}$;

Así mismo, se realizó la prueba con $R = 100\Omega$, mostrada en la Figura 5-17. Los valores determinados son 2.98mA de corriente máxima y 1mA de corriente promedio.

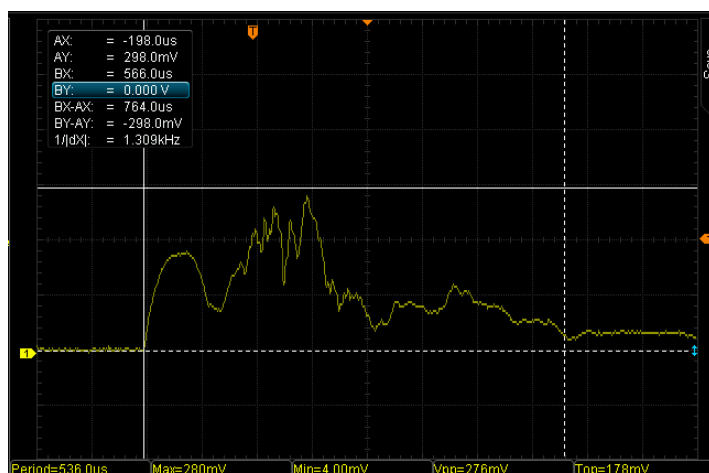


Figura 5-17: Gráfica de voltaje generado por un disco piezoeléctrico de 1 cm de radio con resistencia de 100 Ohm vs tiempo. Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.3 Medición de energía almacenada

Por otro lado, se midió cuánta energía se almacena en un capacitor electrolítico por tensión mecánica aplicada al disco. El capacitor utilizado fue de 1000uF 35V marca JWCO. Se realizaron las conexiones descritas a continuación.

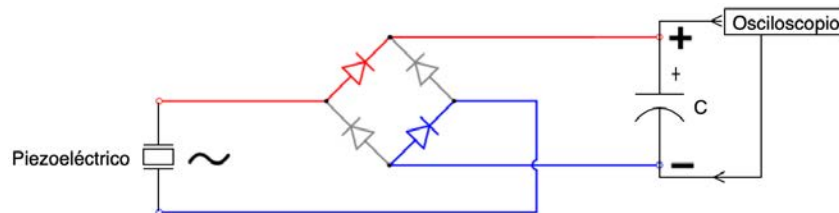


Figura 5-18: Circuito para medir energía piezoeléctrica. Fuente: Elaboración propia.

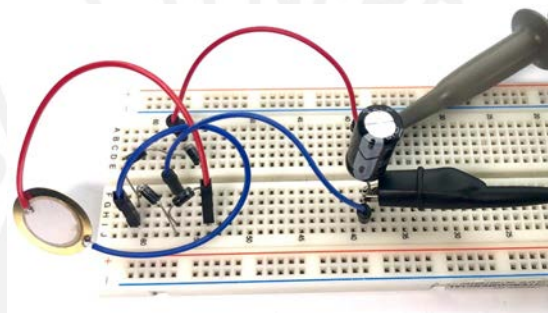


Figura 5-19: Implementación del circuito anterior. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-20 muestra la energía generada después de 10 presiones aplicadas. Como se observa se generó 65.2 mV.

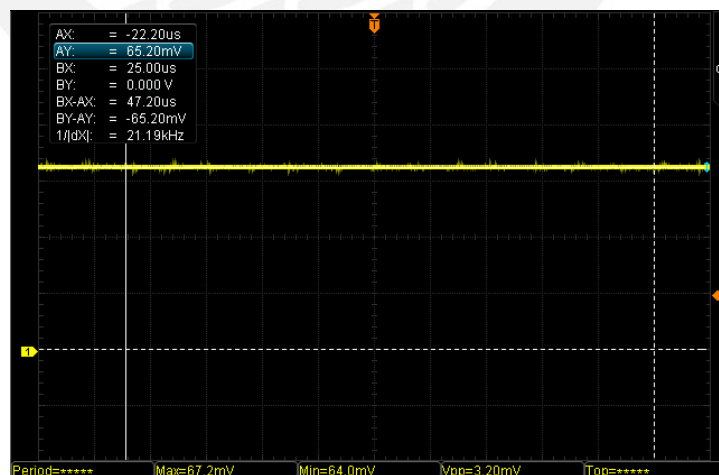


Figura 5-20: Gráfica de voltaje generado por un disco piezoeléctrico de 1 cm de radio con 10 presiones a un capacitor de 1000uF vs tiempo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran los cálculos de cuanta energía se genera por cada piezoeléctrico con el capacitor probado anteriormente.

Los datos son:

$$C = 1000\mu F$$

$$\text{Voltaje cada 10 presiones} = 65.2 \text{ mV}$$

$$\text{Energía almacenada de un capacitor} = \frac{1}{2} CV^2$$

Reemplazando

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2} \times 1000\mu F \times (65\text{mV})^2$$

$$\text{Energía almacenada después de 10 presiones} = 2.113\mu J$$

$$\text{Energía almacenada por presión} = \frac{2.113\mu J}{10}$$

$$\text{Energía almacenada por presión} = 211.3 \text{ nJ}$$

Como se observa, un disco piezoeléctrico de 1cm de radio, genera 211.3 nJ de energía por cada presión aplicada. Se considera que cada 14 presiones es óptimo realizar una transmisión.

$$\text{Número de discos para transmitir cada 14 presiones}$$

$$= \frac{33.47\mu J}{211.3\text{nJ} \times 14 \text{ presiones}}$$

$$\text{Número de discos para transmitir cada 14 presiones} = 12 \text{ discos}$$

Se utilizarán 12 discos piezoeléctricos en el diseño del wearable para transmitir una señal cada 14 presiones.

5.2.4.4 Especificaciones del capacitor

Como el sistema será capaz de cargarse cuando el usuario camina, no es necesario almacenar grandes cantidades de energía. Lo óptimo es que no haya energía almacenada y cuando el usuario de cierta una cantidad de pasos, se junte suficiente energía para transmitir una posición, drenando toda la energía de la fuente. En los casos donde el usuario camine constantemente y se recolecte más energía de la necesaria, el microcontrolador va a transmitir una posición cada cierta cantidad de segundos. Estas transmisiones intermitentes causarán el drenaje de la batería cuando el usuario se encuentre estático. Por el caso de uso descrito anteriormente, el componente que va a almacenar la energía debe ser lo suficientemente grande para guardar el

exceso de energía recolectada. Se determinó que el sistema usará 12 discos piezoeléctricos, el promedio almacenado por paso sería de $2.535\mu J$. Se observa en la Figura 5-21 un estudio realizado por la universidad de Stanford a 717,527 personas sobre monitoreo físico y se determinó que las personas que más caminan son de nacionalidad China, con un promedio de 6250 pasos diarios. (Tim, Hicks, King, Delp, & Jure, 2017)

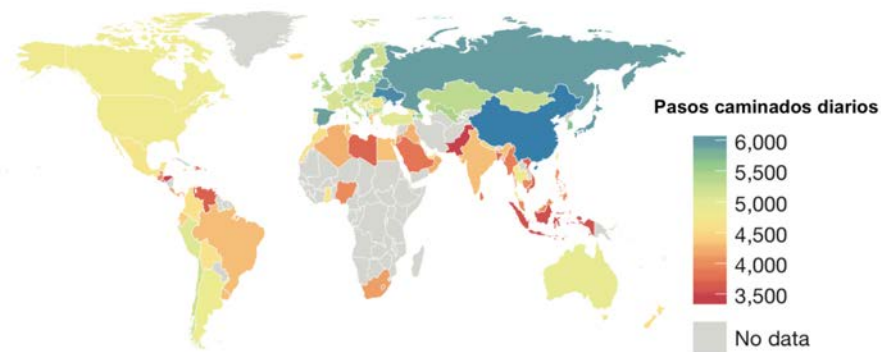


Figura 5-21: Cantidad de pasos promedio diario por nacionalidad. Fuente: Tim, Hicks, King, Delp, & Jure, 2017

Se limitará la capacidad de almacenamiento del componente como 5 veces la cantidad máxima promedio de pasos diarios, para asegurarse de que nunca va a existir sobre carga.

$$\text{Energía almacenada por paso} = 2.535\mu J$$

$$\text{Pasos diarios límite} = 6,250 \text{ pasos} \times 5$$

$$\text{Pasos diarios límite} = 31,250$$

$$\text{Energía de almacenamiento} = 79.22mJ$$

El tipo de capacitor elegido es electrolítico de aluminio. Si bien estos capacitores tienen una alta fuga de corriente cuando no se está utilizando, la fuga es proporcional al nivel voltaje que tiene el capacitor en ese momento. De acuerdo al regulador de voltaje, se requiere que el capacitor solo sea cargado hasta 0.5V y se descargue a 0.25V

$$W = 79.22mJ$$

$$W = \frac{1}{2} C V^2$$

5.2.5 Esquemático

El esquemático con todos los componentes detallados anteriormente se encuentra explicado en el apartado 3.1 del anexo.

5.3 Diseño mecánico del wearable

La presente sección detallará las consideraciones ergonómicas de la plantilla, seguido por los diseños del ensamble, subensambles y despiece del sistema. Todos los planos de las piezas mostradas a partir de la sección 5.3.2 se encuentran en el apartado 3.2 del anexo.

5.3.1 Consideraciones ergonómicas

Según un análisis dinámico de las presiones plantares, denominado también baropodometría, con una plantilla normal los metatarsianos y falanges proximales absorben el 43% del peso, seguido por el hueso calcáneo que absorbe el 57% como muestra la imagen 5-23. Se está considerando una plantilla con 17 mm de altura en total para distribuir esa presión uniformemente en 50-50. (Libotte, 2007)



Figura 5-22: Huesos del pie. Fuente: Anatomía Topográfica, 2021.

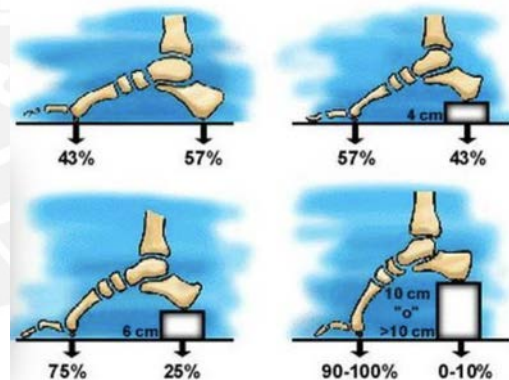


Figura 5-23: Reparto de cargas según la altura del talón. Fuente: C. Roldán, 2016.

Así mismo, el protector superior estará hecho de Sorbothane, un poliuretano viscoelástico patentado por 3M que cumple dos funciones principales: absorber el impacto generado por la pisada para aliviar el hueso calcáneo y adaptar la plantilla a la forma del talón. (Isolate It, 2018)

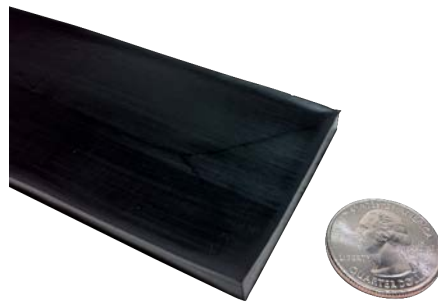


Figura 5-24: Polímero viscoelástico Sorbothane. Fuente: Isolate It, 2021.

5.3.2 Ensamble general, vista explotada y sub ensambles

5.3.2.1 Ensamble general

Considerando los estudios ergonómicos previamente analizados, el producto diseñado es una plantilla con medidas 70.35 mm de ancho, 106 mm de largo y 17 mm de alto. El presente diseño es solo para la planta del pie izquierdo, siendo necesario otra plantilla sin el sistema, para balancear la altura de los talones y que el usuario pueda caminar de forma normal. En la Figura 5-25 se observa la plantilla con el protector levantado, para mostrar el ensamble de los componentes al interior. El usuario tendrá acceso al interior, se usará una pegatina de seguridad en la parte inferior para sellar la carcasa principal con el protector de plantilla de forma hermética. Se contempla el diseño hermético para cumplir con la norma ATEX e IP67 visto en la tabla de requerimientos 4-2. La selección de materiales y las formas de fabricación se detallarán en el apartado de despiece 5.3.3.

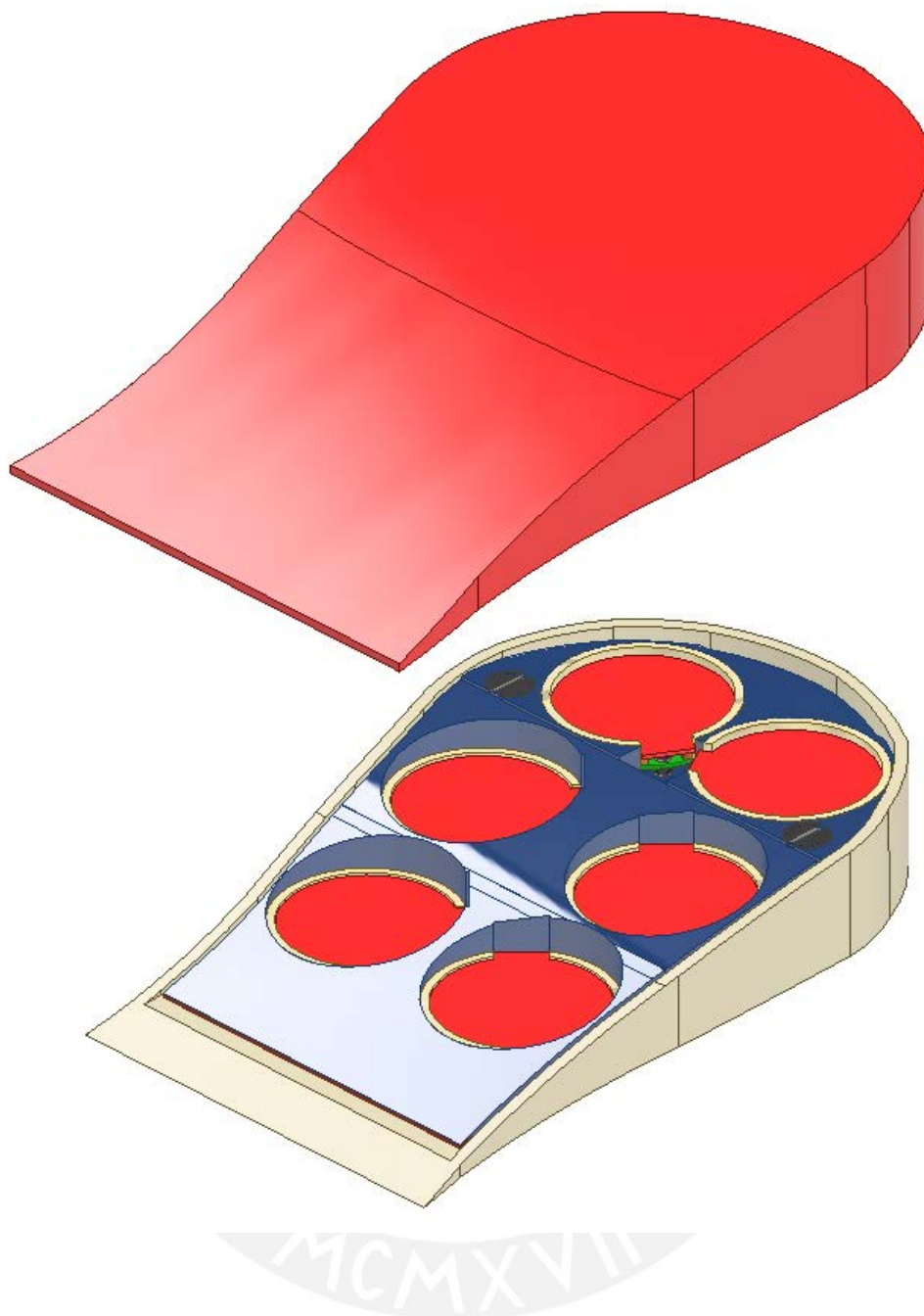
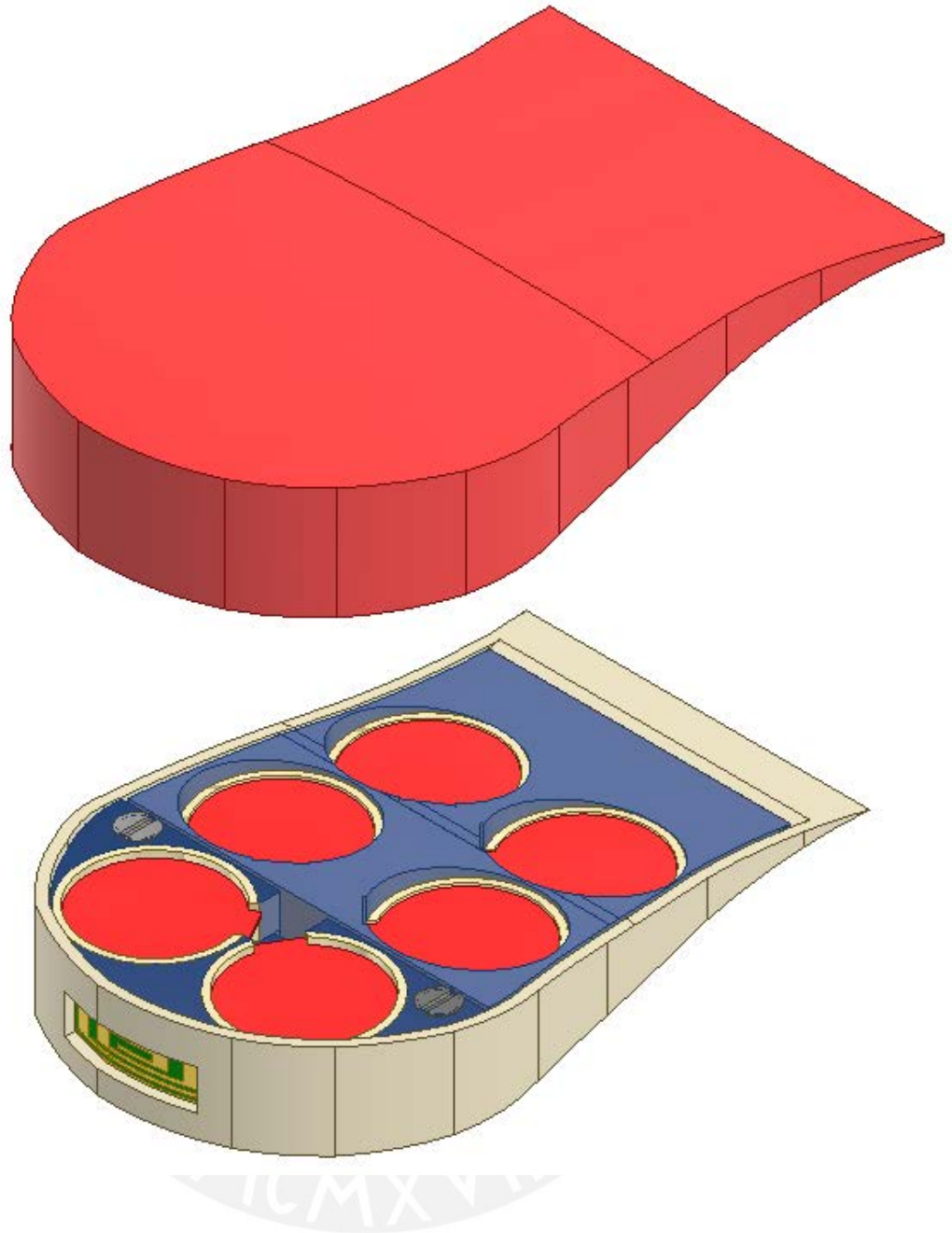


Figura 5-25: Vista ortogonal frontal. Fuente: Elaboración propia.

Se observan 6 circunferencias rojas, estos componentes son llamados recolectores de energía por que contienen los discos piezoeléctricos con un sistema de deformación diseñado para no dañar los discos. La plantilla contiene los 12 discos piezoeléctricos necesarios según los cálculos del apartado 5.2.4.2. En la Figura 5-26 de la vista ortogonal posterior se observa un compartimiento designado para la antena. Se consideró esta posición por dos motivos; ser la superficie perpendicular al suelo de mayor tamaño y ser un borde estratégico para la transmisión de la señal.



A continuación, se verá la vista explotada de todos los componentes al interior de la plantilla, la función de cada componente será explicado en apartados posteriores.

5.3.2.2 Vista explotada

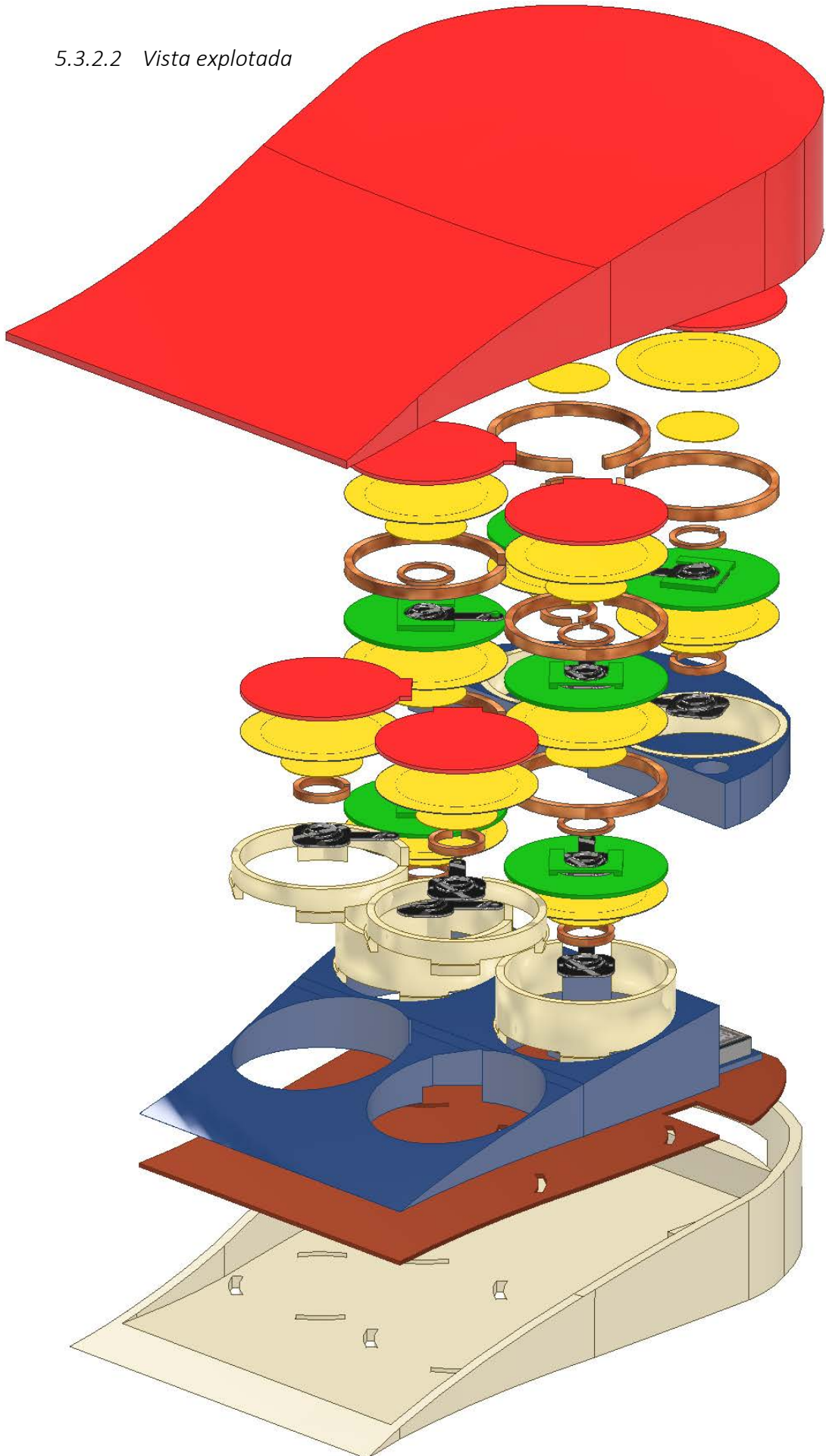


Figura 5-27: Vista explotada ortogonal frontal. Fuente: Elaboración propia.

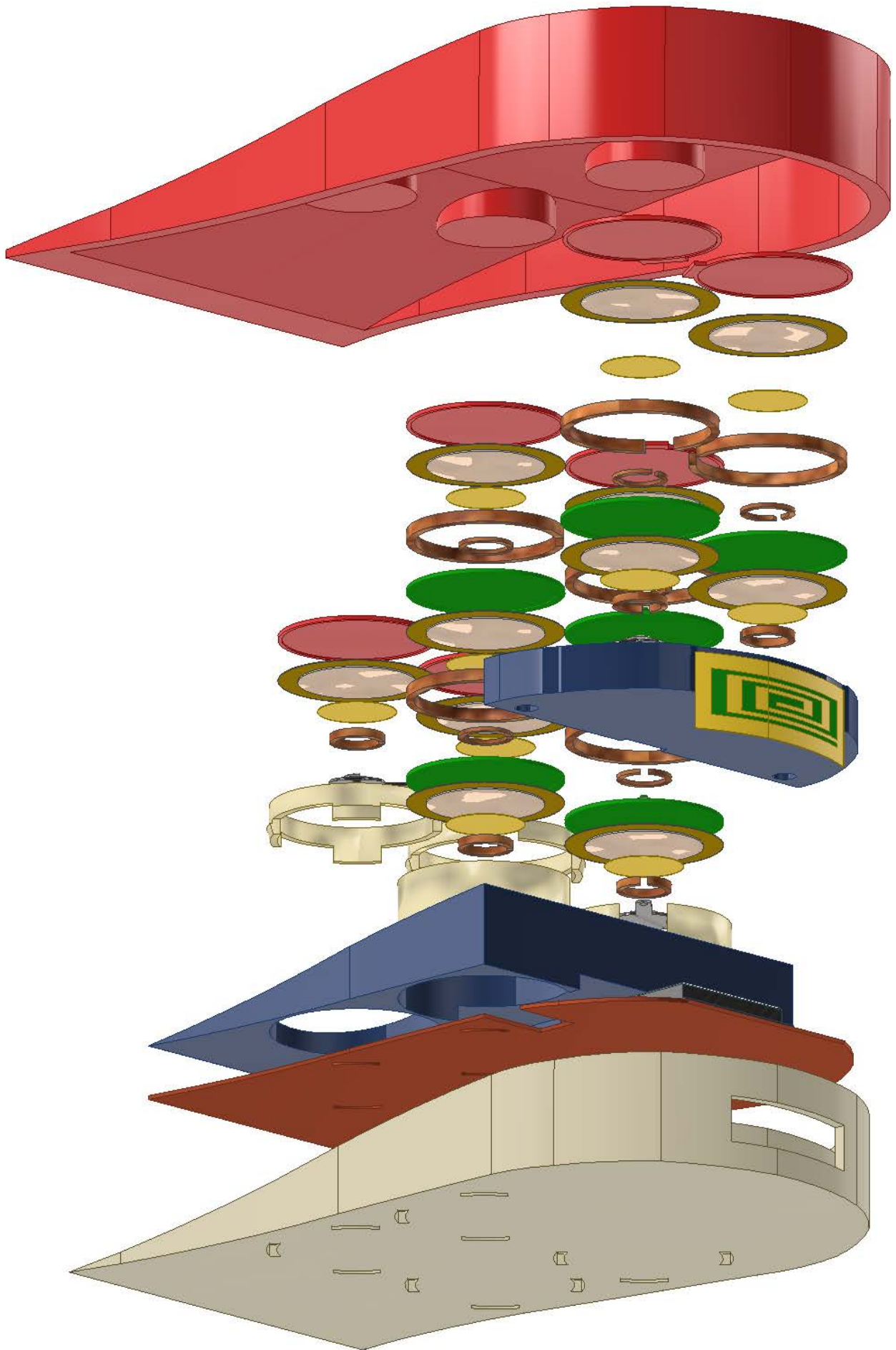


Figura 5-28: Vista explotada ortogonal posterior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.3 Sub ensamblés

Los recolectores de energía pueden ser vistos como sistemas independientes. Se determinó por medio de pruebas que para doblar un disco piezoeléctrico sin dañarlo las fuerzas aplicadas deberían ser de esta forma:

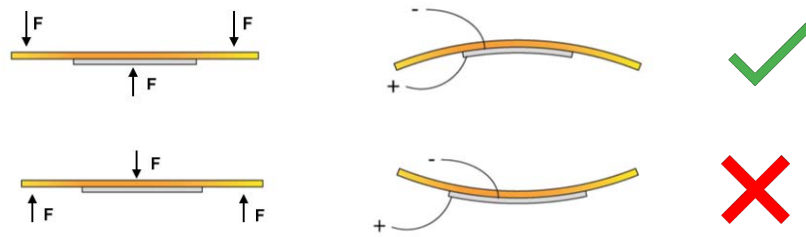


Figura 5-29: Doblez de piezoeléctrico sin daño. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se explicará el principio de funcionamiento de recolectores de 1, 2 y 3 discos respectivamente.

5.3.2.3.1 Recolector de 1 disco piezoeléctrico

El objetivo principal del recolector es deformar un disco piezoeléctrico sin dañarlo cuando se aplica presión en la tapa roja.

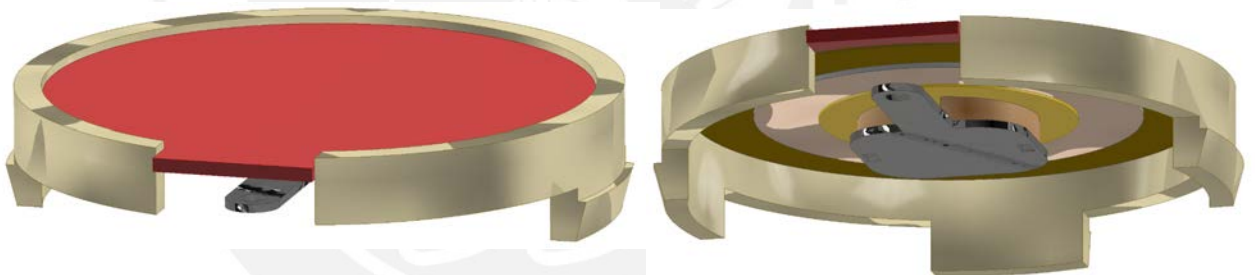


Figura 5-30: Ensamble de recolector de 1 disco piezoeléctrico, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

La figura 5-31 se muestra la vista explotada de la pieza. Cada parte cumple una función esencial en el recolector. Comenzando por el ítem 1, la tapa roja sirve para proteger al piezoeléctrico de estar en contacto directo con la plantilla. Como se observa de vista inferior la tapa tiene un desnivel cóncavo de 0.2 mm cuya función es dar el espacio necesario para la deformación del elemento piezoeléctrico. Se incluye una muesca en el diseño para evitar el giro de los componentes en su propio eje. El ítem 2 es la representación de los discos piezoeléctricos utilizados de 1 cm de radio y 0.2 mm de ancho. El ítem 3 es un disco de cobre de 0.2 mm de espesor y 1 cm de diámetro cuya función es estar en contacto con el cátodo (titanato zirconato de plomo). Este

disco va estar soldado al extremo del resorte de ítem 5. Entre el el ítem 3 y 5 se encuentra el ítem 4, llamado anillo protector inicial, cuyo material es caucho. La función principal de esta pieza es ser la base sobre la cual el disco va a obtener la fuerza normal, ocasionando el dobléz sin daño requerido por la Figura 5-29. Por otro lado, también cumple la función de proteger la deformación permanente del resorte del ítem 5 en caso se aplique un exceso de presión. El ítem 5, cuyo nombre es resorte de contacto variable, es el conductor de la electricidad generada por el cátodo del piezoeléctrico. Se utiliza un resorte por que se necesita un elemento flexible que pueda mantener el contactor del piezoeléctrico pegado al cátodo cuanto se está en posición de reposo y bajo compresión. La base de este resorte irá soldada al PCB. Por último se tiene el ítem 6, llamado soporte de recolector de un disco, encargado de proteger y evitar la torsión de todos los componentes descritos previamente. La fijación de este soporte será mediante muescas de enganche y estará en contacto directo con el PCB.

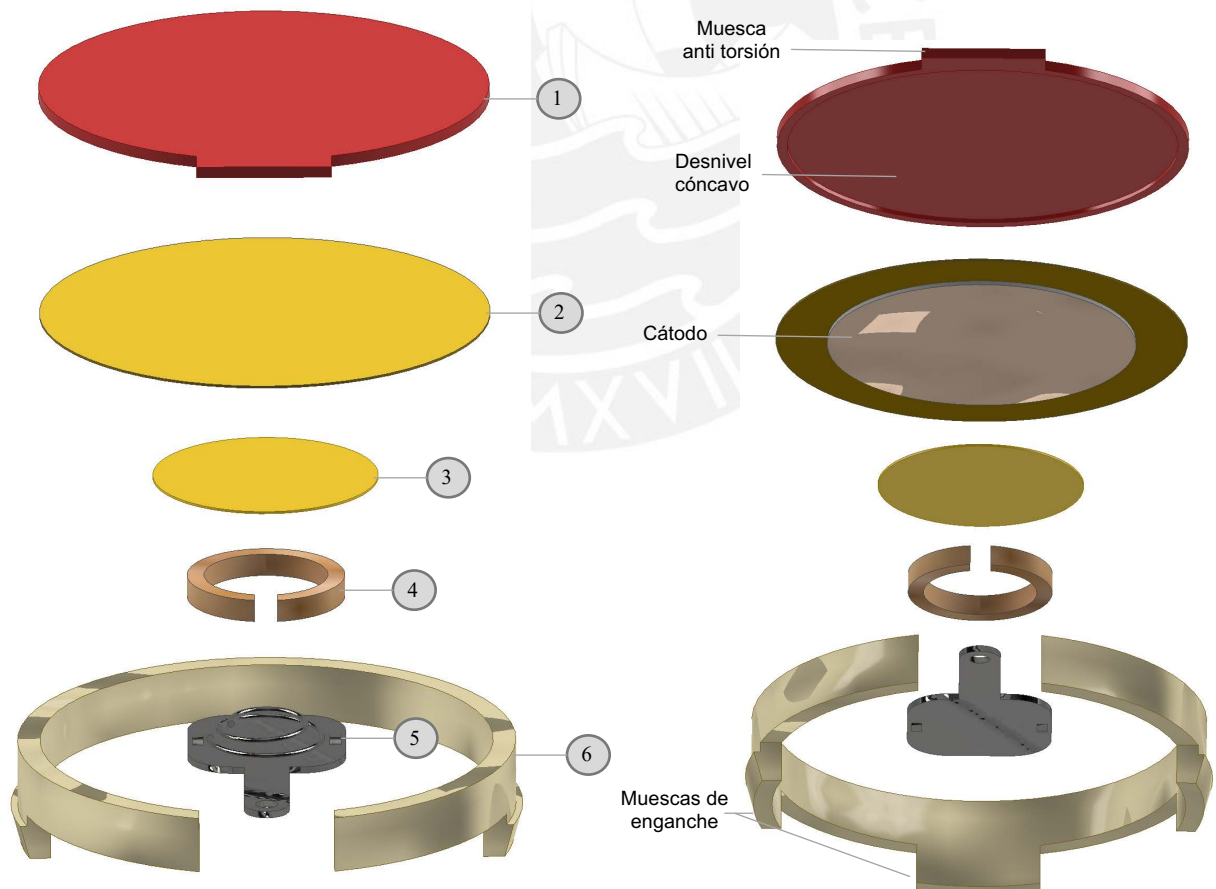


Figura 5-31: Vista explotada superior e inferior del recolector de 1 disco piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.3.2 Recolector de 2 discos piezoeléctricos

Este sub ensamble tiene el mismo objetivo que el anterior sin embargo utiliza 2 discos piezoeléctricos.

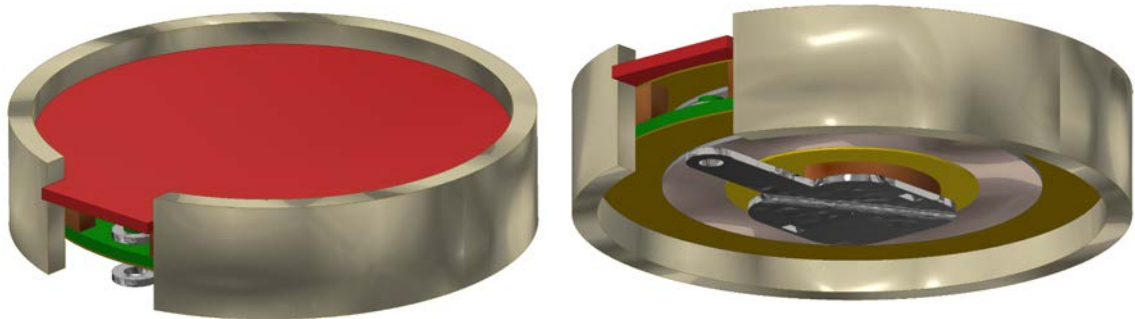


Figura 5-32: Ensamble de recolector de 2 discos piezoeléctricos, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la Figura 5-34 la vista explotada del recolector de 2 discos. En esencia sigue teniendo los mismos principios que recolector anterior y la mayoría de piezas se duplican. Se añadió unas piezas modificadas para soportar el acoplamiento. Entre las piezas nuevas se encuentra el ítem 3 llamado anillo transmisor de presión, su función es transmitir la presión ejercida por el pie hacia el piezoeléctrico inferior para que exista flexión en ambos. Su material contemplado es caucho. El ítem 5 se llama anillo protector medio y su función es la misma que el anillo protector inicial explicado en el apartado 5.3.2.3.1 con la diferencia de ser más delgado. El ítem 7 es la pieza que permite el acoplamiento entre piezoeléctricos llamado tapa media de recolector. Esta pieza permite la flexión del piezoeléctrico inferior (ítem 8) porque también tiene un desnivel cóncavo y al mismo tiempo acopla el resorte de contacto variable que se encuentra en la parte superior (ítem 6) como se muestra en la Figura 5-33.

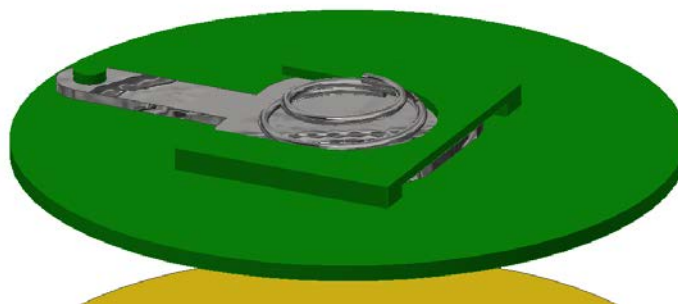


Figura 5-33: Acople entre la tapa media de recolector y el resorte de contacto variable. Fuente: Elaboración propia.

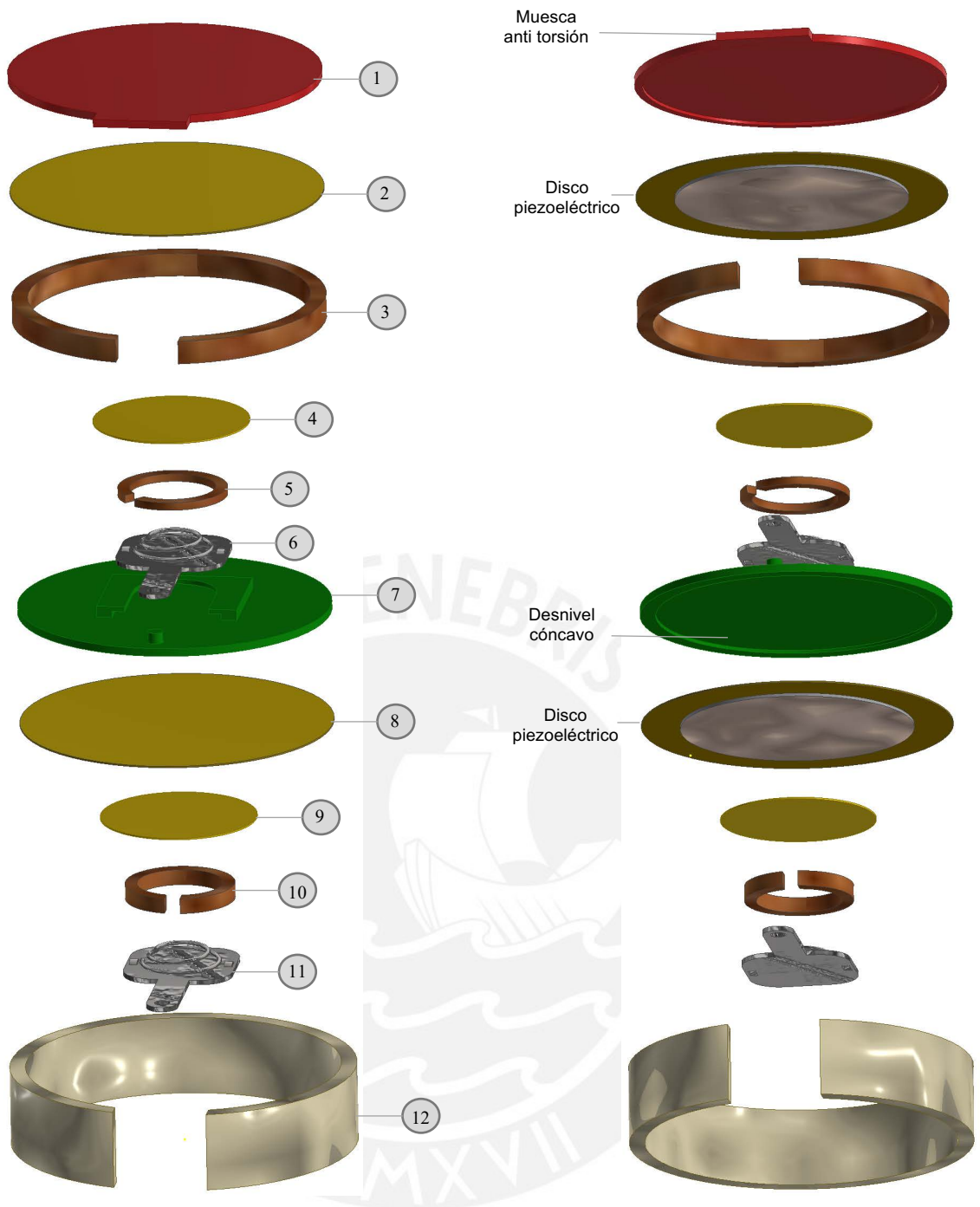


Figura 5-34: Vista explotada superior e inferior del recolector de 2 discos piezoeléctricos. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.3.3 Recolector de 3 discos piezoeléctricos

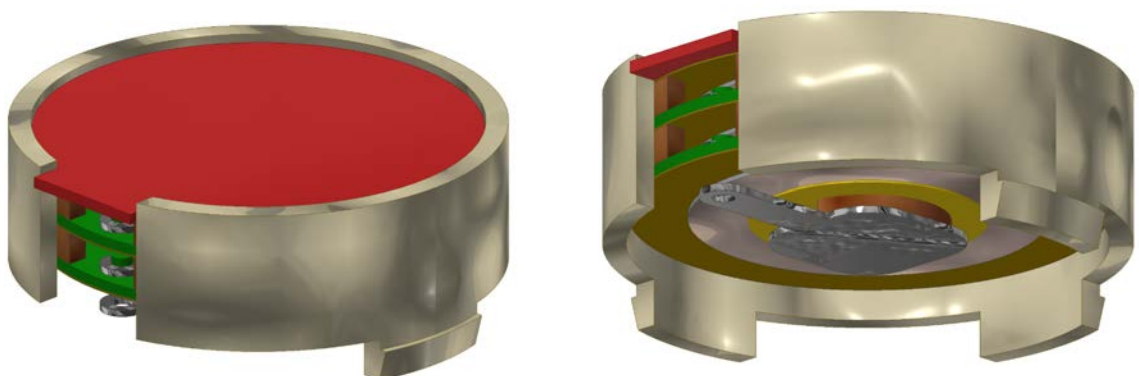
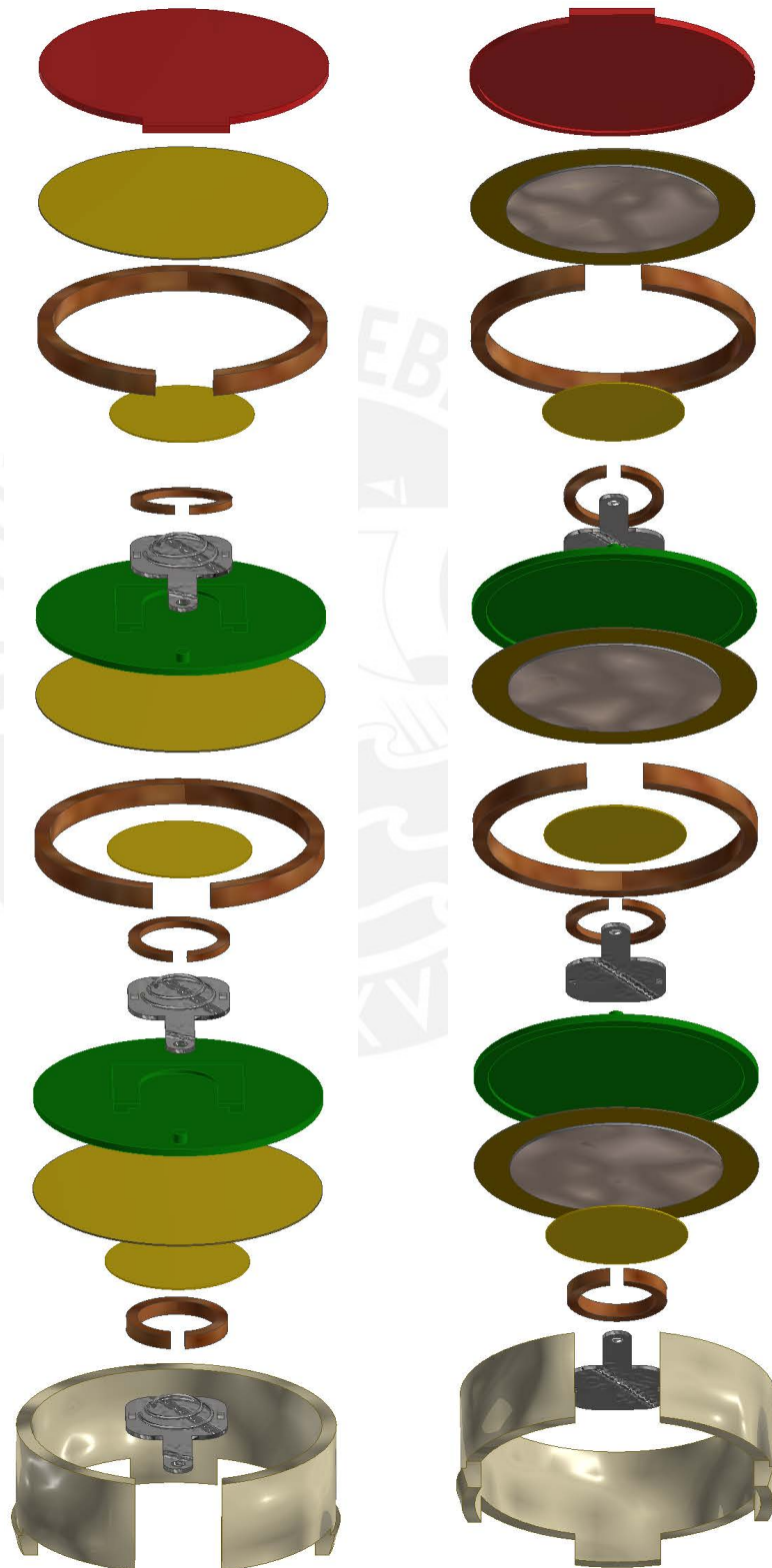


Figura 5-35: Ensamble de recolector de 3 discos piezoeléctricos, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5-36 el recolector de 3 discos piezoeléctricos utiliza el mismo sistema de acoplamiento contemplado en el recolector anterior. El concepto esta diseñado para ser escalable y ser utilizado en aplicaciones diversas.



*Figura 5-36: Vista explotada superior e inferior del recolector de 3 discos piezoeléctricos.
Fuente: Elaboración propia.*

5.3.3 Despiece

Los planos de las piezas presentadas a continuación se encuentran en el apartado 3.2 del anexo.

5.3.3.1 Protector superior de plantilla

El objetivo principal de esta pieza es proteger los componentes al interior de la plantilla y transmitir la presión del pie a los recolectores. Se observa de la Figura 5-37 que en la parte interior existen desniveles circulares para distribuir la carga a los recolectores de manera uniforme. El material seleccionado para la pieza es Sorbothane, un poliuretano visco elástico con la propiedad de absorber el impacto generado por la pisada y adaptar la plantilla a la forma del talón.

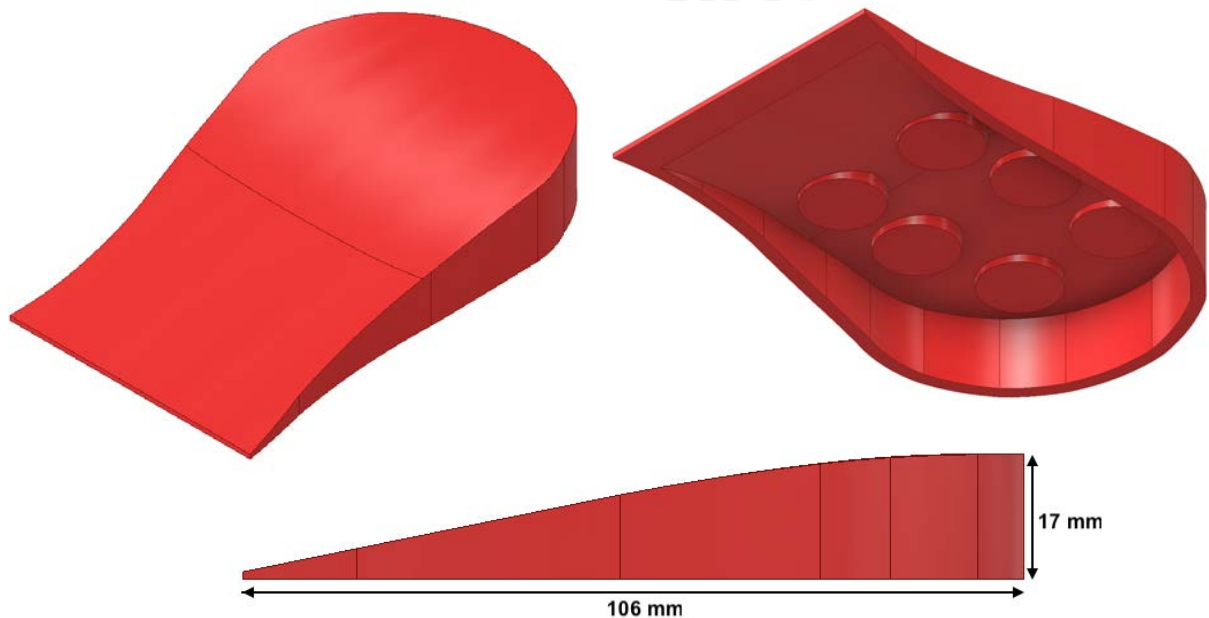


Figura 5-37: Vista ortogonal superior, inferior y lateral del protector superior de plantilla. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.2 Carcasa principal

El objetivo de esta pieza es ser la estructura rígida que soporta todos los componentes de la plantilla. Como se observa de la imagen 5-38 en la zona posterior se diseñó tres columnas de soporte, las primeras dos sirven para fijar la tapa principal a la estructura con tornillos M3x10 DIN7983. El tercero es para actuar como punto de soporte fijo y la antena. Estas tres columnas permiten tener un espacio para colocar los componentes electrónicos mostrado en la figura 5-39. Así mismo, se observa agujeros en la carcasa, con la finalidad de permitir el acoplamiento de los recolectores al PCB.

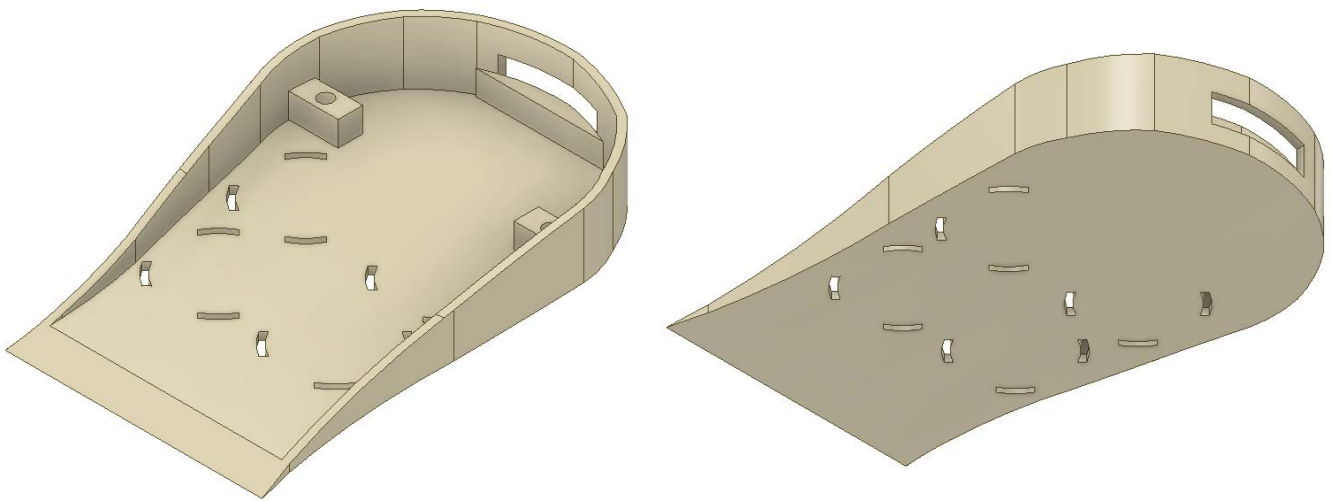


Figura 5-38: Vista ortogonal superior e inferior de la carcasa principal. Fuente: Elaboración propia.

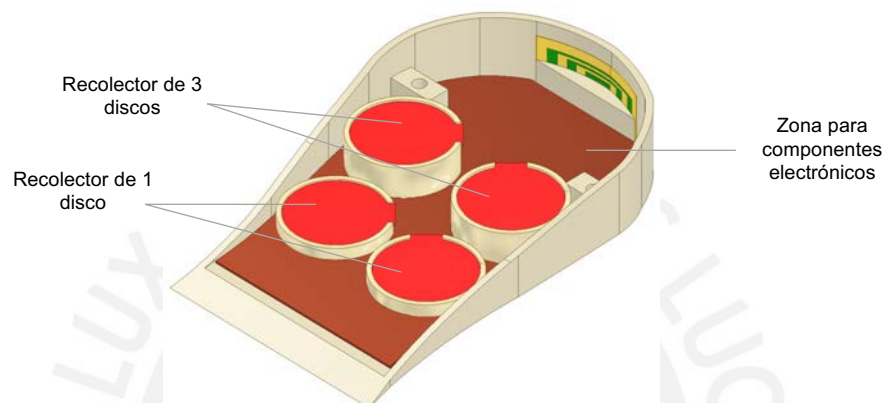


Figura 5-39: Vista del espacio para los electrónicos y los recolectores acoplados. Fuente: Elaboración propia.

Se consideró una sección vacía en el borde para acoplar la antena y transmitir óptimamente la señal. El material contemplado es el polímero ácido poli láctico o PLA debido a su dureza y propiedad biodegradable.

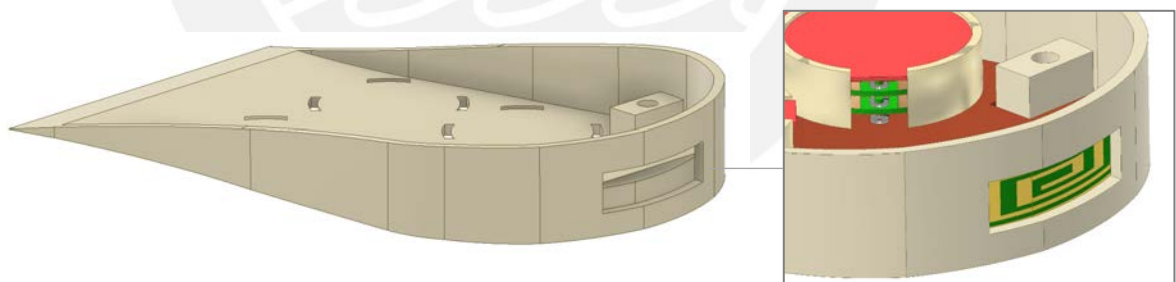


Figura 5-40: Vista de la posición para acoplar la antena. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.3 Soporte principal

La función del soporte principal es resistir una parte del peso del cuerpo, para que éste no sea aplicado con totalidad a los recolectores, pudiendo dañarse. Se contempla en la vista ortogonal inferior de la Figura 5-41 que se deja un desnivel cóncavo para que los cables provenientes de los recolectores con los voltajes generados se puedan colocar directamente al PCB. El modo de fabricación sería inyección de plástico con una matriz previamente realizada y el material contemplado es plástico PLA.

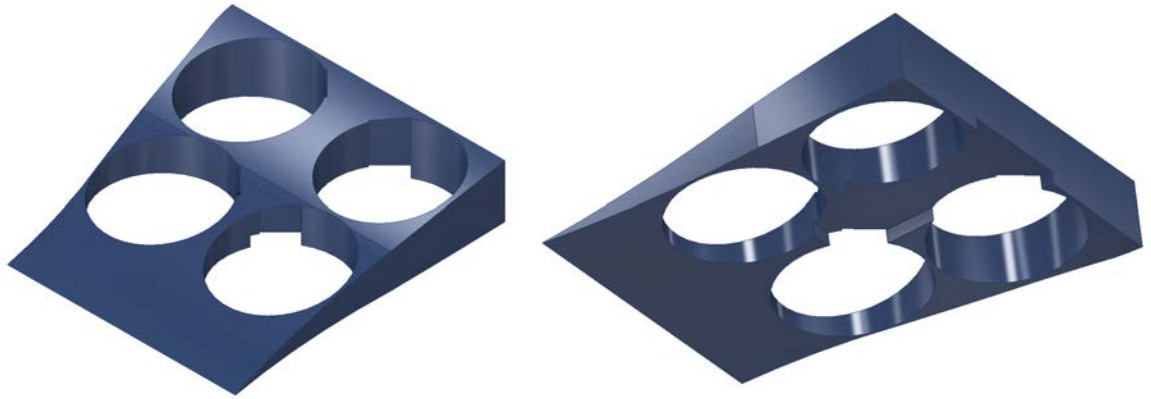


Figura 5-41: Vista ortogonal superior e inferior del soporte principal. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, debido a los chaflanes interiores, esta pieza evita que se generen fuerzas de torsión en los recolectores.

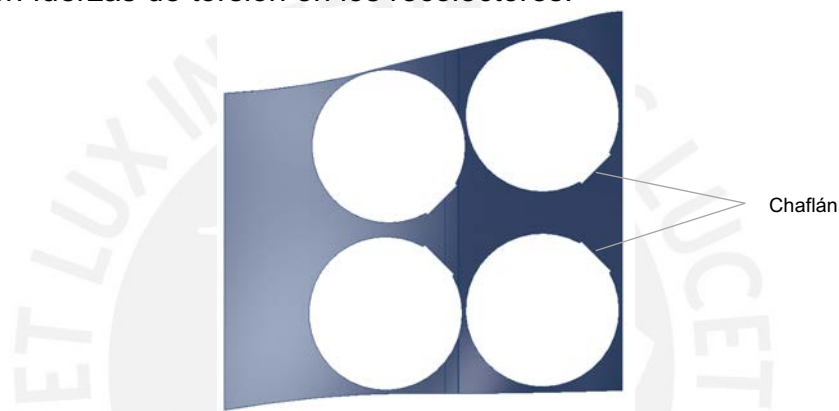


Figura 5-42: Vista superior del soporte principal. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.4 Tapa principal

La tapa principal se encarga de proteger la zona de componentes electrónicos de la Figura 5-39. Esta pieza acopla los recolectores de dos discos piezoeléctricos. También cuenta con un desnivel que permite el paso de los cables hacia la zona electrónica. Se colocó una división entre el espacio de los recolectores para que esa columna no permita el movimiento rotacional. En la parte posterior se dejó un desnivel que permite el posicionamiento de la antena.

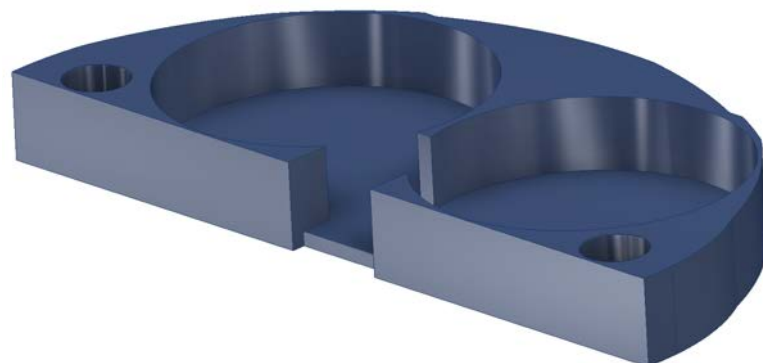


Figura 5-43: Vista ortogonal superior de la tapa principal. Fuente: Elaboración propia.

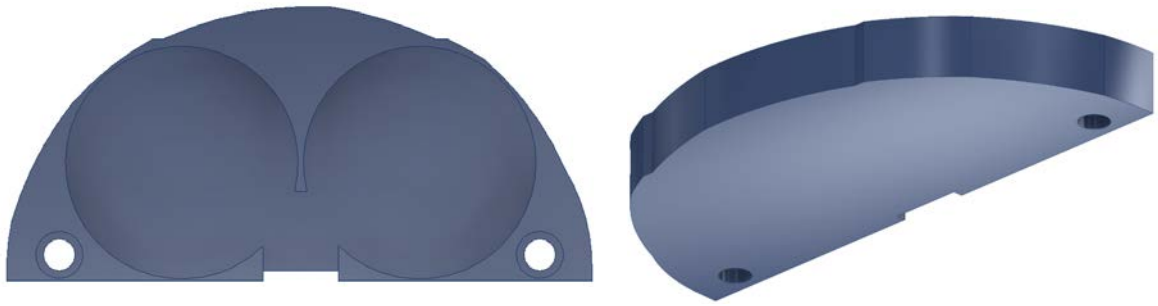


Figura 5-44: Vista superior y ortogonal inferior de la tapa principal. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo se observa en la Figura 5-45 que tiene unos agujeros pasantes en los extremos para poder fijarse con dos tornillos M3x10 DIN7983 a la carcasa principal.

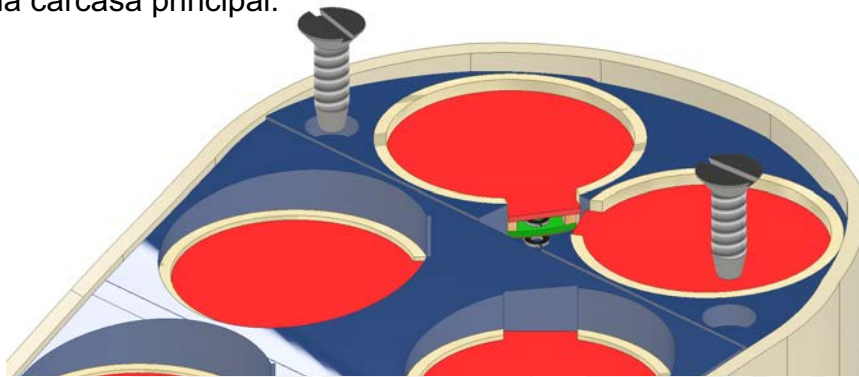


Figura 5-45: Posición de los tornillos en la tapa principal. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.5 Soporte de recolector de 1 disco

Como su nombre lo indica, su función principal es fijar y proteger los componentes del recolector de un disco. Las muescas inferiores sirven para acoplarse al PCB. El material de los soportes de recolectores será PLA.



Figura 5-46: Soporte de recolector de un disco, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.6 Soporte de recolector de 2 discos

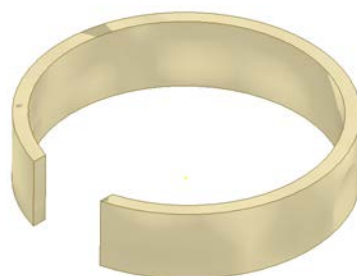


Figura 5-47: Soporte de recolector de dos discos. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.7 Soporte de recolector de 3 discos

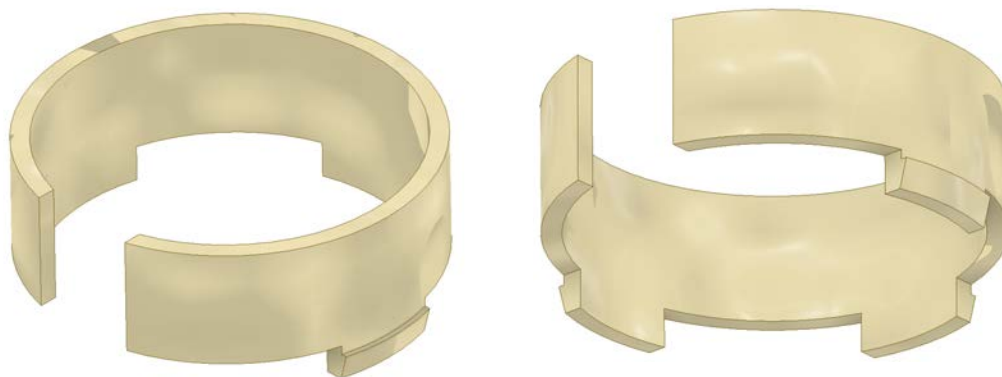


Figura 5-48: Soporte de recolector de tres discos, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.8 Tapa de recolector

Su función principal es permitir la flexión controlada del disco piezoeléctrico y evitar que los componentes al interior del recolector roten en su propio eje. El material contemplado es PLA.

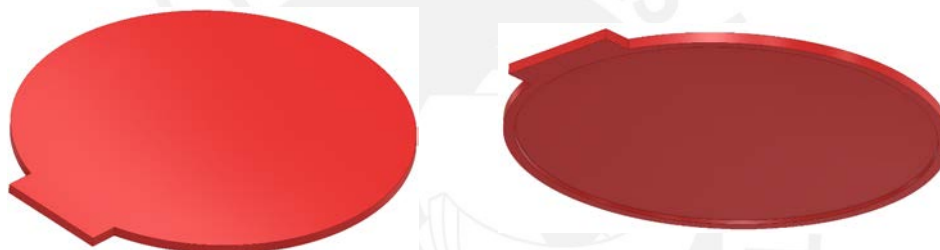


Figura 5-49: Tapa de recolector, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.9 Disco piezoeléctrico

Se soldará un cable en la superficie inferior del cobre del disco piezoeléctrico. Este cable irá conectado al PCB cuya terminal se llamará ánodo.

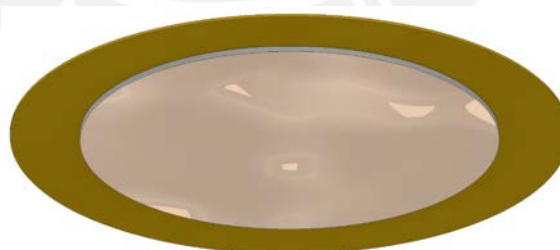


Figura 5-50: Disco piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.10 Contacto del cátodo

Consiste en un disco de cobre de 0.2 mm de espesor y 10 cm de ancho cuya función está explicada a detalle en el apartado 5.3.2.3.1



Figura 5-51: Contacto del cátodo, vista superior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.11 Anillo protector inicial

Se considera una abertura en el anillo para que pueda ingresar entre el contacto del cátodo y el resorte de contacto variable después de que estos sean soldados. El material de este anillo es de caucho, su diámetro interior es 5.5 mm, diámetro exterior 7 mm y espesor 1 mm.

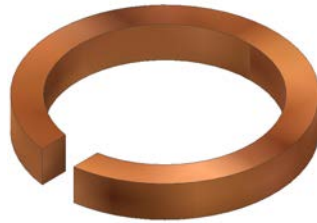


Figura 5-52: Anillo protector inicial, vista superior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.12 Anillo protector medio

Tiene la misma función que el anillo protector inicial, pero se utiliza para piezoeléctricos que no están en el primer nivel. Se diseñó el espesor a 0.5 mm por que se soportará sobre la tapa.

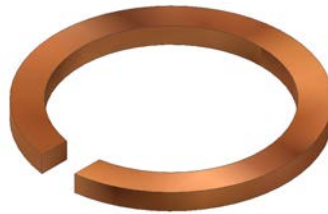


Figura 5-53: Anillo protector medio, vista superior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.13 Anillo transmisor de presión

El funcionamiento del anillo transmisor de presión está detallado en el apartado 5.3.2.3.2. El material utilizado será caucho. El diámetro exterior es de 20 cm y tiene 1.5 mm de espesor.



Figura 5-54: Anillo transmisor de presión, vista superior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.14 Resorte de contacto variable

El resorte de contacto variable es un contacto de batería triple A utilizado comúnmente en los dispositivos electrónicos con pilas. Se eligió por tener una amplia variedad de medidas comerciales y ser de bajo costo.



Figura 5-55: Resorte de contacto variable, vista ortogonal superior y lateral. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.15 Tapa media de recolector

La tapa media de recolector está diseñada para portar el resorte de contacto variable como se observa en la Figura 5-33. Su funcionalidad está detallada en el apartado 5.3.2.3.2 El material seleccionado es plástico PLA.

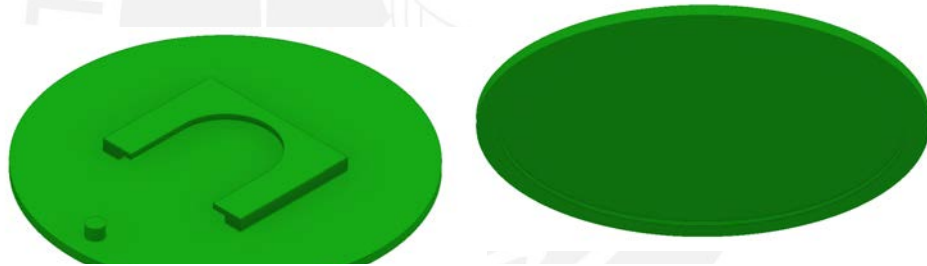


Figura 5-56: Tapa media recolectora, vista superior e inferior. Fuente: Elaboración propia.

5.3.3.16 Consideraciones mecánicas – eléctricas

El diseño está realizado para colocar una antena plana flexible de 27 mm de largo, 10 mm de ancho y 1 mm en el espacio visto en la Figura 5-40.



Figura 5-57: Antena del wearable. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la baquelita del PCB debe tener una forma mecanizada especial para ingresar en la plantilla y fijar los componentes. Se está considerando fibra de vidrio FR – 4 de espesor $\frac{1}{64}$ pulgadas.

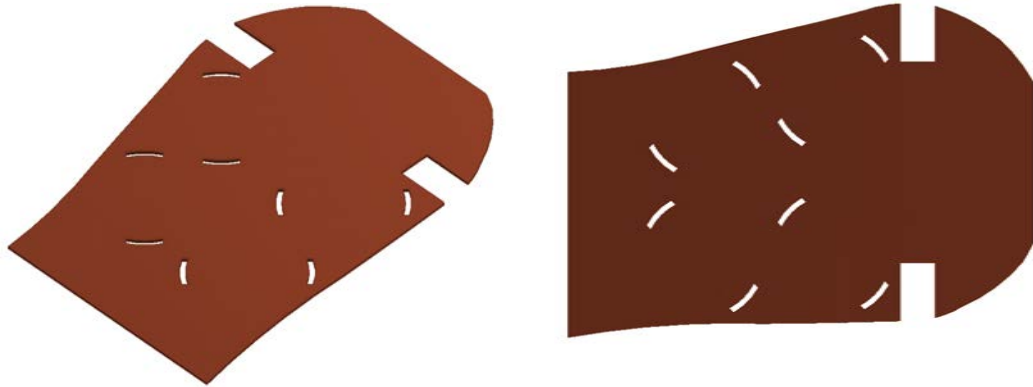


Figura 5-58: Forma del PCB. Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Análisis ambiental

Las consideraciones ambientales de diseño y deposición según la Norma Técnico Peruana 900.064 se encuentran detalladas en el capítulo 4 del anexo.

5.4 Diseño de sistema de localización e identificación en interiores

En principio, con un enfoque general se explicará cual es la infraestructura de soporte que se debe tener en consideración para soportar el sistema creado. Se desarrollarán las estructuras de funciones de los dispositivos externos al wearable, diagramas de comunicaciones y mapas de cómo se vería el sistema implementado en el piso de un edificio. En segundo lugar, se realizará un experimento para obtener los datos de las señales generadas por los elementos piezoeléctricos, se procesará la data inicial para analizar los parámetros de identificación relevantes extraíbles de la caminata de un usuario. Finalmente se desarrollará un diagrama de flujo para el procesamiento de los datos adquiridos a través de un microcontrolador con el objetivo de identificar cuando el wearable ha sido cambiado de persona.

5.4.1 Infraestructura de soporte

Se determinó en el apartado 4.4.1 que el wearable no es capaz de transmitir su ubicación por cuenta propia. Se requieren de 3 puntos fijos en el espacio para que el wearable pueda enviar una señal y a través de RSSI, explicado en el apartado 2.2.2, poder triangular la posición del dispositivo que transmite la señal. Por este motivo, se requieren dispositivos con funcionalidades distintas para soportar el sistema de identificación y localización inalámbrico dentro de un inmueble, mostrados en la Figura 5-64. Los cuatro dispositivos propuestos son:

- **Receptor:** Capta la información de los transmisores incluyendo la intensidad de la señal y los retransmite al localizador.
- **Localizador:** Escucha al transmisor y con la señal de dos receptores predeterminados realiza la trilateración.
- **Bus:** Cumple la misma función que el localizador, pero además retransmite las señales mandadas por otros buses en dirección del nodo maestro.
- **Nodo Maestro:** Se alimenta de data de los buses y decodifica la información para ser visualizada por una interfaz de usuario.

La Figura 5-57 muestra el diagrama de comunicaciones que debe ser instalado en un inmueble para que el sistema de localización funcione.

5.4.1.1 Diagrama de comunicaciones

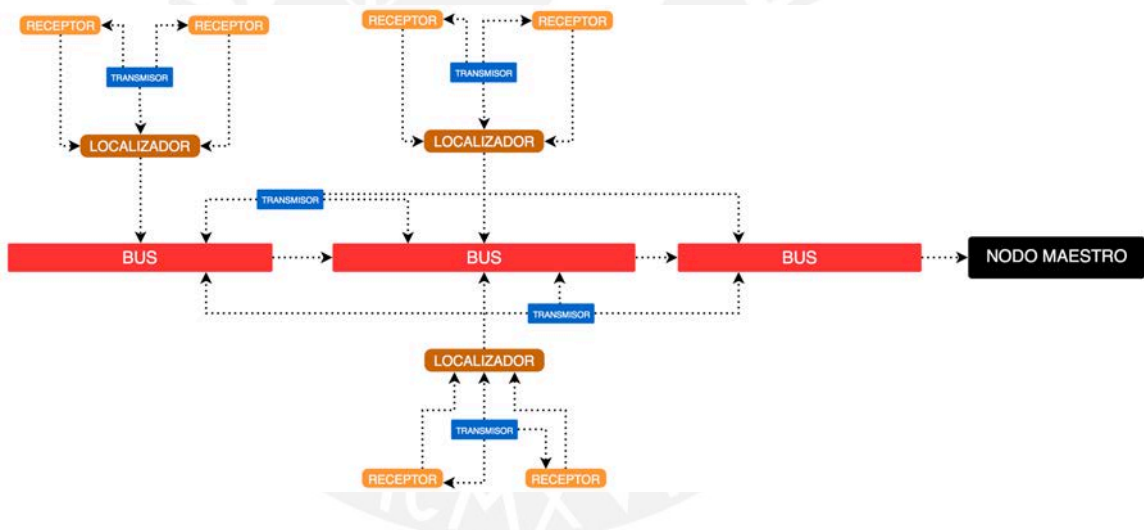


Figura 5-59: Diagrama de comunicación en la malla. Fuente: Elaboración propia.

Cada dispositivo se divide en subsistemas de mecánica, energía, control, comunicación, seguridad, sensores, almacenamiento, backend e interfaz de usuario.

5.4.1.2 Receptor

Este dispositivo se encarga de identificar la señal del transmisor para medir la fuerza de su señal y estimar una distancia. Esta distancia posteriormente se envía al localizador para que pueda realizar la trilateración y encontrar la ubicación exacta de un transmisor en un espacio determinado. Como el receptor es un punto fijo, regulará el voltaje de un enchufe para

alimentar a los componentes eléctricos. Una vez encontrada la distancia de los transmisores presentes, enviará este dato a un localizador predeterminado de forma encriptada.

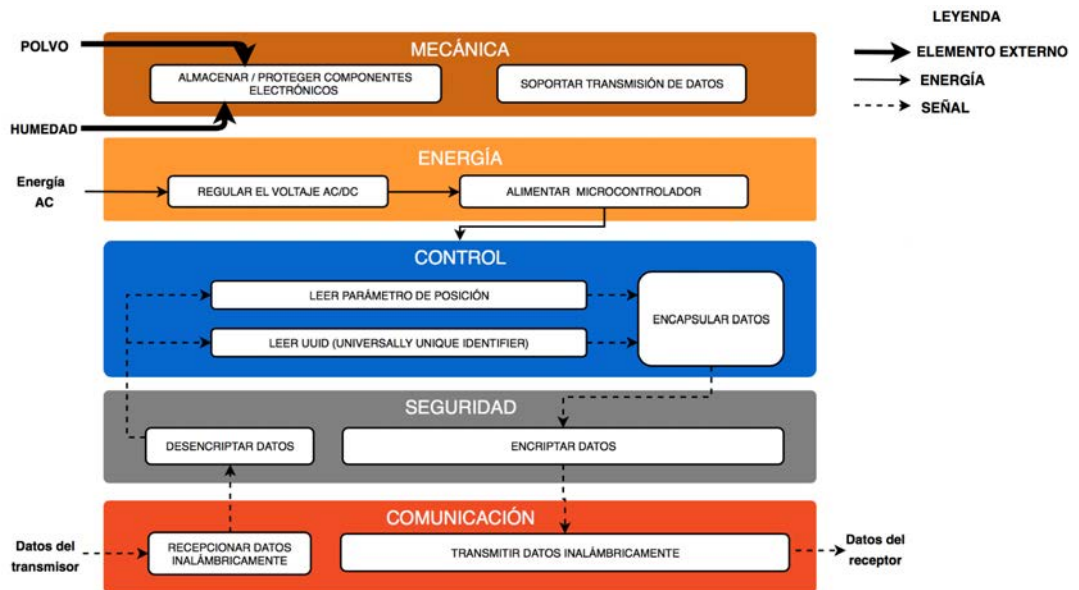


Figura 5-60: Estructura de funciones del receptor. Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.3 Localizador

Los localizadores también reciben la señal de los transmisores y determinan una distancia. Incluyendo los datos de los receptores se tendrán tres puntos fijos y tres distancias determinadas por cada transmisor, con esta información se tiene todo lo necesario para realizar una trilateración y plasmar a cada persona como un punto fijo en el espacio. Así mismo se leerá errores en caso no encuentre uno de sus dos receptores designados.

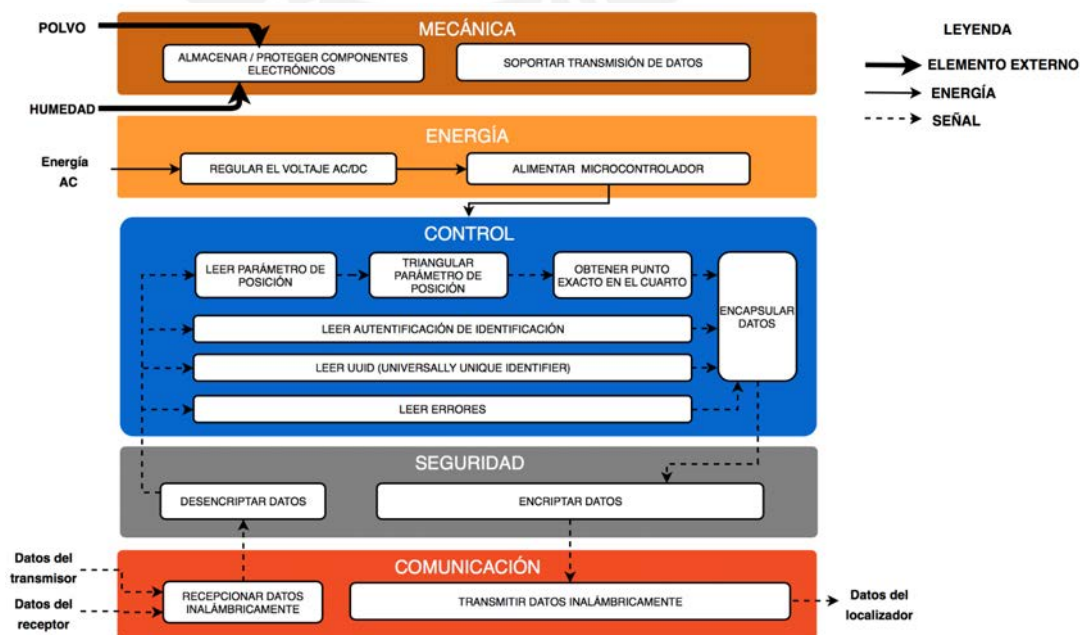


Figura 5-61: Estructura de funciones del localizador. Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.4 Bus

Se encargan de transmitir los datos de los localizadores en la red para enviar la información en dirección nodo final. También actúan como receptores y localizadores. Receptores porque determinan la distancia a la que se encuentra un transmisor y retransmitirla. Localizadores porque si hay distancias recibidas proveniente de dos buses anteriores, con la distancia que el bus actual determine se tendrán los tres puntos y tres distancias necesarias para realizar la trilateración y transmitirlo a otros buses. Por otro lado, leerán errores en caso se hayan perdido señales de localizadores y receptores. Esta unidad es un punto fijo que adquirirá su energía de la red de 220V. Este nodo usualmente irá en los pasillos o en zonas altamente transitadas.

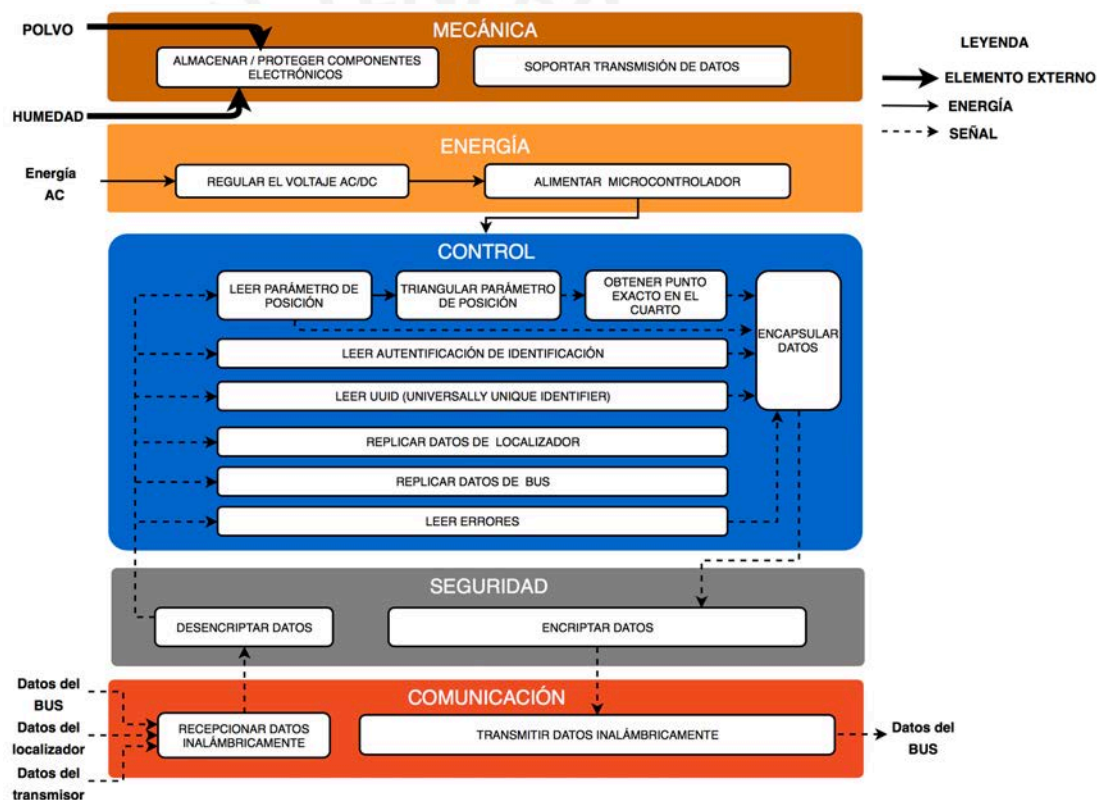


Figura 5-62: Estructura de funciones del bus. Fuente: Elaboración propia.

5.4.1.5 Nodo Maestro

El nodo maestro decodifica toda la información proveniente del BUS para transmitir los datos vía cable USB a una computadora, así mismo se aprovechará esta conexión para alimentar al dispositivo. La información del bus pasa a segmentarse por el backend de un programa y asocia los datos segmentados de cada ID con un trabajador. Esta información debió estar previamente establecida por un usuario maestro que requiere de una

autenticación para configurar los datos del sistema. Los datos configurables son el transmisor asignado a un trabajador en particular y las coordenadas en el inmueble de los receptores, localizadores y buses. Esta información se guarda en una base de datos local y el backend relaciona los datos de los transmisores con cada trabajador. La data relacionada se muestra en una interfaz gráfica en forma de mapa como pantalla principal.

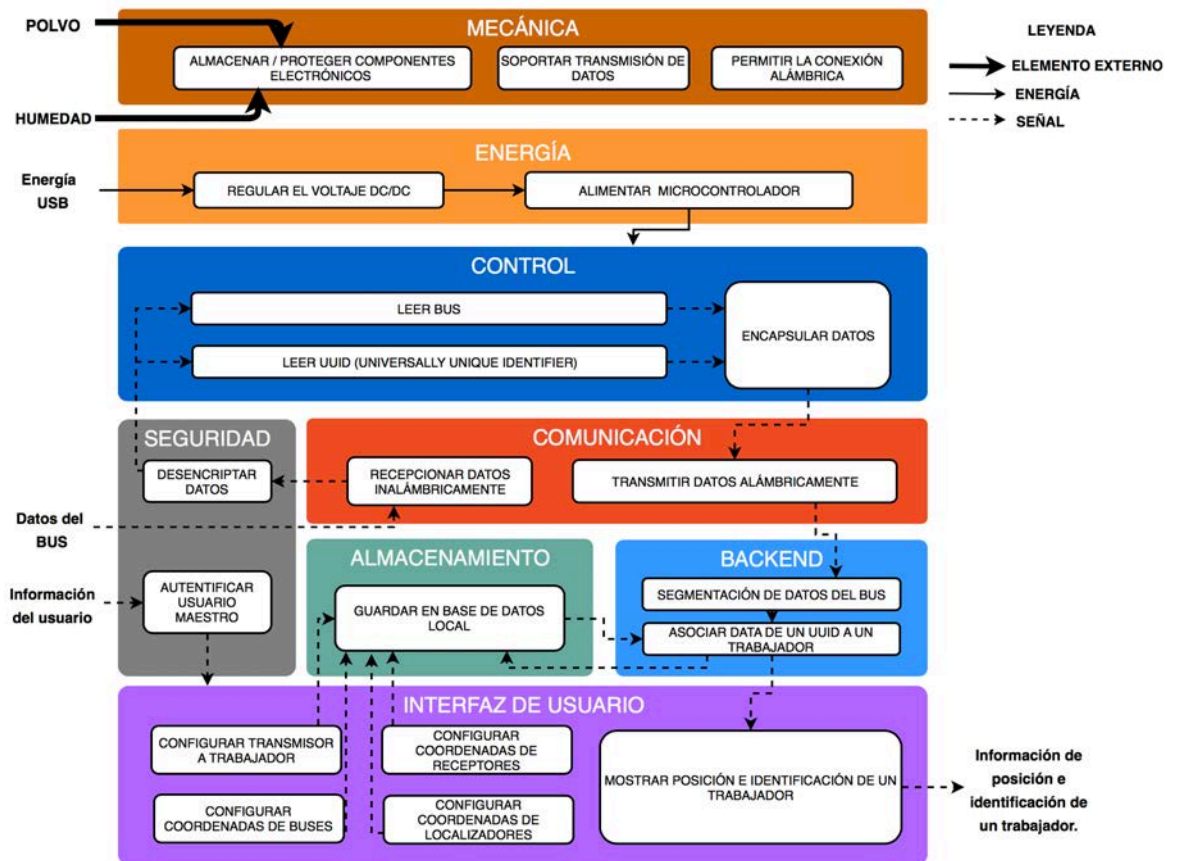


Figura 5-63: Estructura de funciones del nodo maestro. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Esquema de localización

En la Figura 5-64 se encuentra el esquema de localización. Se observa que en cada cuarto se requiere dos receptores y un localizador para triangular la ubicación exacta del wearable o transmisor. Una vez que el localizador obtiene la posición, lo envía hacia el bus para posteriormente direccionar toda la data de la posición de los usuarios y ubicación hacia el nodo maestro. Por otro lado, si no se desea precisión exacta en la ubicación y se desea saber si alguien está en un cuarto en específico, colocando un transmisor es suficiente para saber que una persona se encuentra ahí.

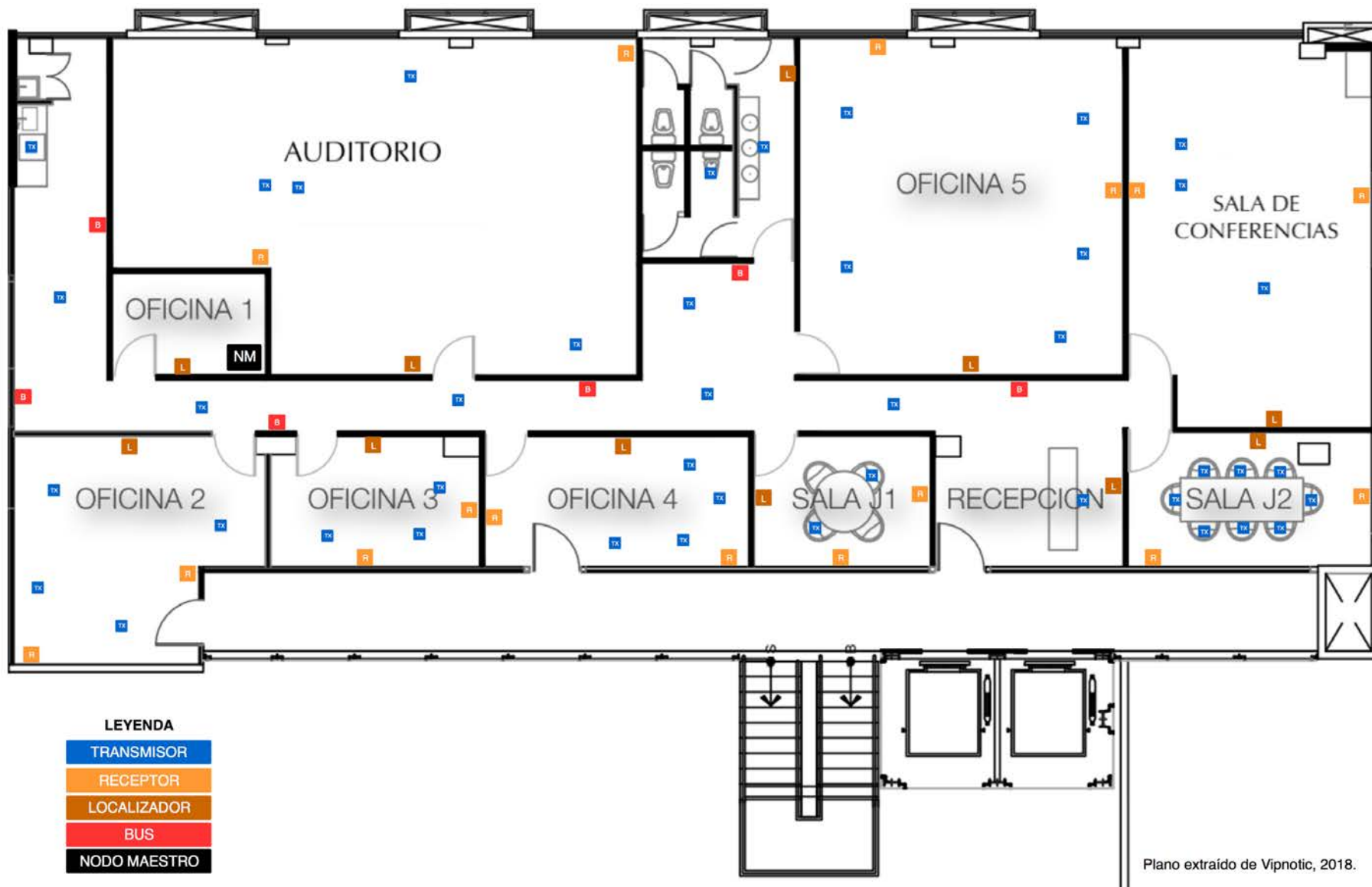


Figura 5-64: Esquema de localización de nodos. Fuente: Plano extraído de Vipnotic, 2021.

5.4.3 Método de identificación con elementos piezoeléctricos

Se diseñó el sistema de recolección de energía con tres piezoeléctricos que se conectan al ADC del microcontrolador. El propósito de este diseño es obtener un patrón de voltaje generado por el piezoeléctrico cada vez que el usuario camina. Con estos patrones identificados se podrá obtener un modelo adaptativo de la caminata del usuario.

El diagrama de flujo está creado a partir pruebas realizadas a 7 personas de distintos pesos. Se explicará a detalle después de exponer el siguiente experimento, cuyos resultados son las bases para la lógica posterior.

5.4.3.1 Experimento

Se realizaron pruebas a 7 personas distintas de manera individual. La prueba consistía en colocarse dos plantillas y caminar. En la plantilla del pie izquierdo se encontraba el mismo piezoeléctrico con el que se realizaron las experimentaciones de energía, de 20 mm de diámetro. La plantilla derecha servía para balancear las alturas. En la Figura 5-65 se observa la plantilla utilizada.

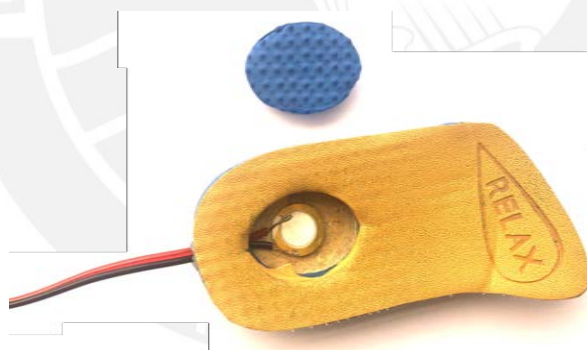


Figura 5-65: Plantilla con piezoeléctrico utilizado para las pruebas. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el usuario se colocaba las plantillas, la prueba consistía en caminar por un pasadizo recto de 15 metros ida y vuelta, variando la velocidad. Para explicar a detalle el procedimiento, en la Figura 5-66 se representa la prueba.

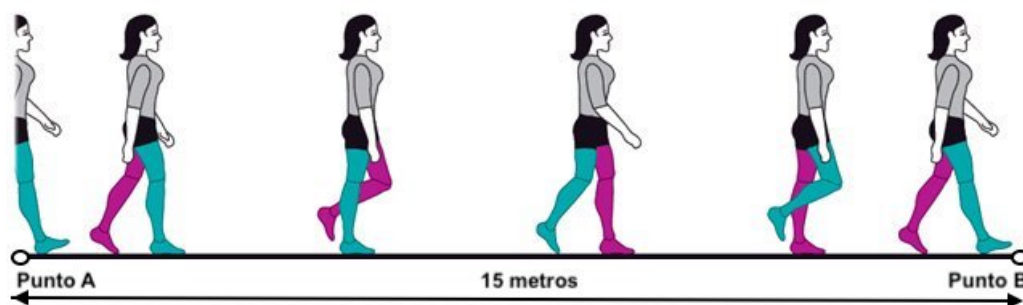


Figura 5-66: Representación gráfica de la prueba. Fuente: Optogait, 2015.

Se inicializaba la toma de datos mientras el usuario estaba estático en el punto A, después procedía a caminar lento hasta el punto B. El usuario volteaba sin detenerse en el punto B y regresaba hacia el punto A, en donde finalizaba la toma de muestras. Esta prueba se repitió con caminata a velocidad normal, rápida y trote.

Por último, se realizaba una prueba donde en una única muestra de datos, el usuario caminaba consecutivamente de A hacia B y viceversa a velocidad lenta, de A a B y viceversa a velocidad normal, de A a B y viceversa a velocidad rápida y de A a B y viceversa trotando. En la sección 5 del anexo se observan las gráficas de los datos obtenidos.

La gráfica de la última prueba con tomas consecutivas se observa en la Figura 5-67. Se puede notar que la velocidad es directamente proporcional a la amplitud del voltaje generado por el disco piezoeléctrico. Así mismo, cada persona tiene patrones de caminata reconocibles en el tiempo. Se analiza también que los patrones de caminata de una persona cuando está caminando lento, no es la misma cuando trota, por lo tanto, se necesitarán parámetros de reconocimiento proporcionales a la velocidad con la cual camina el usuario. La Figura muestra dos datos de colores distintos porque los elementos piezoeléctricos tienen dos terminales observables en la Figura 5-65. La data fue tomada con el circuito de identificación detallado en la Figura 5-5 en donde ADC A0 es el terminal conectado al ánodo y ADC A1 es el terminal conectado al cátodo del disco piezoeléctrico.

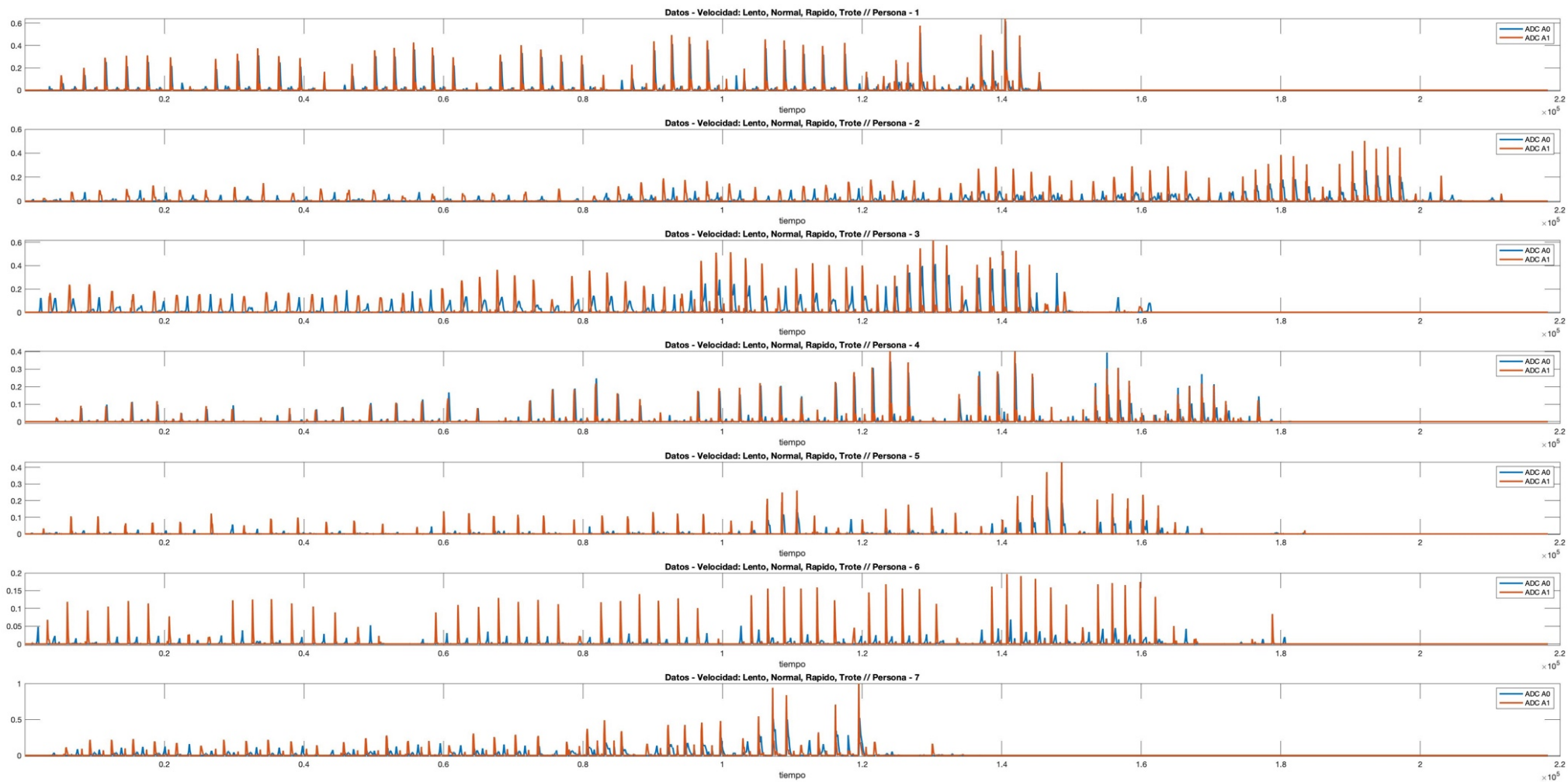


Figura 5-67: Patrones de caminata con distintas velocidades para una misma persona. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.2 Pre procesamiento de la data inicial

Utilizando el software Matlab, se pre procesó la data proveniente del ADC de un ESP32, microcontrolador con el cual se realizaron las pruebas. En principio se graficó todas las pruebas obtenidas y se eliminó aquellas pruebas que habían tenido una falla en la adquisición de datos, pasando de 10 personas estudiadas a 7. El ruido de la data se eliminó con un filtro pasa bajos, como se observa en la Figura 5-68. Posteriormente se analizó de todos los datos generados cuál era el valor del ADC más alto, para dividir todos los valores entre ese dato y normalizar el rango de todas las gráficas entre un valor cercano a 0 y 1. Todo el código utilizado se encuentra en capítulo 6 del anexo.

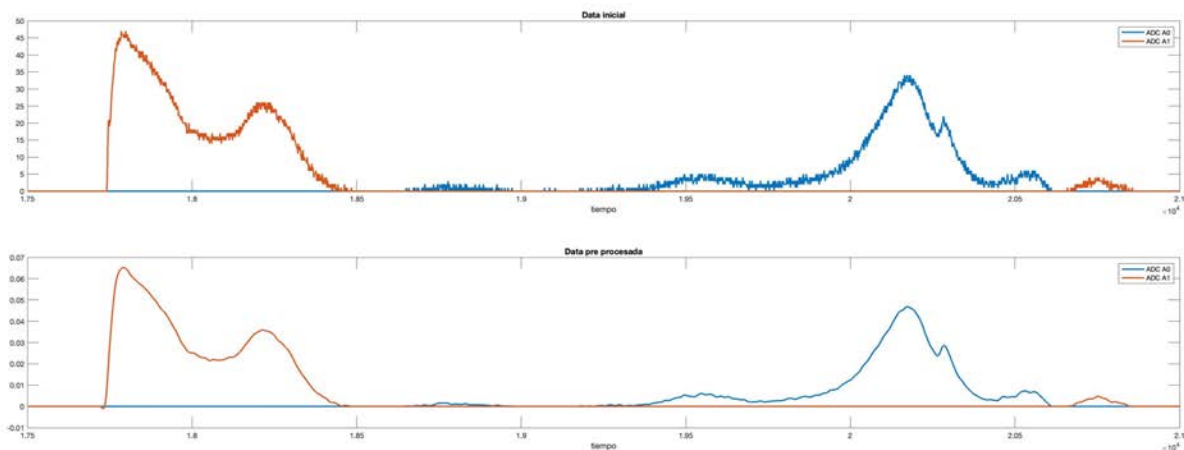


Figura 5-68: Comparación entre data inicial y data pre-procesada. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.3 Comparación del modelo de caminata

Como se observa de la Figura 5-5 en el capítulo 5 del anexo, cada persona tiene su único patrón de caminata a distintas velocidades. Para comparar la data pre procesada se sugiere utilizar algoritmos simples que categoricen 4 posibles modelos de caminata de una persona dependiendo de la amplitud de la muestra, debido a que la amplitud es directamente proporcional a la velocidad con la que el usuario está caminando. Entonces, si la amplitud está en cierto rango, se obtienen los promedios para los siguientes parámetros de similitud mostrados en la Figura 5-69.

Tiempo de ciclo: Se define a un ciclo como el momento desde que una planta del pie hace contacto con el piso, se utiliza como punto de apoyo y se levanta.

Tiempo entre picos: Se define como el tiempo transcurrido entre los picos generados por el muestreo del ADC.

Tiempo de ADC: Se define como el tiempo de duración que el ADC tiene valores mayores a 0 al inicio del ciclo.

Período: Se define como el tiempo transcurrido entre los inicios de las muestras del ADC.

Tiempo entre picos del mismo ADC: Para el último ciclo mostrado en la Figura 5-69, el ADC A1 tiene un pico pequeño al final del muestreo de datos. Dado a que este patrón se repite en cada paso, limitándonos a un ciclo, se puede evaluar el tiempo entre picos del mismo ADC para tener un parámetro de similitud extra.

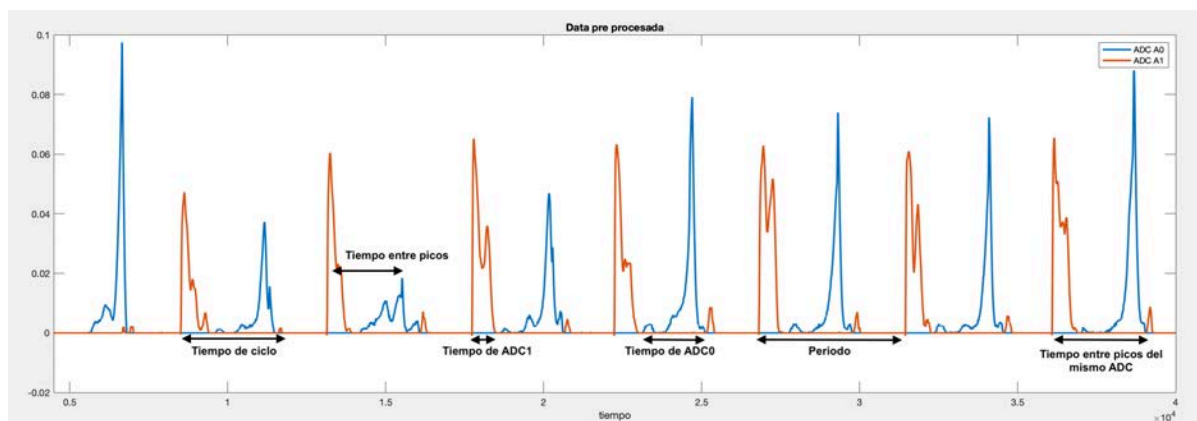


Figura 5-69: Parámetros de similitud. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.4 Diagrama de flujo

Se definen a dos tipos de usuarios, el usuario objetivo y el usuario sospechoso. El usuario objetivo es aquel que se le ha dado el wearable para uso constante. El usuario sospechoso es aquel impostor que se está haciendo pasar por un usuario objetivo. Se define la variable 'similitud' como un número del 1 al 0 que indica la similitud entre un paso analizado con el modelo de caminata guardado, siendo el 1 un valor con 100% similitud. Esta relación es directamente proporcional a la probabilidad de que el usuario que está utilizando el wearable sea el usuario objetivo, por lo que se define la variable probabilidad, con rango de 0 a 20, cuyo valor máximo significa que el usuario que está utilizando el wearable es 90% el usuario objetivo. Por otro lado, la variable 'muestra', es un contador de pasos analizados hasta el momento. El diagrama de flujo del sistema se muestra en la Figura 5-70, se mantiene la algoritmia simple debido a que el microcontrolador tendrá pocos recursos energéticos para procesar la información.

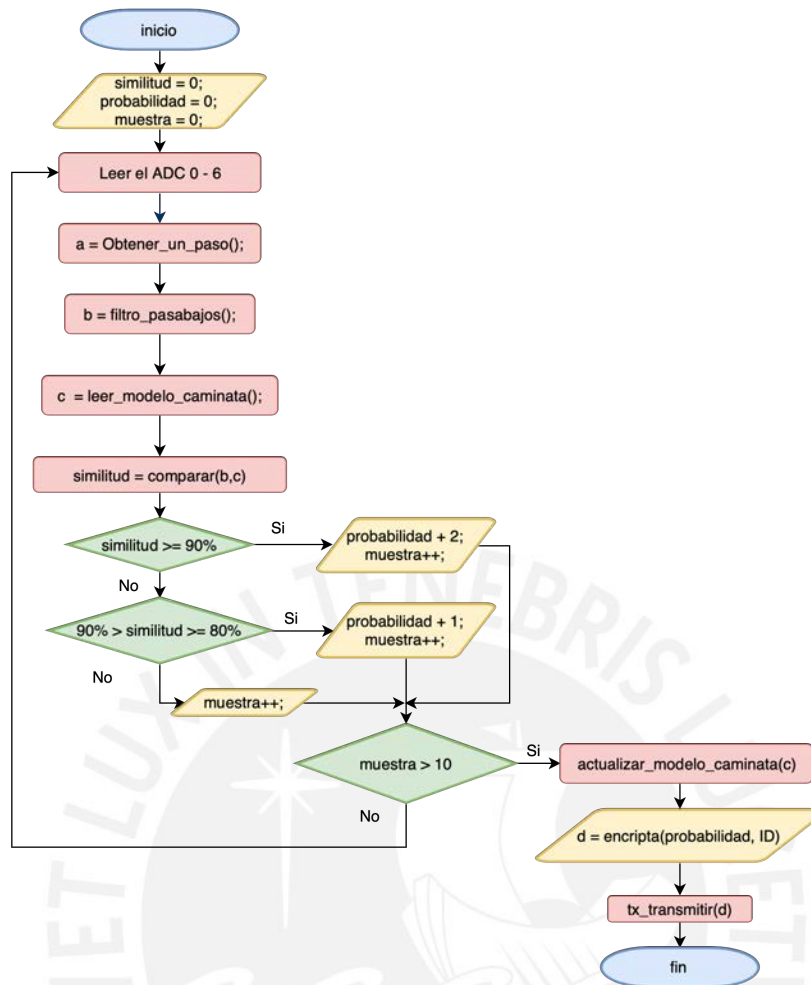


Figura 5-70: Diagrama de flujo de la algoritmia. Fuente: Elaboración propia.

Se inicializa el sistema colocando las variables 'similitud', 'probabilidad' y 'muestra' en 0. Se leen los datos generados por el conversor análogo a digital y se obtiene un paso. Posteriormente se aplica un filtro pasa bajo para eliminar el ruido del paso y se compara con el modelo que se ha ido obteniendo con el tiempo.

Una vez comparado se obtiene una variable de 'similitud' que indica la similitud entre el paso recolectado y el modelo guardado. Si esta similitud es mayor al 90%, la variable 'probabilidad' aumenta dos unidades y la variable 'muestra' aumenta una unidad. Por otro lado, si la similitud se encuentra entre 80 y 90 % la variable 'probabilidad' solo aumentará una unidad, caso contrario, la variable 'probabilidad' no aumentará ninguna cantidad. Este ciclo se cumplirá hasta que la variable 'muestra' llegue a 10, por lo que cada 10 pasos analizados se transmitirá el análisis de identificación de personas a la infraestructura de soporte externa.

6 COSTOS

En este capítulo, se presentan los costos relacionados con la creación del wearable más no de todo el sistema de soporte necesario para implementarlo. Se separan los costos en componentes electrónicos, mecánicos, matrices, diseño y manufactura. El costo de envío y nacionalización de componentes se considerará agregando un 30% del valor final del producto. Todos los precios están en dólares americanos (USD).

6.1 Componentes mecánicos

Tabla 6-1: Costo de los componentes mecánicos. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Proveedor	Precio unitario	Cantidad	Precio total (\$)
Protector superior de plantilla	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	1.20	1.00	1.20
Carcasa principal	Jiangyin Jin Kai Rubber Products Co., Ltd	0.40	1.00	0.40
Soporte principal	JZ Machinery Equipment	0.55	1.00	0.55
Tapa principal	JZ Machinery Equipment	0.30	1.00	0.30
Soporte de recolector de 1 disco	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	0.12	2.00	0.24
Soporte de recolector de 2 discos	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	0.10	2.00	0.20
Soporte de recolector de 3 discos	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	0.18	2.00	0.36
Tapa de recolector	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	0.08	6.00	0.48
Disco piezoeléctrico	PiezoElements	0.10	12.00	1.80
Contacto del cátodo	PiezoElements	0.02	12.00	0.24
Anillo protector inicial	Ningbo Ouling Seals Co. Ltd.	0.03	6.00	0.18
Anillo protector medio	Ningbo Ouling Seals Co. Ltd.	0.03	6.00	0.18
Anillo transmisor de presión	Ningbo Ouling Seals Co. Ltd.	0.09	6.00	0.54
Resorte de contacto variable	Xiamen Mark Hardware Store Co. Ltd	0.12	12.00	1.44
Tapa media de recolector	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	0.10	6.00	0.60
Tornillos	Krones Shop	0.04	2.00	0.08
Subtotal (\$)				8.79
Envío + nacionalización (\$)				2.64
TOTAL				11.43

6.2 Componentes electrónicos

Tabla 6-2: Costo de los componentes electrónicos. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Proveedor	Precio unitario	Cantidad	Precio total (\$)
nRF52832	Nordic Semiconductor	3.52	1	3.52
Capacitor 1500uF 10V 55mOhms SMD	AVX Corporation	1.45	1	1.45
Antena 2.4GHz UFL	Adafruit Industries	1.60	1	1.60
Conector de antena UFL SMT	Adafruit Industries	0.48	1	0.48
PCB con CNC	Shenzhen POE Precision Technology Co., LTD	1.6	1	1.60
Resistencias y capacitores SMD	Varios	0.37	1	0.37
Subtotal (\$)				9.02
Envío + nacionalización (\$)				2.71
TOTAL				11.73

6.3 Matrices

El costo principal del sistema son las matrices necesarias para realizar las piezas por inyección de plástico y que disminuyan los precios unitarios. Sin embargo, este costo es grande inicialmente y se recupera a lo largo del tiempo. Cada matriz tiene la capacidad de soportar decenas de miles de ciclos de inyección. El material considerado para la matriz es acero 1045 y el plástico de todas las piezas será PLA, por las razones explicadas en el análisis ambiental. La única excepción será el protector superior de plantilla cuyo material contemplado es Sorbothane.

Tabla 6-3: Costo de las matrices. Fuente: Elaboración propia.

Matriz de componente	Proveedor	Cavidades	Precio total (\$)
Protector superior de plantilla	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	3	900.00
Carcasa principal	Jiangyin Jin Kai Rubber Products Co., Ltd	3	790.00
Soporte principal	JZ Machinery Equipment	3	980.00
Tapa principal	JZ Machinery Equipment	3	620.00
Soporte de recolector de 1 disco	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	6	520.00
Soporte de recolector de 2 discos	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	6	350.00
Soporte de recolector de 3 discos	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	6	730.00
Tapa de recolector	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	18	440.00
Tapa media de recolector	Xiamen Bestthing Rubber And Plastic Industry Co., Ltd.	18	700.00
TOTAL			7839.00

6.4 Costo Total

El trabajo de diseño se realizó durante 15 semanas, desde la investigación del estado del arte hasta el prototipo final. El tiempo invertido por semana se prorratea en 12 horas con un costo de 15 dólares la hora, lo que resulta en un costo de 2,700 USD. El costo inicial para realizar el wearable propuesto es de 8,730 dólares americanos.

Tabla 6-4: Costos iniciales. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Precio total (\$)
Costo de matrices	6030.00
Costo de diseño	2700.00
TOTAL (\$)	8730.00

Se incluye en el costo total los gastos de manufactura por 5 dólares, monto que cubre la mano de obra para la soldadura de los componentes electrónicos y el ensamblaje. Considerando todos los gastos anteriores, el costo unitario de cada wearable 28.15 USD como se observa en la tabla 6-5.

Tabla 6-5: Costo por wearable sin costos iniciales. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Precio total (\$)
Componentes mecánicos	11.43
Componentes electrónicos	11.73
Manufactura	5.00
TOTAL (\$)	28.15

Considerando que los costos iniciales serán prorrateados en 10 mil wearables a realizar, el costo total por plantilla es igual a:

$$\text{Costo por wearable} = (\text{Costo inicial} + \text{Costo por wearable} \times 10,000) / 10,000$$

$$\text{Costo por wearable} = (8,730 + 28.15 \times 10,000) / 10,000$$

$$\text{Costo por wearable} = 29.023 \text{ USD}$$

El costo por wearable en total es igual a 29.023 dólares americanos para 10 mil plantillas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se logró cumplir con el objetivo de diseñar un wearable que permita la identificación de un usuario y la transmisión de su posición. La ventaja competitiva con respecto a otros dispositivos similares es que recolecta la energía cinética generada por el usuario y alimenta el 100% de su sistema a partir de esa energía. Este requerimiento es vital para mantener al wearable no intrusivo en las actividades del usuario, de tal forma que una vez colocado y podría usarlo siempre sin preocuparse por tener que recargarlo.
- Se logró diseñar un sistema de recolección de energía escalable en dos dimensiones. La primera dimensión es la escalabilidad vertical, de la misma forma que se hicieron recolectores para uno, dos y tres discos piezoeléctricos, se podrían colocar más discos uno encima de otro. La segunda dimensión es la horizontal, cada recolector ocupa 3.84 cm^2 de área superficial. Si se colocaran recolectores de forma paralela se multiplicaría la energía recolectada por un factor de m filas por n columnas. Haciendo factible su funcionamiento para aplicaciones que requieren mayor energía.
- Se cumplieron con los requerimientos descritos en el capítulo 4. El wearable propuesto es no invasivo, cómodo, no llama la atención del usuario ni de externos. No genera ruidos, no habrá sobrecalentamiento debido a que las tareas del microcontrolador son limitadas. La vida útil del wearable es indeterminada, pudiendo fallar los piezoeléctricos con el tiempo debido a la fatiga de las flexiones. La comunicación contemplada es inalámbrica y el costo es menor a los 30 dólares.
- Debido al diseño hermético de los componentes electrónicos el diseño propuesto cumple con la norma IP67 bajo el estándar IEC 60529 y la norma ATEX anti-explosiones. Ninguna pieza electrónica que pueda cargarse de energía estática ni tenga capacidad de generar chispa está en contacto con el aire de la intemperie.

- Se cumplió con lo estipulado en la Norma Técnico Peruana NTP 900.064 considerando un proceso de deposición de los residuos electrónicos. Así mismo, la plantilla se diseñó con consideraciones ambientales que dejen el menor impacto ambiental posible.
- Por último, El sistema cumple con las exigencias legales de acorde al artículo 14 de la Ley 29733. Esta ley de protección de datos personales establece que no se requiere el consentimiento del titular de datos personales (como es la ubicación geográfica y temporal de un trabajador) cuando estos sean necesarios para “la ejecución de una relación contractual en la que el titular de datos personales sea parte”.

Se proponen las siguientes recomendaciones para sucesivas iteraciones:

- Realizar cálculos de fatiga para los discos piezoeléctricos, para hallar el MTBF (mean time before failure) o tiempo de vida antes de falla. De esta forma se sabrá el tiempo de vida exacto del sistema recolector. De igual manera, se recomienda escalar verticalmente los recolectores piezoeléctricos, con 5, 10 o 15 discos hasta encontrar el tope máximo de energía obtenida eficientemente vs cantidad de discos apilados.
- Realizar experimentos para combinar generadores piezoeléctricos con generadores triboeléctricos. Éste último también transforma la energía cinética en eléctrica con un alto nivel de efectividad. Con mayor presupuesto se podrían conseguir los materiales para replicar los resultados obtenidos en las investigaciones citadas durante la solución conceptual 3.
- Utilizar algoritmos de aprendizaje de máquina y una base de pruebas con más personas. Lo anterior mencionado podría permitir una forma más precisa de validar al usuario caminando a través de un algoritmo adaptativo de reconocimiento de pasos. Así mismo, se recomienda la implementación del algoritmo de reconocimiento de pasos en un microcontrolador para poder determinar los parámetros de identificación óptimos.

Bibliografía

- Kremer, M., Kaur, S., & Mullainathan, S. (n.d.). *Self-Control at Work*. Columbia University, Harvard University, Department of Economics. Columbia: Harvard Scholar.
- United States Patent and Trademark Office. (2018, Enero 30). *Ultrasonic bracelet and receiver for detecting position in 2D plane*. Retrieved from United States Patent :
<http://pdfpiw.uspto.gov/piw?PageNum=US009881276&docid=09881276&IDKey=4B7719ED270F&HomeUrl=http%3A%2F%2Fpatft.uspto.gov%2Fnetacgi%2Fnph-Parser%3FSect2%3DPTO1%2526Sect2%3DHITOFF%2526p%3D1%2526u%3D%2Fnethtml%2FPPTO%2Fsearch-bool.html%2526r%3D1%2526f%3DG%2526l%3D50%2526d%3DPALL%2526S1%3D9881276.PN.%02gging%EF%BF%BD%10>
- GISGeography. (2018, Febrero 23). *Trilateration vs Triangulation - How GPS Receivers Work*. Retrieved from GISGeography:
<https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>
- Keyense. (2018). *¿Qué es un sensor láser de tipo reconocimiento de posición?* Retrieved from www.keyence.com:
https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/laser_location/info/
- Bing Kang, S., Webb, J. A., Lawrence Zitnick, C., & Kanade, T. (n.d.). *An Active Multibaseline Stereo System with Real-Time Image Acquisition*. Carnegie Mellon University, School of Computer Science, Pittsburgh.
- Corbley, K. (2017). WiFi Inadequate as Real-Time Asset and Patient Tracking Solution. *Wirelessdesignmag*.
- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M. A., & Al-Khalifa, H. S. (2016, Mayo 16). *Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances*. *US National Library of Medicine*.
- Ray, B. (2018, Agosto 16). *www.airfinder.com*. Retrieved from How An Indoor Positioning System Works: <https://www.airfinder.com/blog/indoor-positioning-system>
- Tsuboi, T., & Ueda, H. (2013). *Indoor trace tracking algorithm with pattern-based positioning technique of UHF band RFID*. Retrieved from Semantic Scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Indoor-trace-tracking-algorithm-with-pattern-based-Tsuboi-Ueda/16fd4dce7306617fdb8e1a4d04518e3d6584b3f>
- Kaczmarczyk, A., & Borowicz, W. (2015). *Super simple and accurate indoor positioning with the updated Estimote Indoor Location SDK*. Blog Estimote.
- Rodriges, A. (2015). *Training II Positioning*. National Research University, Higher School of Economics. Moscú: Wikience.
- KINEXON. (2017). *KINEXON RESOURCES: THE ULTRA WIDE BAND RADIO TECHNOLOGY*. Retrieved from JSTAthlete:
<http://jstathlete.com/index.php/training-technologies/kinexon/kinexon-resources>
- Yucel, H., Ozkir, T., & Yazici, A. (2012). *Development of indoor positioning system with ultrasonic and infrared signals*. Retrieved from Semantic Scholar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-indoor-positioning->

- system-with-and-Yucel-Ozgir/0a519fcc0aa1f050913859344ba747eb61f032b2
- Ward, A., Steggles, P., Curwen, R., Webster, P., Hodges, S., Osborn, P., . . . Addlesee, M. (2005, Julio 1). *The Bat Ultrasonic Location System*. (T. D. Group, Ed.) Retrieved from AT&T Laboratories Cambridge: <https://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/>
- Jake, L. (2017, Octubre 20). *The Century Foundartion*. Retrieved from Preserving the Right to Obscurity in the Age of Facial Recognition: <https://tcf.org/content/report/preserving-right-obscurity-age-facial-recognition/>
- Open Shoe. (n.d.). *Open source embedded foot-mounted INS*. Retrieved from OpenShoe: <http://www.openshoe.org>
- Zanuy, M. F. (2008). *Tratamiento digital de voz e imagen y aplicación a la multimedia*. Marcombo Boixareu Editores.
- Trader, J. (2014, Junio). *Iris Recognition vs. Retina Scanning – What are the Differences?* Retrieved from M2SYS: <http://www.m2sys.com/blog/biometric-hardware/iris-recognition-vs-retina-scanning-what-are-the-differences/>
- Triggs, R. (2018, Agosto 9). *How fingerprint scanners work: optical, capacitive, and ultrasonic variants explained*. Retrieved from Android Authority: <https://www.androidauthority.com/how-fingerprint-scanners-work-670934/>
- Mainguet, J.-F. (2018, Abril 10). *Fingerprint sensing techniques Techniques de capture d'empreintes digitales*. Retrieved from Mainguet.org: http://biometrics.mainguet.org/types/fingerprint/fingerprint_sensors_physics.htm
- Kofman, F. (2015, Noviembre 02). LinkedIn: Cultura empresarial del Perú es muy paternalista en vez de participativa. (Gestión, Interviewer)
- Berkovic, G., & Shafir, E. (2012, Septiembre 11). Time-of-Flight Sensors . *Optical methods for distance and displacement measurements*, 4, 441. Soreq, Israel.
- Chongfeng , W., & Xingjian, J. (2017, Enero 12). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Harab, A. (2010, Julio). Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*.
- Donelan, J., Li, Q., Naing, V., Hoffer, J., Weber, D., & Kuo, A. (2008). Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort. *Science*.
- Kumar Mallineni, S. S., Behlow, H., Dong, Y., Bhattacharya, S., Rao, A. M., & Podila, R. (2017, Marzo 22). Facile and robust triboelectric nanogenerators assembled using off-the-shelf materials. *Nano Energy*.
- Argenox. (2016, Mayo 19). *A Guide to Selecting a Bluetooth Chipset*. Retrieved from <http://www.argenox.com/bluetooth-low-energy-ble-v4-0-development/library/a-guide-to-selecting-a-bluetooth-chipset/>
- T.Starner. (1996). Human-powered wearable computing. *IBM SYSTEMS JOURNAL*, 35, 618-629.
- González, J. L., Rubio, A., & Francesc, M. (2001). *Human Powered Piezoelectric Batteries to Supply Power to Wearable Electronic Devices*. Universitat Politècnica de Catalunya, Electronic Engineering Department, Barcelona.
- M. D., G. L., W. X., M. H., & W. H. (2018). Simultaneous Energy Harvesting and Sensinf using Piezoelectric Energy Harvester. *2018 IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation*.

- T. A., Hicks, J. L., King, A. C., Delp, S. L., & J. L. (2017). Large-scale physical activity data reveal worldwide activity inequality. *Nature*, 336–339.
- Anatomía Topográfica. (n.d.). *Anatomía Topográfica*. Retrieved from Huesos cuneiformes: <https://www.anatomiatopografica.com/huesos/huesos-cuneiformes/>
- Isolate It. (2018). *Isolate It*. Retrieved from SORBOTHANE STRIP 36 (91.4CM) X 2 (5.1CM) - 1 STRIP: <https://www.isolateit.com/sorbothane-thin-film-with-3m-adhesive-backing-1-8-x-6-x-12in-1-sheet.html>
- Libotte, M. (2007). Análisis dinámico de las presiones plantares. *EMC - Podología - Elsevier*, Volumen 9, Capítulo 3, 2007, Páginas 1-7 .
- Optogait. (n.d.). *Parameters of gait analysis*.
- M. C., G. P., A. P., & S. V. (2015). Heterogeneidad estructural, asimetrías tecnológicas y crecimiento en América Latina. *CEPAL*, 24-26.
- The Conference Board. (2021). *Total Economy Datase: Output, Labor and Productivity 1950-2021*. Retrieved from www.conference-board.org: <https://www.conference-board.org/data/economydatabase/index.cfm?id=27762>

