



Proyecto final de Ingeniería Electrónica

GraVR: Guante sensorial para realidad virtual

Autores: Davidov, Gonzalo Joaquín (59117)
Farall, Facundo David (59345)
Kammann, Lucas Agustín (59526)
Maselli, Carlos Javier (59564)
Trozzo, Rafael Nicolas (59434)

Tutores: Orchessi, Walter
Pingitore, Ricardo
Ugarte, Alejandro
Gasparini, Ignacio

Fecha: 18/07/2022

Agradecimientos

A nuestras familias, por estar presentes y apoyarnos durante todo el transcurso de la carrera.

A la cátedra, que nos guio en el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos, que entendieron tanto la parte de compañía como de ausencia.

A Marc Ressl, por darnos la idea que original.

A Diego Ismirlian y Pablo Cossutta, por darnos consejos durante el proceso de diseño que permitieron el correcto funcionamiento del sistema.

A Gabriel Zapata, por estar siempre disponible en el pañol para proveernos de los elementos que necesitamos.

Y finalmente, un agradecimiento especial a Jorge Cáceres, que dejó de lado sus responsabilidades en reiteradas ocasiones para ayudarnos a soldar la placa de circuito impreso y a concluir con el armado mecánico del prototipo.

Índice

Acrónimos y Definiciones.....	12
Resumen.....	14
1. Introducción	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Contexto del proyecto	15
2. Objetivos.....	17
2.1. Finalidad del Proyecto	17
2.2. Planeamiento del Problema a Resolver	17
2.3. Alcance.....	17
3. Definición de Producto.....	18
3.1. Requerimientos de Cliente	18
3.2. Diagrama Funcional de Interfaces.....	29
3.3. Especificaciones de Diseño.....	30
4. Plan de Validación	38
4.1. Diseño de Bancos de Pruebas.....	38
4.2. Especificaciones de Tests.....	39
4.3. Validación por documentación.....	42
4.4. Matriz de Trazabilidad de Validación	42
4.5. Plan de Verificación y Validación.....	45
5. Análisis de Factibilidad	46
5.1. Factibilidad tecnológica	46
5.2. Factibilidad de tiempos	68
5.3. Factibilidad económica. (Mercado, costos, VAN, TIR, Punto de Equilibrio).....	81
5.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil	85
6. Ingeniería de detalle.....	87
6.1. Hardware	87
6.2. Software	126
7. Construcción del prototipo	140
7.1. Definición de los módulos	140
7.2. Diseño de los circuitos impresos	141
7.3. Diseño mecánico	142
7.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje	143
7.5. Bill of Materials (BOM)	144
8. Validación del prototipo	154
8.1. Estudios de confiabilidad.....	154
8.2. Resultados	160

8.3.	Evaluación.....	162
8.4.	Consideraciones finales hacia el producto final	162
9.	Conclusiones.....	163
9.1.	Cumplimiento de Objetivos.....	163
9.2.	Lecciones aprendidas	163
9.3.	Recomendaciones para futuros diseños	163
10.	Bibliografía.....	164
11.	Anexos Técnicos	165
11.1.	Esquemáticos.....	166
11.2.	Planos de PCB	191
11.3.	Listado de Partes y Componentes (BOM)	191
11.4.	Códigos de Software.....	191
11.5.	Hojas de Datos de Componentes	191
11.6.	Hojas de Aplicación, etc.....	191
11.7.	Justificaciones Casa de Calidad	191
11.8.	Justificación de Requerimientos.....	193
11.9.	Justificación de Especificaciones	193
11.10.	Anatomía y movimientos posibles de la mano	195
11.11.	Tablas de Factibilidad Tecnológica	197
11.12.	Diseño de Hardware	206

Lista de Ilustraciones

Ilustración 3.1:	Distribución de edades y estudios relacionados a tecnología de los encuestados	21
Ilustración 3.2:	Porcentaje de encuestados que ha usado un visor, atracción por el campo e interés en poseer un visor.....	21
Ilustración 3.3:	Aplicaciones de interés de la realidad virtual	22
Ilustración 3.4:	Precio que los encuestados están dispuestos a pagar por nuestro producto	22
Ilustración 3.5:	Pesos relativos de los encuestados filtrados	23
Ilustración 3.6:	Casa de Calidad	25
Ilustración 3.7:	Diagrama Funcional de Interfaces	29
Ilustración 4.1:	Plan de Validación	45
Ilustración 5.1:	Esquema Modular	47
Ilustración 5.2:	Plataformas móviles.....	49
Ilustración 5.3:	Arreglo de pines	49
Ilustración 5.4:	Sistema neumático.....	50
Ilustración 5.5:	Plataforma con cinturón	50
Ilustración 5.6:	Esquema del freno electrostático para un dedo.....	53
Ilustración 5.7:	Vista lateral del freno electrostático.....	53

Ilustración 5.8: Sistema que utiliza servomotores en un guante	54
Ilustración 5.9: Esquema para IMM-FT	60
Ilustración 5.10: Histograma de la duración del proyecto obtenido con la simulación de Monte Carlo	71
Ilustración 5.11: Histograma de la fecha de finalización obtenido con la simulación de Monte Carlo	80
Ilustración 6.1: Diagrama de bloques del Hardware del guante	87
Ilustración 6.2: Diagrama en bloques del módulo NerveBox.	88
Ilustración 6.3: Carcasa para la batería.....	92
Ilustración 6.4: Gabinete de la NerveBox.	92
Ilustración 6.5: Vista explotada del módulo de Pressure Feedback	93
Ilustración 6.6: Base de montaje del módulo de Pressure Feedback	93
Ilustración 6.7: Motorreductor Pololu	94
Ilustración 6.8: Tambor rotativo del módulo de Pressure Feedback.....	94
Ilustración 6.9: Protector del módulo de Pressure Feedback.....	95
Ilustración 6.10: Sensor de presión resistivo FSR-400	95
Ilustración 6.11: Pad de contacto el módulo de Pressure Feedback.....	95
Ilustración 6.12: Actuador VC0720B001F	96
Ilustración 6.13: Pieza para los actuadores de los dedos	97
Ilustración 6.14: Requisitos para distintos parámetros de la especificación I ² C	97
Ilustración 6.15: Base de fijación a la mano para módulo de Force Feedback.....	98
Ilustración 6.16: Base de montaje del servo para el módulo de Force Feedback.	99
Ilustración 6.17: Servomotor Tower Pro SG90.	99
Ilustración 6.18: Carrete ensamblado y su vista explotada para módulo de Force Feedback.	100
Ilustración 6.19: Resorte motor de módulo de Force Feedback	100
Ilustración 6.20: Tensor de hilo para módulo de Force Feedback.....	101
Ilustración 6.21: Sujeción flex sensors extensión/flexión.....	102
Ilustración 6.22: Sujeción flex sensors extensión/flexión con guía para hilo Force Feedback.....	102
Ilustración 6.23: Sujeción flex sensors aducción/abducción del pulgar.	102
Ilustración 6.24: Arquitectura del subsistema de alimentación	104
Ilustración 6.25: Características de la batería Efest IMR 21700 V1	108
Ilustración 6.26: Diagrama en bloques del MAX77976.....	111
Ilustración 6.27: Eficiencia de la fuente Buck con fs=1.3MHz	112
Ilustración 6.28: Circuito Soft Power Switch.....	114
Ilustración 6.29: Circuito de medición del consumo de corriente.....	117
Ilustración 6.30: Circuito de los conversores DC-DC 5V y 6V.....	119
Ilustración 6.31: Circuito del LTC3113EDHD para 3,3V.....	121
Ilustración 6.32: Circuito de protección.....	123
Ilustración 6.33: Diagrama macro de componentes de software de GraVR.	126
Ilustración 6.34: Interfaz de Unity Engine versión 2021.	127

Ilustración 6.35: Estructura de directorios de GraVR Plugin.	131
Ilustración 6.36: Características del Protocolo Bluetooth GraVR.	135
Ilustración 6.37: Detalle de paquetes del protocolo BLE.	136
Ilustración 6.38: Diagrama en capas del Firmware.	138
Ilustración 6.39: Diagrama de estados del Firmware.	139
Ilustración 7.1: Módulos del prototipo.	140
Ilustración 7.2: Circuito impreso con delimitación de módulos.	141
Ilustración 7.3: Foto del PCB para el prototipo.	141
Ilustración 7.4: Foto del PCB para el prototipo.	142
Ilustración 7.5: Render de la NerveBox.	142
Ilustración 7.6:Guante completamente ensamblado	143
Ilustración 8.1: Diagrama de confiabilidad en módulos.	154
Ilustración 8.2: Resultado del ensayo de duración de batería.	161
Ilustración 11.1: Esquemático de nivel superior (Sección 6.1.1)	166
Ilustración 11.2: Esquemático del módulo de vibración. (Sección 6.1.3.3)	167
Ilustración 11.3: Esquemático de la interfaz con un vibrador. (Sección 6.1.3.3)	168
Ilustración 11.4: Esquemático del módulo de presión. (Sección 6.1.2.3)	169
Ilustración 11.5: Esquemático de la interfaz de presión. (Sección 6.1.2.3)	170
Ilustración 11.6: Esquemático del subsistema de alimentación. (Sección 6.1.6)	171
Ilustración 11.7: Esquemático de medición de consumo de corriente. (Sección 6.1.6.6)	172
Ilustración 11.8: Esquemático del cargador de batería. (Sección 6.1.6.4)	173
Ilustración 11.9: Esquemático de medición del estado de carga de la batería. (Sección 6.1.6.3)	174
Ilustración 11.10: Esquemático del conversor DC-DC de 3,3V. (Sección 6.1.6.8)	175
Ilustración 11.11: Esquemático del conversor DC-DC de 5V. (Sección 6.1.6.7)	176
Ilustración 11.12: Esquemático de fuente de referencia de 2.5V. (Sección 6.1.6.9)	177
Ilustración 11.13: Esquemático del conversor DC-DC de 6V. (Sección 6.1.6.7)	178
Ilustración 11.14: Esquemático del circuito del pulsador para encendido y apagado. (Sección Error! Reference source not found.)	179
Ilustración 11.15: Esquemático de la protección de la fuente de alimentación externa. (Sección 6.1.6.10)	180
Ilustración 11.16: Esquemático del módulo central de procesamiento ESP32.	181
Ilustración 11.17: Esquemático del módulo de force-feedback. (Secciones 6.1.4.3 y 6.1.1.2)	182
Ilustración 11.18: Esquemático de la conversión de USB a UART. (Sección 0)	183
Ilustración 11.19: Esquemático de la interfaz de usuario. (Sección 6.1.1.4)	184
Ilustración 11.20: Esquemático del ADC de 16 canales. (Sección 6.1.1.2)	185
Ilustración 11.21: Esquemático del expansor GPIO. (Sección 6.1.1.2)	186
Ilustración 11.22: Esquemático del módulo de finger-tracking.	187
Ilustración 11.23: Esquemático de la interfaz de flexión y extensión de finger-tracking. (Sección 6.1.5.3)	188
Ilustración 11.24: Esquemático de la interfaz de abducción y aducción de finger-tracking. (Sección 6.1.5.3)	189

Ilustración 11.25: Esquemático de conectores.....	190
Ilustración 11.26: Movimiento de abducción y aducción	196
Ilustración 11.27: Movimiento de extensión y flexión	196
Ilustración 11.28: Anatomía de la mano	196
Ilustración 11.29: Grados de libertad de la mano.....	197
Ilustración 11.30: Efectos del DRV2605L. (Sección 6.1.3.3).....	207

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Comparación de competencia general	19
Tabla 3.2: Comparación de competencia funcional	20
Tabla 3.3: Requerimientos	28
Tabla 3.4: Leyenda de uso en especificaciones	30
Tabla 3.5: Especificaciones Funcionales de Interacción con el Mundo Virtual	30
Tabla 3.6: Especificaciones Funcionales Generales	31
Tabla 3.7: Especificaciones de Interfaz SDK	31
Tabla 3.8: Especificaciones de Interfaz PRV.....	32
Tabla 3.9: Especificaciones de Interfaz DCA	32
Tabla 3.10: Especificaciones de Interfaz PWR	33
Tabla 3.11: Especificaciones de Interfaz IMM	34
Tabla 3.12: Especificaciones de Performance.....	34
Tabla 3.13: Especificaciones de Operación.....	34
Tabla 3.14: Especificaciones de Almacenamiento y Transporte.....	35
Tabla 3.15: Especificaciones Dimensionales y de Peso.....	35
Tabla 3.16: Especificaciones de Costos	35
Tabla 3.17: Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética	35
Tabla 3.18: Especificaciones de Confiabilidad	36
Tabla 3.19: Especificaciones de Disponibilidad.....	36
Tabla 3.20: Especificaciones de Mantenibilidad	37
Tabla 3.21: Especificaciones de Seguridad	37
Tabla 4.1: Descripción de bancos de prueba.....	39
Tabla 4.2: Aspectos para el prototipo	39
Tabla 4.3: Aspectos para el producto final	40
Tabla 4.4: Especificaciones de tests	42
Tabla 4.5: A validar por inspección de la documentación	42
Tabla 4.6: Matriz de Trazabilidad de Validación	44
Tabla 5.1: Matriz de decisión para el mecanismo de presión de contacto en el módulo IMM-TF	51
Tabla 5.2: Matriz de decisión para el mecanismo de vibración en el módulo IMM-TF.....	52
Tabla 5.3: Comparación cualitativa de las tecnologías para la restricción del movimiento de los dedos.	54

Tabla 5.4: Matriz de decisión para el mecanismo de fuerzas sobre los dedos en el módulo IMM-FF.....	55
Tabla 5.5: Matriz de decisión para IMM-HT	57
Tabla 5.6: Matriz de decisión IMM-FT	59
Tabla 5.7: Matriz de decisión módulo UCC.....	64
Tabla 5.8: DFMEA del proyecto.....	67
Tabla 5.9: Referencia de niveles de IC para DFMEA.	67
Tabla 5.10: Referencia de puntajes DFMEA.....	67
Tabla 5.11: Participantes DFMEA.....	67
Tabla 5.12: Listado de tareas y actividades del proyecto	71
Tabla 5.13: Costo de fabricación unitario	81
Tabla 5.14: Personal	81
Tabla 5.15: Salarios mensuales	82
Tabla 5.16: Embalaje y envío	82
Tabla 5.17: Servicios	82
Tabla 5.18: Inversión Inicial.....	83
Tabla 5.19: IVA discriminado.....	83
Tabla 5.20: Precio del guante.....	83
Tabla 5.21: Ingresos trimestrales	83
Tabla 5.22: Flujo de fondos	84
Tabla 5.23: Factibilidad económica.....	84
Tabla 5.24: Límites de emisión electromagnética FCC Parte 15	85
Tabla 6.1: Pines necesarios del microcontrolador	89
Tabla 6.2: Estados de la interfaz de usuraio.	91
Tabla 6.3: AWG máximo para el cableado de cada módulo.	91
Tabla 6.4: Conectores seleccionados.	92
Tabla 6.5: Comparación cualitativa de flex sensors.....	103
Tabla 6.6: Elección de amplificador operacional para circuito de acondicionamiento de flex sensors.....	103
<i>Tabla 6.7: Consumo de cada módulo por actuador. (*) Consumo promedio estimado, depende de la aplicación.</i>	105
Tabla 6.8: Consumo total de cada módulo. (*) Consumo promedio estimado, depende de la aplicación.....	105
<i>Tabla 6.9: Consumo del MCU y el resto del sistema</i>	105
Tabla 6.10: Consumo total del sistema a la salida y a la entrada de la conversión de tensión (*) Consumo promedio estimado.....	106
Tabla 6.11: Especificaciones de la batería	106
Tabla 6.12: Descarga máxima y capacidad real requeridas para distintas configuraciones de Li-ion.....	107
<i>Tabla 6.13: Descarga máxima y capacidad nominal requeridas para distintas configuraciones de Li-ion.....</i>	107
Tabla 6.14: Comparación cualitativa de baterías.....	107
Tabla 6.15: Especificaciones para el monitoreo del estado de la carga	109

Tabla 6.16: Especificaciones para el cargador de batería	110
Tabla 6.17: Especificaciones del circuito del submódulo Soft Power Switch.	114
Tabla 6.18: Resumen de componentes del Soft Power Switch.	116
Tabla 6.19: Especificaciones del circuito de medición del consumo de corriente.	116
Tabla 6.20: Componentes del circuito de medición del consumo de corriente.....	117
Tabla 6.21: Especificaciones del conversor DC-DC 5V.	118
Tabla 6.22: Especificaciones del conversor DC-DC 6V.	118
Tabla 6.23: Especificaciones de la fuente de 3,3V.	121
Tabla 6.24: Especificaciones de la fuente de 2,5V.	122
Tabla 6.25: Especificaciones del submódulo de protección.	122
Tabla 6.26: Resumen de componentes de la protección.....	125
Tabla 6.27: Prefabs ofrecidos por GraVR Unity Plugin.	128
Tabla 6.28: Poses de la mano que el plugin detecta por defecto, y ofrece eventos para que el programador provea acciones como consecuencia del evento.....	129
Tabla 6.29: Interacciones de uso común pre-empaquetadas para facilidad del programador.	129
Tabla 6.30: Interacciones complejas para aplicaciones con necesidad de comportamientos específicos.	130
Tabla 6.31: Interfaz de GraVR BLE Android Library.	133
Tabla 8.1: Ecuaciones de confiabilidad para cada tipo de componentes, de acuerdo a la norma MIL-HDBK-217F.	155
Tabla 8.2: Confiability ESP32.....	155
Tabla 8.3: Confiability Power Subsystem.....	155
Tabla 8.4: Confiability Vibration Feedback.	156
Tabla 8.5: Confiability Pressure Feedback.	156
Tabla 8.6: Confiability External ADC.....	156
Tabla 8.7: Confiability Force Feedback.	157
Tabla 8.8: Confiability Finger Tracking.	157
Tabla 8.9: Confiability total.	157
Tabla 8.10: Proyección de la confiabilidad en años.	158
Tabla 8.11: Relevamiento de fallas detectadas y corregidas del software, durante el período de testing.	159
Tabla 11.1: Significados de la escala de accesibilidad de componentes para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF.....	197
Tabla 11.2: Significados de la escala de conocimiento y experiencia para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF.....	197
Tabla 11.3: Significados de la escala de comodidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	197
Tabla 11.4: Significados de la escala de complejidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	198
Tabla 11.5: Significados de la escala de estímulos para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	198
Tabla 11.6: Comparación cualitativa de los mecanismos para presión de contacto en el módulo IMM-TF.....	199

Tabla 11.7: Escala cuantitativa de costo para la comparación de mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	199
Tabla 11.8: Escala cuantitativa de accesibilidad de los componentes para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF.....	199
Tabla 11.9: Escala cuantitativa del conocimiento y la experiencia para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF.....	199
Tabla 11.10: Escala cuantitativa de peso del módulo para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	199
Tabla 11.11: Escala cuantitativa de comodidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	200
Tabla 11.12: Escala cuantitativa de la complejidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF	200
Tabla 11.13: Escala cuantitativa de los tipos de estímulos para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF.....	200
Tabla 11.14: Significados de la controlabilidad de la vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	200
Tabla 11.15: Comparación cualitativa de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF	201
Tabla 11.16: Escala cuantitativa de costo para la comparación de mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF	201
Tabla 11.17: Escala cuantitativa de accesibilidad de los componentes para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	201
Tabla 11.18: Escala cuantitativa de peso del módulo para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF	201
Tabla 11.19: Escala cuantitativa de comodidad para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF	202
Tabla 11.20: Escala cuantitativa de tiempo de respuesta para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	202
Tabla 11.21: Escala cuantitativa de la amplitud de vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	202
Tabla 11.22: Escala cuantitativa del consumo para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF	202
Tabla 11.23: Escala cuantitativa de la tensión de operación para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	202
Tabla 11.24: Escala cuantitativa de la controlabilidad de la vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF.....	202
Tabla 11.25: Justificación para valoración de categorías en matriz de decisión de IMM-HT.....	203
Tabla 11.26: Justificación para valoración de cada tecnología en matriz de decisión de IMM-HT.....	204
Tabla 11.27: Justificación para valoración de categorías en matriz de decisión de IMM-FT	204
Tabla 11.28: Justificación para valoración de cada tecnología en matriz de decisión de IMM-FT.....	205
Tabla 11.29: Especificación de la interfaz NB-FT.	207
Tabla 11.30: Especificación de la interfaz NB-FF.....	208
Tabla 11.31: Especificación de la interfaz NB-TFV	209
Tabla 11.32: Especificación de la interfaz NB-TFP	210

Acrónimos y Definiciones

Acrónimo	Descripción
AC	Corriente Alterna (<i>Alternate Current</i>)
DC	Corriente Continua (<i>Direct Current</i>)
EMC	Compatibilidad Electromagnética (<i>ElectroMagnetic Compatibility</i>)
HW	<i>Hardware</i>
PCB	Circuito Impreso (<i>Printed Circuit Board</i>)
SW	<i>Software</i>
TBD	<i>To Be Determined</i>
μC	Microcontrolador (ver definiciones)
μP	Microprocesador (ver definiciones)
VAC	Volts de corriente alterna (AC)
VDC	Volts de corriente continua (DC)
VR	Realidad Virtual (<i>Virtual Reality</i>)
XR	Realidad Extendida (<i>Extended Reality</i>). Forma de denominar el conjunto de tecnologías VR (<i>Virtual Reality</i>), AR (<i>Augmented Reality</i>) y MR (<i>Mixed Reality</i>)
SDK	Kit de desarrollo de software (<i>Software Development Kit</i>)
MTBF	Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures)
DoF	Grados de Libertad (<i>Degrees Of Freedom</i>)
E/F	Movimiento de extensión o flexión en los dedos de la mano (Ver Ilustración 11.27)
A/A	Movimiento de abducción o aducción en los dedos de la mano(Ver Error! Reference source not found.)
ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog to Digital Converter)
PWM	Modulación por ancho de Pulsos (Pulse Width Modulation)
I2C	Círcuito Inter-Integrado (Inter-Integrated Circuit)
GPIO	Entradas/salidas de propósito general (General Purpose Input/Output)
RF	Radio Frecuencia
BLE	Bluetooth Low Energy

UUID	Identificador único universal en el contexto de BLE (Universally Unique Identifier)
IoT	Internet de las cosas (Internet of Things)
AWG	American Wire Gauge (<i>standard</i> de dimensiones de cables)

Término	Definición
Microcontrolador	Un microcontrolador difiere de un microprocesador, debido a que es más fácil convertirla en una computadora en funcionamiento, con un mínimo de circuitos integrados externos de apoyo. La idea es que el circuito integrado se coloque en el dispositivo, enganchado a la fuente de energía y de información que necesite. Un microprocesador tradicional no permitiría hacer esto, ya que espera que todas estas tareas sean manejadas por otros chips. Hay que agregarle los módulos de entrada y salida (puertos) y la memoria para almacenamiento de información.
Microprocesador	Es el circuito integrado central más complejo de un sistema informático; a modo de ilustración, se le suele llamar por analogía el «cerebro» de una computadora. Se encarga de ejecutar los programas, desde el sistema operativo hasta las aplicaciones de usuario; sólo ejecuta instrucciones programadas en el lenguaje de bajo nivel, realizando operaciones aritméticas y lógicas simples, tales como sumar, restar, multiplicar, dividir, las lógicas binarias y accesos a memoria. Puede contener una o más unidades centrales de procesamiento (CPU) constituidas, esencialmente, por registros, una unidad de control, una unidad aritmético lógica (ALU) y una unidad de punto flotante (llamada antiguamente «coprocesador matemático»).
Conductor	Los materiales conductores son aquellos que ofrecen poca resistencia al paso de la electricidad.
Dieléctrico	Los materiales conductores son aquellos que ofrecen mucha resistencia al paso de la electricidad, también llamados aislantes.
Número <<C>>	Tasa de descarga de la batería, donde 1C es la tasa para la cual la batería se descarga en su totalidad en un tiempo de 1 hora
Tiempo de rise	Es el tiempo que le toma a una señal aumentar del 10% al 90% de su valor final.

Resumen

El presente informe de proyecto final de la carrera de Ingeniería Electrónica, desarrollará los procesos y decisiones que llevan al diseño y armado de un prototipo que contribuya a la experiencia de realidad virtual, añadiendo funciones de tacto y reconocimiento de movimientos de las manos. La realidad virtual abre un nuevo horizonte para las interacciones sociales a distancia, ambientes de trabajo y espacios de entretenimiento, y siempre tuvo dentro de sus máximas, la de lograr la mayor inmersividad al usuario. Justamente en esta dirección apunta este trabajo, al buscar incorporar el sentido del tacto a la experiencia, y hacerlo de una forma accesible para que pueda convertirse en un producto de consumo masivo. Se plantearán las problemáticas que llevan a la búsqueda de un producto como tal, pasando por un estudio del estado del arte, y culminando en un diseño que satisfaga los requerimientos específicos planteados para el público apuntado.

Se tienen en cuenta como principal objetivo el de proveer un producto capaz de generar una experiencia inmersiva amena para el usuario, a un costo que permita su consumo masivo, considerando a potenciales usuarios dentro de los entusiastas de la realidad virtual, así como empresas que hacen uso de esta herramienta para el entrenamiento de sus recursos humanos mediante las simulaciones. Son estos grupos a quien se tiene en cuenta para la determinación de los requerimientos y especificaciones del producto.

El diseño analiza distintas tecnologías complementarias que hacen a la sensación de tacto, incluyendo *Force Feedback* (para frenar la mano ante un objeto sólido), *Vibration Feedback* (efectos de vibración en dedos y palma) y *Pressure Feedback* (la presión ejercida sobre la piel al tocar tal objeto).

En base a las especificaciones planteadas, se diseña un plan de validaciones tanto para el prototipo como para el producto final que será ahondado en profundidad a lo largo del informe. Se puede afirmar que todas las validaciones fueron realizadas con resultados satisfactorios.

Se obtiene un producto con un tiempo medio a la falla de 5 años y medio. sin embargo, se considera que existe una alta correlación en la vida útil de este producto, con el tiempo de renovación de productos por parte de Meta¹, es por eso que se estima finalmente que la vida útil del producto es de aproximadamente 3 años, por obsolescencia tecnológica.

Al finalizar, se obtuvo como resultado un producto con un costo de 300 USD y un precio de venta de 550 USD. Con estas características, y a partir de un análisis de factibilidad económica en un período de 5 años resulta una tasa interna de retorno del 27% con una tasa de descuento del 15%, con lo cual se concluye la viabilidad económica del proyecto.

El conjunto de resultados satisfactorios, tanto en el aspecto técnico como económico, significan un desenlace satisfactorio de este proceso de diseño. Se destacan, dentro de lo desarrollado, innovaciones tecnológicas en la resolución de los módulos de *feedback* háptico, y un conjunto de herramientas de software de alta complejidad e integración, a disposición de la comunidad.

¹ Empresa desarrolladora de la plataforma de realidad virtual Meta Quest 2, dispositivo para el cual este producto está diseñado.

1. Introducción

1.1. Antecedentes.

Desde que la digitalización comenzó a acaparar la mayoría de los aspectos de nuestra vida, ya sea desde la virtualización de ambientes de trabajo o estudio, o en relación al tiempo dedicado en redes sociales, se ha estado en la búsqueda de replicar aspectos del mundo real en un ambiente controlado, en un ambiente modelado o simulado, y desde que las capacidades computacionales lo permiten (para un costo masivo), la realidad virtual ha avanzado como una solución a esta búsqueda. Entre los impulsores de esta tecnología están quienes hacen de la misma algo de entretenimiento, generando asombro en sus usuarios, y luego están quienes pretenden simular de forma más fidedigna un entorno real, ya que acceder a este puede ser riesgoso, complicado o costoso. En ambos casos, los primeros sentidos que fueron cubiertos por la realidad virtual fueron lo visual y lo auditivo, ya que no solo son dos de los sentidos en los que como humanos confiamos más, sino que su manipulación, desde tecnologías de procesamiento de señales, así lo permitían.

La burbuja que se crea al introducirse en este mundo virtual, sin embargo, se ve fácilmente quebrada cuando el usuario busca agarrar un objeto con su mano, y sus dedos lo atraviesan. Es este justamente el foco que se da en este trabajo: mantener al usuario dentro de esa burbuja para en un rango más amplio de experiencias, en particular, aquellas que tienen que ver con el tacto de las manos, y hacerlo de forma accesible.²

Las plataformas de VR han lidiado con esta limitación con diversos criterios. En algunos casos, alertas visuales o sonoras son empleadas; donde sea disponible se da algún tipo de respuesta háptica (como la vibración de un control de mando), pero que lejos está de simular el tacto; o incluso en algunos casos, el problema no fue abordado en absoluto, dejando al usuario dar cuenta de la colisión solo a través del cruce visual de los objetos.

En la última década, han aparecido unas pocas decenas de soluciones que sí abordan la problemática desde el tacto (ver [1]). Se encuentran por un lado proyectos ambiciosos en cuanto a la calidad de la sensación simulada, que llevan años perfeccionando su tecnología para la mayor fidelidad posible, y requieren, por lo tanto, un alto nivel de financiamiento. Tal es el caso del mencionado [Haptx](#), quien hoy por hoy se orienta exclusivamente a clientes como empresas o entidades estatales que buscan esa alta fidelidad, y cuentan con un mayor presupuesto para obtenerlo. Del otro lado se encuentran proyectos cuyo objetivo en términos de capacidades de simulación pueden ser más limitados, como los de [Manus](#), [Senseglove](#) y [VRGluy](#), pero que apuntan a lograr una más rápida penetración en públicos masivos. Si bien hoy por hoy, algunos de ellos pueden sustentarse también a base de clientes empresariales, los costos de los que parten son menores. El contexto económico descripto anteriormente, orienta este proyecto a formar parte de ese segundo segmento, buscando, sobre todo, generar expectativa e interés en el público entusiasta para que confíen en que el tacto en VR, puede ser una realidad más cercana de lo esperado.

1.2. Contexto del proyecto

Se emprende este proyecto en un contexto mundial de acelerados cambios de hábitos respecto de la relación de las personas con las herramientas digitales. Los cambios de paradigma impulsados por la pandemia de COVID-19, serán una etapa que eventualmente se superará, pero las barreras de adopción de tecnologías que esto ayudó a bajar, permanecerán superadas. Diferentes aspectos interrelacionados tendrán efecto, en mayor o menor medida, a la realización de este diseño, algunos con efectos negativos, y en otros casos, de forma favorable. Es el objetivo de esta sección hacer un rápido repaso de estos.

En cuanto a lo social, los últimos dos años han potenciado la receptividad de productos como este. Empujados por la virtualización impuesta por restricciones sanitarias, sectores de la población antes reacios o desconfiados de las nuevas tecnologías, se vieron obligados a tener que confiar en ellas como única alternativa de conectividad, y hasta capacitarse en su uso. El éxito en general de estas herramientas para cumplir su objetivo, lleva a la eventual confianza de los usuarios a animarse a probar nuevos productos tecnológicos, que en otros años hubiera requerido más tiempo que penetren en algunos sectores más conservadores. No siendo esta la única consecuencia, este último tiempo nos enseña que estas nuevas tecnologías de conectividad piden de una

² [Video demostrativo](#) del estilo de aplicación al que se apunta.

mayor interacción con el usuario, incorporar más cercanía al mismo. Justamente en esa dirección es la que apunta este proyecto, y es algo que lo motiva.

La crisis económica (potenciada en tiempos de pandemia, pero preexistente) y falta de previsibilidad financiera, se traduce en falta de crédito a nivel público y privado, consecuentemente dificultando el acceso a financiamiento para un proyecto como este. En otras palabras, al menos en las primeras etapas, quedan los posibles costos que pueda traer el diseño a cargo de quienes lo llevan a cabo, direccionalmente inevitablemente el proyecto a un enfoque de bajo costo.

2. Objetivos

2.1. Finalidad del Proyecto

El proyecto en cuestión apunta a agregarle a la emergente tecnología, Realidad Virtual, el sentido del tacto para poder así generar una experiencia más real a la hora de sumergirse en este mundo virtual. Si bien ya se conocen soluciones en el mercado de este tipo, se busca lograr un producto de bajo costo manteniendo un buen nivel de inmersividad y comodidad, buscando ampliar el acceso de esta tecnología a la mayor cantidad de usuarios posible.

2.2. Planeamiento del Problema a Resolver

A la hora de planear el problema que se busca resolver, habrá tres principales ramas muy distinguidas, pero no independientes.

Por un lado, se presentan la rama de la electrónica y la mecánica que se lo tomará como un problema conjunto debido a que una es muy dependiente de la otra. Aquí se evaluarán diversas tecnologías para atacar los problemas del *hand tracking*, *finger tracking*, *tactile feedback* y *Force Feedback*. Para finalmente seleccionar el método de implementación de cada tecnología se tendrán en cuenta factores como el costo, la accesibilidad a dichos componentes, el peso, el consumo y la comodidad entre otros.

Con el *hand* y *finger tracking* se buscará la mayor precisión posible ya que un incorrecto seguimiento de manos o dedos pueden generar pérdida completa de inmersividad. En cuanto al *tactile feedback* se tratará de generar sensación de presión en las puntas de los dedos y vibración en toda la mano. Finalmente, con la tecnología utilizada para realizar *Force Feedback* se simulará el efecto de colisión con un objeto, es decir, frenar los dedos en una determinada posición si hay un objeto interrumpiendo el movimiento.

Por otro lado, se tiene la rama del desarrollo del software. Al buscar llegar a la mayor cantidad de usuarios posibles, es importante que se encuentren en el mercado también aplicaciones con las cuales utilizar el guante y sacarle el máximo provecho. Para ello, se desarrollará una SDK de Unity que provea todas las funcionalidades necesarias para la conexión entre aplicaciones de realidad virtual y el producto, permitiendo que desarrolladores de software del mundo tengan la posibilidad de crear aplicaciones fácilmente compatibles con el guante.

Por último, se diseñará un mundo virtual para la validación del producto y a modo de demostración de las funcionalidades del guante como una primera aplicación.

2.3. Alcance

El alcance de este proyecto es realizar un prototipo funcional no comercial que consista en un guante con la capacidad de simular el tacto en la palma y en los cinco dedos de la mano. Será posible simular fuerzas sobre los 5 dedos de la mano para frenarlos en determinadas situaciones. Mediante presión en la punta de los dedos se deformará la piel buscando generar un sentido del tacto y utilizando la vibración en la palma de la mano se puede simular la vibración de equipos y herramientas mecánicas. Vale destacar que la combinación de estos estímulos en las proporciones adecuadas puede crear una imagen perceptual en el usuario sobre cómo es el objeto virtual. No será posible sentir fuerza de empuje ya que esto requeriría la capacidad de frenar el brazo entero.

Se podrá interactuar con objetos en un mundo virtual creado para ensayar y vivir esta experiencia, cabe destacar que todo el procesamiento y el software utilizado es ejecutado en el dispositivo Meta Oculus 2. Si bien las pruebas de validación que se realizarán serán únicamente las del prototipo, se documentará todo lo necesario para la posterior realización del producto final, el cuál será comercializable. Se buscará también cumplir con los estándares necesarios para una certificación del producto por más que el prototipo no será certificado.

3. Definición de Producto

3.1. Requerimientos de Cliente

3.1.1. Relevamiento de Datos

3.1.1.1. Análisis de la competencia

Los guantes de realidad virtual pueden poseer diferentes características funcionales como el seguimiento del movimiento de los dedos, el seguimiento del movimiento de la mano o la generación de estímulos a través de las vías sensoriales del ser humano para afectar al sentido del tacto. Hoy en día, en el mercado hay empresas que se dedican al desarrollo y producción de guantes que cubren algunas o todas estas funciones. Así, entre todas las existentes, se seleccionan **haptx**, **MANUS**, **SenseGlove** y **VRgluv** como marcas de referencia para analizar como posible competencia. El objetivo de tal análisis es relevar información comercial y técnica de los productos que ofrecen para comprender el contexto actual y orientar el diseño del producto hacia un resultado competitivo capaz de brindar calidad al cliente y los usuarios.

La Tabla 3.1 muestra una comparación de los aspectos generales o comerciales, mientras que la Tabla 3.2 muestra una comparación de los aspectos técnicos y funcionales.

Estos productos poseen un precio muy elevado que provoca que sean de difícil acceso para el público general, por tanto, tienden a estar dirigidos a un mercado empresarial. Por ejemplo, las empresas que necesitan entrenar, capacitar personal o simular condiciones peligrosas a través de la realidad virtual. No existe, actualmente, una alternativa accesible por el público general que ofrezca funciones y prestaciones de amplio alcance. Esto quiere decir que hay un potencial importante asociado a desarrollar un guante con prestaciones aceptables para el público general, que sea accesible en precio. Por otro lado, el alto precio que poseen la mayoría de los guantes debe interpretarse como una advertencia del alto costo de desarrollo y fabricación que puede poseer el producto.

Observando los guantes de la competencia, todos poseen un amplio soporte para entornos de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual. No obstante, no todos son compatibles con múltiples plataformas de realidad virtual. Por ejemplo, el guante de SenseGlove únicamente puede funcionar con el casco Pico Neo 2 de quien aprovecha el seguimiento del movimiento de las manos. Esto revela que la competencia no se preocupa por ofrecer una alta compatibilidad con plataformas de realidad virtual o que lograrlo es un desafío para el cual decidieron no alojar recursos.

Cuando se comparan los aspectos técnicos de las soluciones de la competencia, destaca que todos recurren a soluciones resueltas para el seguimiento del movimiento de la mano. Esto es, se proveen de módulos o sistemas que ya tienen esta función incorporada. Por ejemplo, integrándose con un casco de realidad virtual que ya permite hacer seguimiento de manos a través de la cámara o usar módulos como Vive Tracker. Por otro lado, desarrollan sistemas exclusivos o patentados para el seguimiento de la posición de los dedos. Esto marca una diferencia fuerte en la asignación de esfuerzos y recursos, de lo cual se podría concluir que el seguimiento de dedos es más crítico para el resultado que el seguimiento de las manos.

Por lo general, el mecanismo de fuerza para actuar sobre el sistema propioceptivo del ser humano es implementado de forma pasiva. El esquema pasivo, a diferencia del activo, se limita a restringir el movimiento aplicando fuerzas de resistencia. Por otro lado, el esquema activo puede aplicar una fuerza para forzar el movimiento de los dedos. Es posible que esta preferencia a favor del enfoque pasivo se deba a una forma de reducir el riesgo para los usuarios. En los productos de la competencia analizados, estas fuerzas de restricción del movimiento de los dedos son aplicadas utilizando hilos como medio de transmisión de la fuerza. En SenseGlove usan frenos magnéticos para tratar el recorrido de los hilos.

Además de generar fuerzas, los guantes suelen buscar reproducir el contacto, la textura y la superficie de los objetos. Para ello colocan actuadores sobre la piel. En este sentido, haptx utiliza un sistema neumático para aplicar presión inflando burbujas en diferentes puntos estratégicos de la piel de la mano. Para esto colocaron una gran cantidad de puntos, por esto es uno de los guantes con mayor fidelidad de tacto, por su alta resolución. En las alternativas de menor fidelidad, se encuentra un uso marcado de vibradores (de diferentes tecnologías), mediante los cuales se busca ofrecer una respuesta en la interacción con el mundo del usuario. Por un lado, este enfoque es económico y sencillo, aunque no permite producir la verdadera sensación de un contacto. Por otro lado, esto último no quiere decir que no produzca sensaciones verosímiles, ya que parte de los estímulos detectados por los mecanorreceptores de la mano son vibraciones de frecuencia elevada (superior a 100Hz).

Marca	Compatibilidad	Costo	Valor	Movilidad	Comodidad
 haptx	Es compatible con el HTC Vive Pro. Tiene SDK para Unity, Unreal Engine y Steam VR.	No informe, pero se presume altamente costoso.	Sensación de tacto realista.	No es inalámbrico.	El guante es grande, ocupa gran parte de la mano y el brazo y necesita cargar una mochila.
 MANUS	Tiene SDK para Unity y Unreal Engine.	Entre 2500 y 5000 euros.	Simplicidad para el seguimiento de la posición de los dedos.	Inalámbrico.	Diseño minimalista, es pequeño y poco aparatoso.
 SenseGlove	Compatible con cascos standalone. Se integra con Unity.	4500 euros.	Uso intuitivo.	Inalámbrico.	Fácil de colocar.
 VRgluv	Tiene SDK para Unity, Unreal Engine y Steam VR. Compatible con Meta, HTC Vive, entre otros.	9000 dólares	Orientado a la industria	Inalámbrico.	Poco aparatoso, permite mantener la movilidad de la mano sin afectarla.

Tabla 3.1: Comparación de competencia general

Marca	Tacto	Fuerza	Seguimiento de dedos	Seguimiento de manos
 haptx	Tecnología patentada para desplazar la piel en 133 puntos de la mano.	Hasta 175N de fuerza de resistencia en cada mano.	Tecnología patentada de detección magnética con 30 grados de libertad en el movimiento de la mano, con precisión submilimétrica.	Para realizar el seguimiento de la ubicación de las manos, utilizan módulos Vive Trackers que proveen con su producto.
 MANUS	Vibraciones en cada dedo al tocar un objeto.	No hay.	Utilizan un sensor resistivo flexible y una IMU de 9 grados de libertad por dedo.	Utilizan algoritmos basados en sensores, usando IMUs.
 SenseGlove	Vibraciones en los dedos para simular el tacto.	Hasta 20N de fuerza por cada dedo, utiliza hilos y frenos magnéticos.	No informa.	Para realizar el seguimiento de las manos, dependen del casco Pico Neo 2 que posee la funcionalidad ya integrada.
 VRgluv	No hay información.	Hasta 45N por dedo de fuerza activa.	Tiene 3 grados de libertad por dedo y 5 grados de libertad por pulgar. Incluye el seguimiento de manos y de dedos.	Para el seguimiento de la mano, utilizan Vive Trackers.

Tabla 3.2: Comparación de competencia funcional

3.1.1.2. Encuesta

Como no se cuenta con un cliente concreto, no hay nadie que imponga los requerimientos del producto y la importancia de cada uno de ellos. Se optó por realizar una encuesta con el fin de relevar la importancia que se les da a los distintos aspectos del producto y tener otra fuente de requerimientos además de los propios.

3.1.1.3. Público alcanzado

La encuesta fue respondida por 130 personas, cuya distribución de edades y relación académica con la tecnología se muestran en la Ilustración .

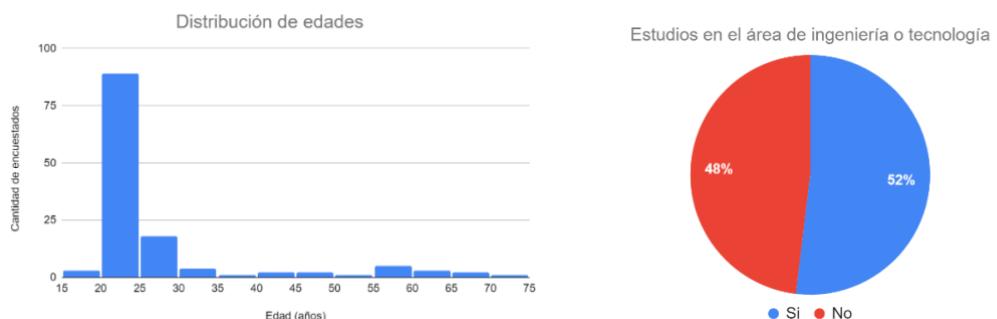


Ilustración 3.1: Distribución de edades y estudios relacionados a tecnología de los encuestados

Se trata de un público mayoritariamente joven, con un 25% de los encuestados de 22 años. La mayoría de los estudios relacionados con tecnología son de ingenierías electrónica, informática e industrial. Debido a lo específico que es el público, joven y muy cercano a la tecnología, esta encuesta no será tomada como representativa de todo el mercado.

3.1.1.4. Relación con la realidad virtual

La relación del público con la realidad virtual se muestra en la Ilustración .

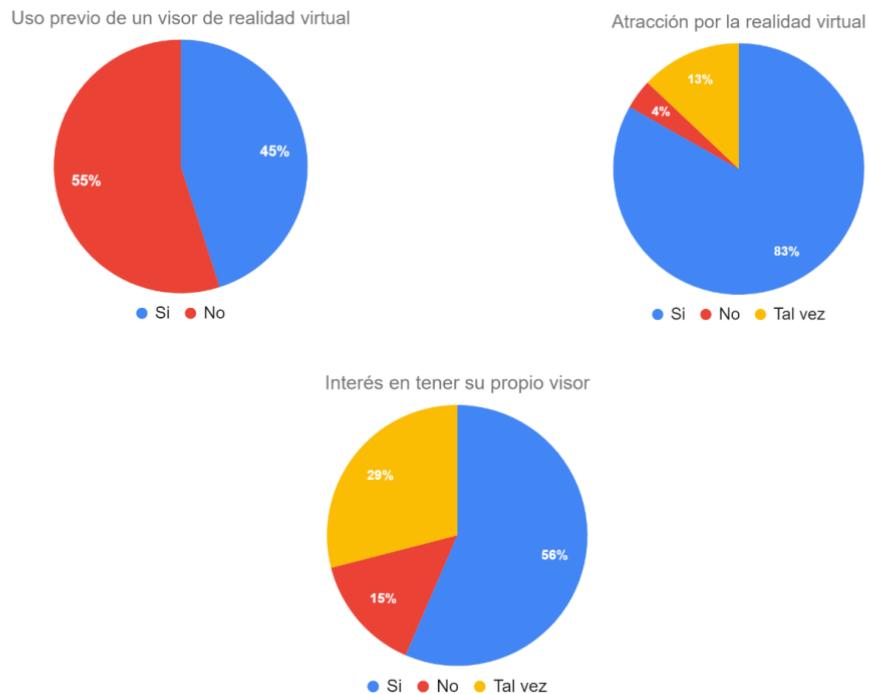


Ilustración 3.2: Porcentaje de encuestados que ha usado un visor, atracción por el campo e interés en poseer un visor.

Si bien poco más de la mitad de los encuestados nunca ha usado un visor de realidad virtual, más del 80% de ellos manifestó verse atraído por el campo y sólo el 15% dijo que no le interesaría tener su propio visor.

Respecto de las aplicaciones de interés para la realidad virtual, la mayoría de los encuestados manifestó interés por los juegos y simuladores, como se muestra en la Ilustración . Luego a algunas personas les interesa para películas, a dos personas les gustaría usarla con fines didácticos, poniendo ambas como ejemplo la visita de lugares antiguos o de acceso imposible para una clase en un aula. Finalmente, una persona dijo querer usarla con fines de rehabilitación.

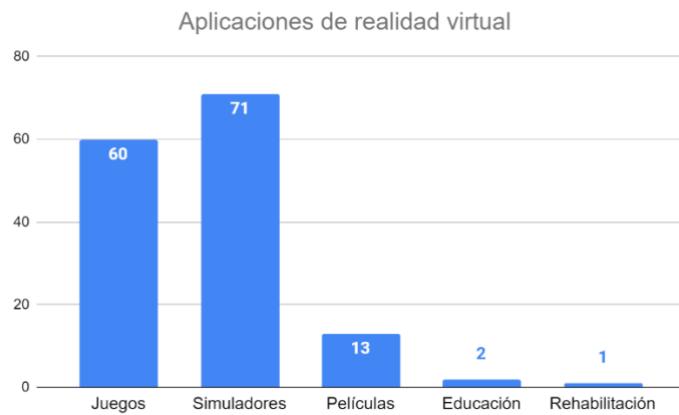


Ilustración 3.3: Aplicaciones de interés de la realidad virtual

3.1.1.5. Precio

Pasando de hablar sobre la realidad virtual en general a nuestro producto en particular, en la Ilustración 3.4 se encuentra la distribución de rango de precios que los encuestados están dispuestos a pagar por el guante.

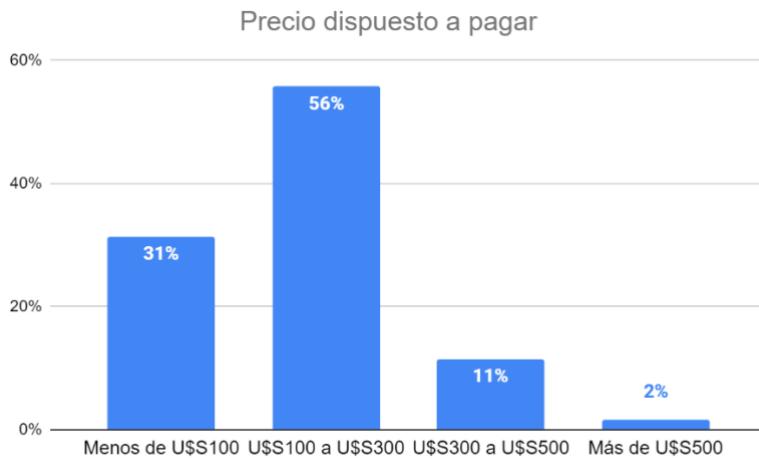


Ilustración 3.4: Precio que los encuestados están dispuestos a pagar por nuestro producto

Más de la mitad de los encuestados manifestó estar dispuesto a pagar entre U\$S100 y U\$S300, similar al precio del Meta Quest 2. De los restantes, la mayoría no estarían dispuestos a pagar más de U\$S100. Sin embargo, debido a que el precio de referencia del mercado es mucho mayor al indicado de la encuesta, será difícil cumplir. Se concluye que los encuestados no fueron correctamente informados del precio de mercado de los demás guantes a la hora de elegir el precio.

3.1.1.6. Importancia de cada requerimiento

En la Ilustración se muestran las ponderaciones de los clientes para los distintos aspectos consultados del producto. En este caso no se tuvieron en cuenta todas las respuestas, sino que se filtró para utilizar únicamente las de los encuestados que hubieran dado un total de puntos menor a 30 al conjunto de requerimientos.

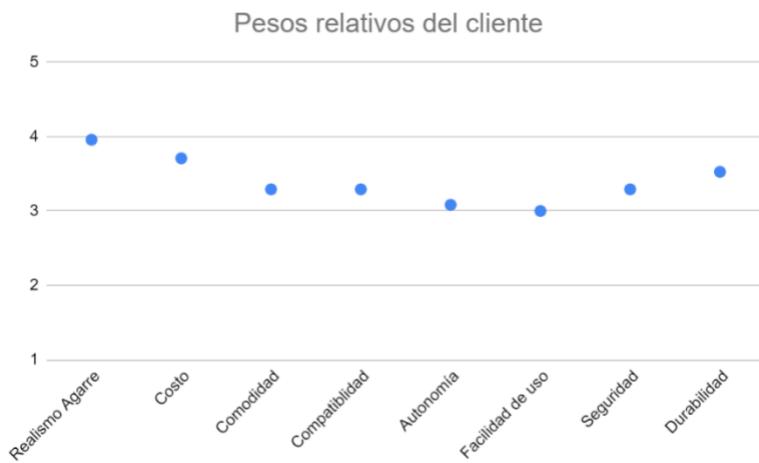


Ilustración 3.5: Pesos relativos de los encuestados filtrados

Se realizó el filtrado porque hubo gran cantidad de encuestados que asignaron puntajes muy altos a todos los requerimientos, lo cual causaba que muchos requerimientos tengan un mismo peso muy alto. Con el filtrado aplicado, se obtuvieron las valoraciones más criteriosas.

A partir de los resultados numéricos, se extrae el siguiente orden de importancia para los requerimientos:

1. Grado de realismo del agarre
2. Costo
3. Durabilidad
4. Comodidad, Compatibilidad y Seguridad
5. Autonomía y Facilidad de uso

En vistas de que se busca un producto de bajo costo, se puede interpretar que a la hora de reducir el los encuestados prefieren dejar de lado autonomía y facilidad de uso antes que los demás requerimientos.

3.1.1.7. Opiniones y sugerencias

En la sección que se dejó libre para sugerencias se obtuvieron varios comentarios valiosos.

En primer lugar, hubo sugerencias respecto de las aplicaciones donde el guante podría mejorar la experiencia de realidad virtual:

- “Simuladores, de tiro, de tiro de artillería, de aviación, de observación, de observación aérea”
- “Pruebas de esfuerzo para personas con algún tipo de discapacidad motriz”
- “Tener un simulador que facilite las prácticas de las cirugías sería muy útil, más aún si simula el tacto que deben tener los cirujanos con el instrumento”

Además, hubo comentarios sobre los requerimientos:

- “La autonomía depende del precio, si lo pagas barato aceptas que dure 30 minutos para jugar un rato”
- “La durabilidad debería tener en cuenta las perspectivas de mejora que puedan volver obsoleto al producto, ¿para qué quiero algo muy durable si al año debo cambiarlo?”

Finalmente, dos personas mencionaron un requerimiento específico, y es que el guante debe poder ser usado por un amplio rango de tamaños de manos.

3.1.2. Casa de Calidad

A continuación, se muestra el análisis de Casa de Calidad del producto, que busca determinar la importancia de cada uno de los requerimientos generales del producto con el fin de saber en qué dirección deben ser enfocados los esfuerzos de desarrollo. Se incluye la justificación para las distintas relaciones dadas en la Sección 11.7.

Los pesos del cliente son obtenidos a partir de lo observado de la competencia en el análisis de mercado y ecualizados mediante los resultados de la encuesta, que, si bien su público era poco representativo, permite obtener una idea. La justificación de las elecciones se encuentra en la Sección 11.7.

El principal resultado del análisis es que más del 50% de la calidad del producto reside en qué tan buenas sean las especificaciones de sensación de tacto, control del movimiento de los dedos y detección de la posición de los dedos y la mano, en respectivo orden de importancia. En un segundo orden de importancia vienen el peso y tamaño del guante, la aislación y protección eléctrica y el tener un ensamblaje robusto mecánicamente.

Es muy importante contar con estas ponderaciones para saber hacia dónde orientar los esfuerzos y recursos a lo largo del diseño, por más que todos los requerimientos y especificaciones son importantes y deben cumplirse.

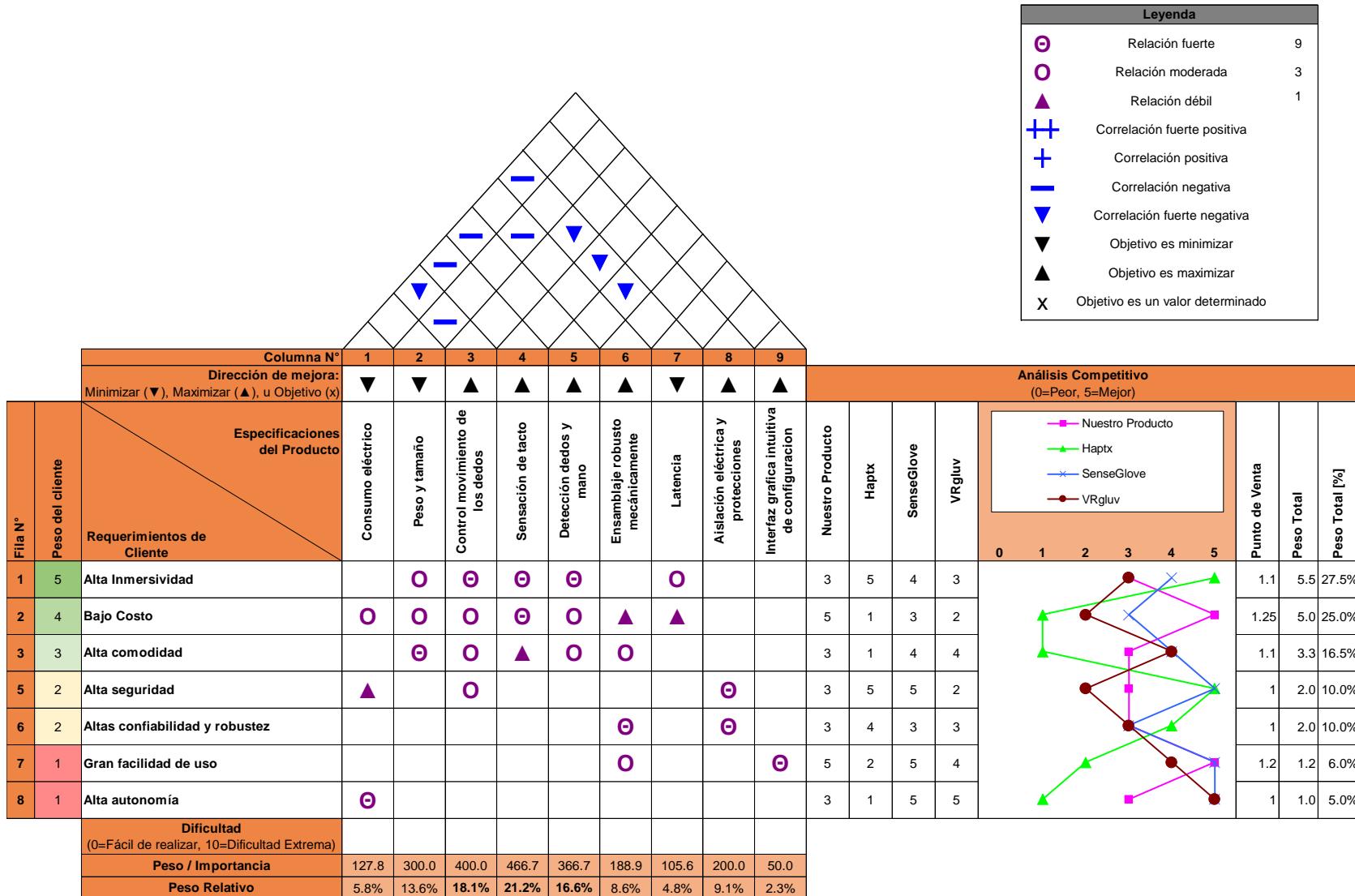


Ilustración 3.6: Casa de Calidad

3.1.3. Requerimientos finales para trazabilidad

En la Tabla 3.3 se exponen los requerimientos del producto. Cada requerimiento es identificado de forma única, indicando su origen o procedencia, y, además, qué especificaciones de diseño se generan a raíz de tal requerimiento.

ID	Descripción	Especificaciones de Diseño	Origen
REQ-01	El producto deberá ser compatible con el Meta Quest 2®.	INT-PRV-01	Cliente
REQ-02	El producto deberá proveer una interfaz de programación para la plataforma de desarrollo Unity.	INT-SDK-00 INT-SDK-01 INT-SDK-02 INT-SDK-03 INT-SDK-04 INT-SDK-05	Cliente
REQ-03	El peso del producto deberá no limitar su comodidad y usabilidad.	IMP-DIM-01	Cliente
REQ-04	El usuario deberá poder sentir la forma o geometría de objetos virtuales.	FUN-IMV-01 INT-IMM-01 INT-IMM-07 INT-SDK-01	Cliente
REQ-05	El producto deberá poder estimular el sentido de tacto del participante. Para ello, el usuario deberá poder sentir la presión de contacto que se produce en los pulpejos de los dedos, cuando se agarra un objeto virtual. Además, deberá poder producir vibraciones sobre la mano, con el fin de simular vibraciones mecánicas de herramientas y alertas e ilusiones propias de una interfaz de usuario.	FUN-IMV-02 INT-IMM-04 INT-IMM-05 INT-SDK-04 INT-IMM-08	Cliente
REQ-06	El precio del producto no deberá superar U\$800.	IMP-COS-01	Análisis de la competencia Encuesta
REQ-07	El producto deberá ubicar la posición de los dedos en el espacio.	FUN-IMV-03 INT-IMM-02 INT-IMM-06 INT-SDK-02	Cliente
REQ-08	El producto deberá ubicar la posición de la mano en el espacio.	FUN-IMV-04 INT-IMM-03 INT-SDK-03	Cliente

REQ-09	El producto deberá ser inalámbrico con una autonomía semejante a la del Meta Quest 2®.	FUN-GEN-03 PER-01	Cliente
REQ-10	El producto deberá poder operar mientras se está cargando.	INT-PWR-04	Cliente
REQ-11	El producto deberá poder operar en todas las condiciones normales de temperatura y humedad que se pueden encontrar en ambientes interiores a nivel global.	IMP-AMB-01 IMP-AMB-02 IMP-AYT-01 IMP-AYT-02	Táctico
REQ-12	Para que el producto se conecte y vincule con la plataforma de realidad virtual, no será necesario que el usuario realice ninguna configuración técnica, ya sea de software o hardware. Es decir, no deberá ser necesario que el participante realice configuraciones manuales previo a establecer una conexión entre el producto y el casco de realidad virtual. No deberá ser necesario que el participante posea conocimientos técnicos para proceder con tal conexión.	FUN-GEN-02	Táctico
REQ-13	Las baterías del producto deberán ser recargables y se deberán poder reemplazar si el uso del dispositivo supera su vida útil.	INT-PWR-01 PER-03	Cliente
REQ-14	El producto deberá tener un uso intuitivo.	RAM-MAN-04 RAM-MAN-05 RAM-MAN-06 RAM-MAN-07	Cliente
REQ-15	Para cargar o alimentar el dispositivo, se deberá utilizar un conector Jack-DC.	INT-PWR-02	Cliente
REQ-16	El usuario no deberá experimentar sensaciones de retraso en la interacción con el mundo virtual.	PER-02	Cliente
REQ-17	El producto deberá ser seguro y apto para personas mayores de 14 años.	RAM-SEG-01 RAM-SEG-02 RAM-SEG-03	Cliente, Factibilidad Legal
REQ-18	Si el dispositivo se encuentra encendido, pero no es utilizado por un determinado tiempo, se deberá apagar automáticamente.	FUN-GEN-01 INT-DCA-02	Cliente
REQ-19	El producto será un guante que deberá tener variantes para ambas manos, izquierda o derecha. Y deberá ser apto para el tamaño de la mano de hombres y mujeres.	IMP-DIM-02	Encuesta
REQ-20	El producto deberá ser compatible electromagnéticamente con su entorno.	IMP-EMC-01	Factibilidad Legal (5.4.2)

REQ-21	Se deberá poder ver el estado de carga del producto, entendido como el porcentaje de energía almacenada remanente en la batería interna.	INT-SDK-05 INT-PRV-02 INT-DCA-03	Cliente
REQ-22	El producto deberá tener un MTBF no menor a 9 meses.	RAM-CON-02	Cliente
REQ-23	El dispositivo se deberá poder actualizar, diagnosticar y configurar.	INT-DCA-01 INT-DCA-02 INT-DCA-03 INT-DCA-04 INT-DCA-05 INT-DCA-06 INT-DCA-07 RAM-MAN-01 RAM-MAN-02 RAM-MAN-03	Cliente
REQ-24	La interfaz de carga o alimentación del dispositivo deberá ser robusta y tener protección para evitar que se dañe fácilmente el equipo.	INT-PWR-03 INT-PWR-05 INT-PWR-06	Táctico
REQ-25	El dispositivo deberá tener una vida útil igual o superior a 2 años y una disponibilidad mayor al 99.9% a lo largo de toda su vida útil.	RAM-DIS-01 RAM-CON-01	Cliente

Tabla 3.3: Requerimientos

3.2. Diagrama Funcional de Interfaces

En la Ilustración 3.7: Diagrama Funcional de Interfaces se muestra el diagrama funcional de interfaces.

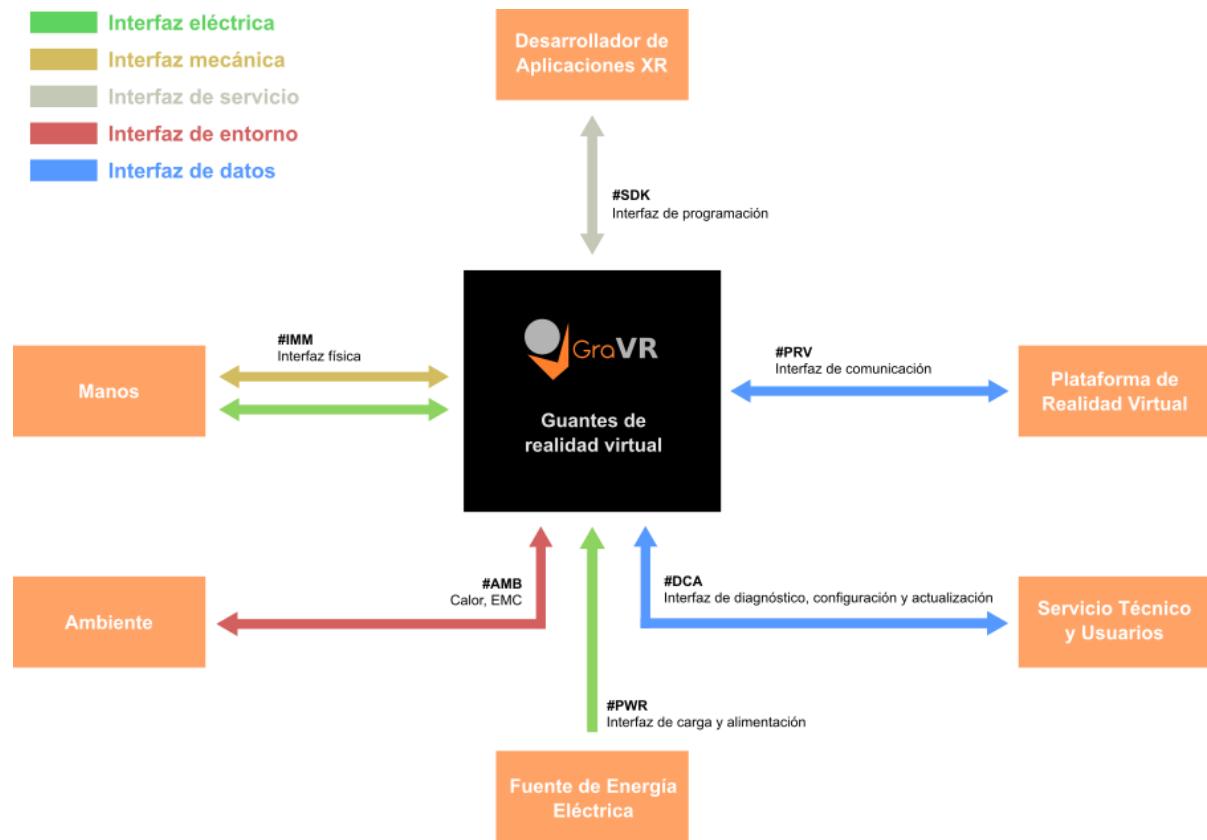


Ilustración 3.7: Diagrama Funcional de Interfaces

3.3. Especificaciones de Diseño

Leyenda para Especificaciones	
Aplicabilidad	Validación
P: Prototipo	I: Inspección Visual
	D: Documentación de Diseño
F: Producto Final	S: Simulación
	T: Test

Tabla 3.4: Leyenda de uso en especificaciones

3.3.1. Especificaciones Funcionales

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
			Validación
FUN-IMV-01	El dispositivo deberá poder recibir información de la plataforma de realidad virtual, que se encargará de la simulación física del mundo, la cual indicará qué fuerzas deben ser ejercidas sobre los dedos de la mano para provocar sobre el usuario la sensación de forma y geometría del objeto virtual.	REQ-04	P, F T
FUN-IMV-02	El dispositivo deberá poder recibir información de la plataforma de realidad virtual, que se encargará de la simulación física del mundo, la cual indicará qué efecto de tacto debe ser reproducido sobre los dedos y la palma de la mano.	REQ-05	P, F T
FUN-IMV-03	El dispositivo deberá poder enviar a la plataforma de realidad virtual la ubicación relativa de los dedos, que será utilizada para detectar colisión con objetos virtuales.	REQ-07	P, F T
FUN-IMV-04	El dispositivo deberá poder enviar a la plataforma de realidad virtual la ubicación relativa de las manos, que será utilizada para ubicar las manos y los dedos y detectar colisiones con objetos virtuales.	REQ-08	P, F T

Tabla 3.5: Especificaciones Funcionales de Interacción con el Mundo Virtual

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
FUN-GEN-01	En caso de inactividad, el dispositivo se deberá apagar para ahorrar energía. Por defecto, se considerará inactividad cuando no se haga uso por más de 5 minutos del equipo, pero esta opción será configurable por el usuario.	REQ-18	P, F T	
FUN-GEN-02	El proceso de conexión entre el guante y el visor no deberá requerir configuración manual previa.	REQ-12	P, F T	
FUN-GEN-03	El dispositivo deberá funcionar de forma inalámbrica.	REQ-09	P, F T	

Tabla 3.6: Especificaciones Funcionales Generales

3.3.2. Especificaciones de Interfaz

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
INT-SDK-00	El dispositivo deberá proveer una interfaz de programación escrita en el lenguaje C# compatible con el entorno de desarrollo de Unity.	REQ-02	P, F T	
INT-SDK-01	La interfaz de programación deberá permitir configurar qué fuerzas deben accionarse sobre cada uno de los dedos de la mano.	REQ-02 REQ-04	P, F T	
INT-SDK-02	La interfaz de programación deberá exponer información de la ubicación de los dedos.	REQ-02 REQ-07	P, F T	
INT-SDK-03	La interfaz de programación deberá exponer información de la ubicación de la mano.	REQ-02 REQ-08	P, F T	
INT-SDK-04	La interfaz de programación deberá permitir configurar qué sensación de tacto debe reproducirse sobre los dedos o la palma.	REQ-02 REQ-05	P, F T	
INT-SDK-05	La interfaz de programación deberá exponer el estado de carga del producto.	REQ-02 REQ-21	F T	

Tabla 3.7: Especificaciones de Interfaz SDK

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
INT-PRV-01	El dispositivo se deberá comunicar con la plataforma de realidad virtual según el estándar Bluetooth 5.0 (Low Energy).	REQ-01	P, F T	
INT-PRV-02	El dispositivo deberá exponer su estado de carga través de la interfaz de comunicación con la plataforma de realidad virtual.	REQ-21	F T	

Tabla 3.8: Especificaciones de Interfaz PRV

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
INT-DCA-01	La interfaz deberá permitir actualizar el firmware del dispositivo a una versión compatible con su hardware.	REQ-23	F T	
INT-DCA-02	El usuario deberá poder configurar el tiempo máximo de inactividad para la función de apagado automático.	REQ-23 REQ-18	F T	
INT-DCA-03	La interfaz deberá permitir obtener información del estado del dispositivo para detectar si algún componente requiere mantenimiento o debe ser reemplazado.	REQ-23 REQ-21	F T	
INT-DCA-04	El diagnóstico, la configuración y la actualización se deberán realizar a través de una aplicación para computadoras con sistema operativo Windows. La aplicación deberá conectarse al dispositivo a través de un medio cableado con USB 3.0.	REQ-23	F	
INT-DCA-05	La interfaz deberá permitir al usuario o personal de servicio técnico ejecutar procesos de diagnóstico en los cuales el dispositivo automáticamente evalúe el estado de sus sensores, actuadores y periféricos.	REQ-23	F	
INT-DCA-06	La interfaz permitirá acceder y visualizar en tiempo real los mensajes internos del dispositivo para información, error, advertencia o propósitos de depuración.	REQ-23	F	
INT-DCA-07	La interfaz deberá permitir obtener el estado de carga de la batería.	REQ-23 REQ-21	F	

Tabla 3.9: Especificaciones de Interfaz DCA

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
INT-PWR-01	Las baterías del dispositivo deberán ser recargables.	REQ-13	F T	
INT-PWR-02	Para cargar o alimentar el dispositivo, se utilizará un conector Jack DC.	REQ-15	F T	
INT-PWR-03	El dispositivo deberá tener protección contra cortocircuitos en su interfaz de carga o alimentación.	REQ-24	F T	
INT-PWR-04	El dispositivo podrá ser energizado por un medio cableado, permitiendo que funcione cuando sus baterías se estén cargando.	REQ-10	F T	
INT-PWR-05	El dispositivo deberá tener protección contra conexiones con polaridad negativa de tensión.	REQ-24	F T	
INT-PWR-06	El dispositivo no se dañará si la tensión aplicada en la interfaz de carga o alimentación es, $-30V < V_{CC} < 30V$	REQ-24	F T	

Tabla 3.10: Especificaciones de Interfaz PWR

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
INT-IMM-01	El producto deberá ser capaz de ejercer una fuerza continua igual o superior a 10N sobre cada dedo de la mano.	REQ-04	P, F T	
INT-IMM-02	El dispositivo deberá poder ubicar la posición relativa de los dedos con una precisión igual o menor a 2mm.	REQ-07	P, F T	
INT-IMM-03	El dispositivo deberá poder ubicar la posición relativa de las manos con una precisión igual o menor a 2mm.	REQ-08	P, F T	
INT-IMM-04	El dispositivo deberá poder generar un estímulo del tipo vibratorio en los dedos, en la eminencia tenar, en la eminencia hipotenar y en el rodete digito palmar. El estímulo debe ser de una frecuencia entre 200 Hz y 300 Hz con amplitudes superior a $0,1\mu m$.	REQ-05	P, F T	
INT-IMM-05	La mano y los dedos, como zonas de tacto, serán discretizadas espacialmente. El dispositivo será capaz de reproducir el tacto en los dedos, en la eminencia tenar, en la eminencia hipotenar y en el rodete digito palmar.	REQ-05	P, F T	

INT-IMM-06	El dispositivo deberá poder seguir el movimiento de los dedos de la mano con 11 grados de libertad. Se deberá poder detectar la extensión o flexión para las falanges distales y proximales de todos los dedos y se deberá poder detectar la abducción o aducción del metacarpo del dedo pulgar.	REQ-07	P, F T
INT-IMM-07	El dispositivo tendrá 5 grados de libertad para aplicar fuerzas sobre la mano. Cada grado de libertad corresponde a una fuerza de resistencia al movimiento de flexión del dedo en cuestión.	REQ-04	P, F T
INT-IMM-08	El dispositivo deberá poder generar una presión de contacto normal en la superficie de la piel, particularmente en las yemas de los dedos. La presión de contacto deberá ser de intensidad controlable. El rango y resolución de control de la intensidad deberá ser tal que la media de las personas pueda discriminar una variación en la presión.	REQ-05	P, F T

Tabla 3.11: Especificaciones de Interfaz IMM

3.3.3. Especificaciones de Performance

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
PER-01	El dispositivo deberá tener una autonomía igual o mayor a 1 hora y media.	REQ-09	F T	
PER-02	El tiempo de retraso, medido entre que la plataforma de realidad virtual comunica al producto de una interacción del usuario con un objeto virtual, y el equipo reproduce la correspondiente reacción física sobre la mano, será menor a 50 ms.	REQ-16	P, F T	
PER-03	La batería deberá soportar 125 ciclos de carga completa o más, antes de que sea necesario cambiarla por una nueva.	REQ-13	P, F	

Tabla 3.12: Especificaciones de Performance

3.3.4. Especificaciones de Implementación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
IMP-AMB-01	El dispositivo operará normalmente cuando la temperatura ambiente sea $0^{\circ}\text{C} < T_{AMB} < 40^{\circ}\text{C}$	REQ-11	F T	
IMP-AMB-02	El dispositivo operará normalmente cuando la humedad sea $5\% < RH < 95\%$	REQ-11	F T	

Tabla 3.13: Especificaciones de Operación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
IMP-AYT-01	El dispositivo no sufrirá daños cuando, estando desenergizado, la temperatura ambiente sea $-10^{\circ}\text{C} < T_{AMB} < 60^{\circ}\text{C}$	REQ-11	F T	
IMP-AYT-02	El dispositivo no sufrirá daños cuando, estando desenergizado, la humedad sea $5\% < RH < 95\%$	REQ-11	F T	

Tabla 3.14: Especificaciones de Almacenamiento y Transporte

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
IMP-DIM-01	El dispositivo tendrá un peso igual o menor a 500g.	REQ-03	F T	
IMP-DIM-02	El tamaño del guante deberá ser apto para el tamaño de la mano de hombres y mujeres que se encuentren en el rango $16\text{cm} < \text{largo de mano} < 21\text{cm}$ $7,4\text{cm} < \text{ancho de palma} < 9,6\text{cm}$	REQ-19	F D	

Tabla 3.15: Especificaciones Dimensionales y de Peso

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
IMP-COS-01	El costo del dispositivo será de \$550usd.	REQ-06	F D	

Tabla 3.16: Especificaciones de Costos

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad	
			Validación	
IMP-EMC-01	El dispositivo deberá cumplir los límites de emisión dados por FCC Parte 15, especificados en la Tabla 5.24.	REQ-20	F	

Tabla 3.17: Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética

3.3.5. Especificaciones de Servicio (RAMS)

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
3. DEFINICIÓN DE PRODUCTO			

Validación			
ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
RAM-CON-01	El producto deberá tener un MTBF no menor a 9 meses.	REQ-22	F T
RAM-CON-02	El producto deberá tener una vida útil igual o mayor a 2 años.	REQ-25	F T

Tabla 3.18: Especificaciones de Confiabilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
RAM-DIS-01	El dispositivo deberá tener una disponibilidad mayor al 99.9% a lo largo de su vida útil.	REQ-25	F T

Tabla 3.19: Especificaciones de Disponibilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
RAM-MAN-01	Dado que se deberá poder actualizar el firmware del dispositivo a una versión compatible con su hardware, a través de la interfaz de diagnóstico, configuración y actualización. Se deberá realizar un control de versiones del producto, su hardware y su firmware. Se deberá documentar qué versiones del hardware soportan cada versión nueva de firmware que sea desarrollada, permitiendo gestionar adecuadamente la actualización a través de la aplicación de escritorio.	REQ-23	F T
RAM-MAN-02	El producto deberá tener documentado el proceso de diagnóstico asistido por la aplicación de escritorio. Se deberán enumerar las fallas detectadas por el proceso de diagnóstico, sus posibles causas y soluciones.	REQ-23	F T
RAM-MAN-03	El producto deberá tener documentado cuáles son los parámetros y las opciones personalizables de las funcionalidades del guante. Se deberá detallar cómo deben configurarse a través de la aplicación de escritorio.	REQ-23	P, F T
RAM-MAN-04	El producto deberá informar, por medio de una indicación luminosa, cuando se haya establecido conexión con la plataforma de realidad virtual.	REQ-14	P, F T
RAM-MAN-05	El producto deberá contar con un manual de usuario.	REQ-14	P, F D

RAM-MAN-06	El producto informará, por medio de una indicación luminosa, cuando se encuentre desconectado de la plataforma de realidad virtual.	REQ-14	F T
RAM-MAN-07	El dispositivo deberá informar, por medio de una indicación luminosa, cuando tenga batería baja.	REQ-14	F T

Tabla 3.20: Especificaciones de Mantenibilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad
			Validación
RAM-SEG-01	La estructura exterior del dispositivo no deberá presentar bordes filosos ni puntas accesibles al usuario.	REQ-17	F T
RAM-SEG-02	La batería del dispositivo deberá desconectarse en caso de detectar que esta se encuentra a temperaturas superiores a 45°C en estado de carga o 60°C en estado de descarga.	REQ-17	F T
RAM-SEG-03	La batería del dispositivo deberá desconectarse en caso de detectar consumos de corriente mayores a la máxima descarga posible de la misma durante más de 30 segundos.	REQ-17	F T

Tabla 3.21: Especificaciones de Seguridad

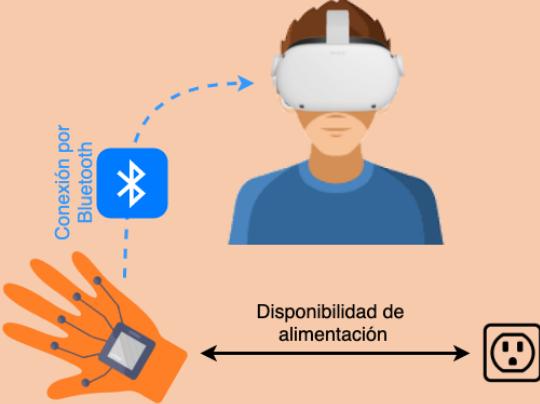
4. Plan de Validación

La presente sección está dedicada al diseño y especificación de las validaciones a realizarse sobre el producto, para comprobar el cumplimiento de los requerimientos planteados en la Sección 3. Para ello se hará uso del conocimiento de las interfaces de este, descriptas en 3.

4.1. Diseño de Bancos de Pruebas

Muchos de los bancos de prueba desarrollados a continuación se referirán al uso de un **programa de prueba**. Esta aplicación desarrollada en Unity, en todos los casos, consiste en un entorno de realidad virtual en el cual el usuario puede interactuar con diferentes objetos en su entorno, explorando las funcionalidades de este producto. Entre estas funcionalidades a evaluar, se contará con elementos para probar:

- *Tracking* de dedos y manos.
- Agarre de objetos virtuales y su movimiento.
- *Force-feedback*.
- *Haptic-feedback*.

Banco número	Detalle
BP1	 <p>Funcionamiento general Utilizando el programa de prueba de las funcionalidades básicas del producto, el cual debe estar compilado en la plataforma Meta Quest 2®. Se tiene a disposición también una fuente de alimentación para el DUT con conexión Jack DC.</p>
BP2	 <p>Programador externo Dado el GraVR SDK con toda su documentación y funcionalidades claras, se le presenta el producto a un programador de aplicaciones de VR externo, sin intereses involucrados en el proyecto mas que el de usarlo, y se le deja desarrollar su aplicación. Dispone de una computadora con hardware adecuado para las últimas versiones de Unity Engine, y un Meta Quest 2® para probar su aplicación.</p>

BP3	 <p>Balanza de peso</p> <p>Se coloca el DUT sobre una balanza para determinar su peso. El instrumento de medición debe poder trabajar en el rango de 0 a 750g, con resolución y error menor a 10g. Las condiciones de medición son las normales de presión y temperatura para el Área Metropolitana de Buenos Aires.</p>
BP4	<p>Condiciones de temperatura y humedad</p> <p>Con el DUT completamente ensamblado y conectado a una plataforma de VR compatible, se lo coloca dentro de una cámara de temperatura y humedad controladas. Dependiendo del test a realizar será necesario ejecutar una aplicación de prueba para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo.</p>
BP5	<p>Aplicación de diagnóstico</p> <p>Con el DUT conectado mediante conexión USB 3.0, se corre en una computadora la aplicación de diagnóstico disponible.</p>
BP6	<p>Accelerated Life Testbench</p> <p>Se dispone de medios mecánicos por los cuales realizar los esfuerzos que el DUT debería soportar por parte de la mano de un usuario, pero con la capacidad de realizarlos ininterrumpidamente y a alta intensidad, en el período de 24 horas. Además, el DUT debe recibir directivas de utilizar sus actuadores (frenos y puntos de presión dactilar) con el mismo nivel de intensidad.</p>

Tabla 4.1: Descripción de bancos de prueba.

4.2. Especificaciones de Tests

Los tests serán divididos en dos categorías, por un lado, los que se realizarán para el prototipo y, por otro, los que se realizarán para el producto final.

Los tests para el prototipo tienen en cuenta los siguientes aspectos:

Aspecto	ID del test
Compatibilidad	T-PRV-01
Utilidad y funcionamiento del SDK	T-SDK-01
Funcionamiento con cable	T-PWR-01
Estado de la conexión	T-MAN-01
Funcionamiento sin configuración previa	T-GEN-01
Apagado automático	T-GEN-02

Tabla 4.2: Aspectos para el prototipo

Por otro lado, en los tests para el producto final se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

Aspecto	ID del test
Peso	T-DIM-01
Presencia de bordes filosos	T-SEG-01
Duración de la batería	T-PER-01
Estado de la batería	T-PRV-02
Recarga de las baterías	T-PWR-02
Ciclos de la batería	T-PWR-03
Funcionamiento en los rangos de temperatura dispuestos	T-AMB-01
Funcionamiento en los rangos de humedad dispuestos	T-AMB-02
Actualización, diagnóstico y configuración	T-DCA-01
Vida útil	T-LCY-01

Tabla 4.3: Aspectos para el producto final

A continuación, se detallarán los pasos a seguir para realizar los tests necesarios:

Verificar test	Detalles
T-PRV-01 T-GEN-01 T-MAN-01	Sobre el banco de pruebas BP1 se conecta el dispositivo al Meta Quest 2® y se verifica mediante el LED dedicado que este refleje este cambio en el estado de conexión (se ponga azul). Sin necesidad de realizar ninguna configuración previa, se prueba su funcionalidad. Se experimenta con la sensación de agarre, el tacto, la precisión en el movimiento de las manos y los dedos. El resultado de la prueba se considera satisfactorio cuando la totalidad de las funcionalidades previstas son utilizadas con éxito.
T-SDK-01	Sobre el banco de pruebas BP2 se solicita a un programador de aplicaciones de realidad virtual, con voluntad de utilizar este producto en sus proyectos, que con las herramientas de documentación provistas junto con el SDK, haga uso de este producto para satisfacer las necesidades de su aplicación. El desarrollador debe ser capaz de hacer uso del <i>Finger</i> y <i>Hand Tracking</i> sin necesidad de entrar en los detalles del código de actualización de las posiciones de dedos y manos. Debe, además, poder implementar las respuestas hápticas que requiera su aplicación mediante la interfaz de programación provista para controlar el <i>Force Feedback</i> y <i>Tactile Feedback</i> (<i>presión</i> y <i>vibración</i>). El programador debe poder realizar todo esto sin asistencia del equipo de desarrollo de GraVR, sino únicamente con el material de documentación provisto, y los resultados deben satisfacer las expectativas generadas por las especificaciones de este producto.
T-DIM-01 T-SEG-01	Sobre el banco de pruebas BP3 , con el prototipo ensamblado y listo para ser utilizado, se debe colocar el guante en la balanza de la forma más centrada posible. Luego de que el marcador en la balanza se estabilice en un valor, se anota el peso correspondiente. El mismo

	<p>debe ser inferior a los 500g especificados, menos el margen de error del instrumento, para asegurar el cumplimiento del requerimiento (por ejemplo, si el margen de error es 10g, no debe pesar más de 490g).</p> <p>Además, se debe verificar cualitativamente que el producto no tenga ningún borde filoso.</p>
T-PER-01	Sobre el banco de pruebas BP1 , con el guante cargado al 100%, conectado a una de las plataformas disponibles se lo utiliza con el programa de prueba de manera constante, y a un nivel de intensidad de uso normal para esta aplicación, hasta que se acabe la batería del guante. De ser necesario se conecta la plataforma a la alimentación, y se observa el tiempo que transcurre entre que se comienza a utilizar el guante y se termina la batería. La prueba será aprobada si de 100 iteraciones de la misma, la duración de la batería es mayor o igual a una hora y media, en 90 de ellos.
T-PRV-02 T-PWR-02	<p>Sobre el banco de pruebas BP1 se prende el dispositivo sin estar conectado y se verifica que el LED esté parpadeando en azul. Luego se realiza la conexión a una plataforma y el LED debe cambiar a color azul sólido indicando la conexión exitosa.</p> <p>Se gasta la batería del guante para tenerlo en 0% y se verifica que la luz LED este apagada y luego se lo conecta mediante un conector Jack DC a la alimentación para comprobar que las baterías sean recargables y a la vez que la luz LED parpadee de color verde indicando el proceso de carga. Finalmente, al llegar a 100% la luz LED del guante debería cambiar a color verde sólido.</p>
T-PWR-01	Sobre el banco de pruebas BP1 se debe ejecutar el programa de prueba con la conexión cableada y verificar que funcione correctamente.
T-GEN-02	Sobre el banco de pruebas BP1 se debe dejar de utilizar el dispositivo por 5 minutos y verificar que transcurrido ese tiempo el dispositivo se apague solo.
T-AMB-01	Sobre el banco de pruebas BP4 se debe verificar por un lado que el dispositivo siga funcionando correctamente luego de ser expuesto a temperaturas de entre $-10^{\circ}\text{C} < T_{AMB} < 60^{\circ}\text{C}$ estando desenergizado. Luego se le insertan las baterías y se vuelve a someter al producto a temperaturas entre $0^{\circ}\text{C} < T_{AMB} < 40^{\circ}\text{C}$ con el dispositivo en funcionamiento.
T-AMB-02	Sobre el banco de pruebas BP4 se debe verificar por un lado que el dispositivo siga funcionando correctamente luego de ser expuesto a un ambiente con humedad entre $5\% < RH < 95\%$ estando desenergizado. Luego se le insertan las baterías y se vuelve a someter al producto ante las mismas condiciones, pero con el dispositivo funcionando.
T-DCA-01	Sobre el banco de pruebas BP5 se debe ejecutar la aplicación de escritorio y verificar que sea posible realizar una actualización del dispositivo, correr un diagnóstico general para detectar errores y también poder configurar el tiempo de inactividad para el apagado del dispositivo.
T-LCY-01	Se realiza un Accelerated Life Test en el BP6 en un período de 24 horas, en el cual, mediante una extrapolación dada por el uso bajo condiciones extremas, se debe validar que el producto pueda soportar una vida útil de 2 años con 99% de disponibilidad, y con un tiempo promedio entre fallas de 9 meses. Dentro de las condiciones extremas se realizan repetidos, rápidos y energéticos movimientos en todas las articulaciones del guante, combinados con frenados debido al agarre de objetos virtuales, y la correspondiente presión en yemas y palma de la mano.
T-PWR-03	Se realiza un Accelerated Life Test en el BP6 en un período de 24 horas, en el cual, mediante una extrapolación dada por el uso bajo condiciones extremas, se debe validar que el producto pueda soportar 125 ciclos de batería o más. Las funciones ejecutadas en esta

prueba están orientadas a aquellas de mayor consumo energético y más demanda sobre la batería. Entre ellas se encuentran el movimiento reiterado de motores, tanto de *force-feedback* como de *tactile-feedback*, y la utilización de la unidad de control al máximo de sus capacidades.

Tabla 4.4: Especificaciones de tests

4.3. Validación por documentación

Las siguientes especificaciones serán validadas mediante la documentación del producto a lo largo del presente informe.

Aspecto	ID del test
Manual de usuario	D-MAN-02
Tamaño del guante	D-DIM-02
Costo del producto	D-COS-01

Tabla 4.5: A validar por inspección de la documentación

4.4. Matriz de Trazabilidad de Validación

Origen	REQ ID	ESP ID	TEST ID
Cliente	REQ-01: Compatibilidad con Meta Quest 2.	INT-PRV-01	T-PRV-01
Cliente	REQ-02: Interfaz de programación con Unity.	INT-SDK-00 INT-SDK-01 INT-SDK-02 INT-SDK-03 INT-SDK-04 INT-SDK-05	T-SDK-01
Cliente	REQ-03: Peso.	IMP-DIM-01	T-DIM-01
Cliente	REQ-04: Poder sentir formas y geometrías.	FUN-IMV-01 INT-IMM-01 INT-IMM-07 INT-SDK-01	T-SDK-01
Cliente	REQ-05: Poder sentir el tacto en dedos y zonas de la palma.	FUN-IMV-02 INT-IMM-04 INT-IMM-05	T-SDK-01

		INT-SDK-04 INT-IMM-08	
Análisis de la competencia Encuesta	REQ-06: Costo competitivo.	IMP-COS-01	D-COS-01
Cliente	REQ-07: Ubicar posición de los dedos en el espacio.	FUN-IMV-03 INT-IMM-02 INT-IMM-06 INT-SDK-02	T-SDK-01
Cliente	REQ-08: Ubicar posición de la mano en el espacio.	FUN-IMV-04 INT-IMM-03 INT-SDK-03	T-SDK-01
Cliente	REQ-09: Producto inalámbrico con autonomía similar a plataformas VR.	FUN-GEN-03 PER-01	T-PER-01
Cliente	REQ-10: Producto deberá poder operar conectado por cable a alimentación.	INT-PWR-04	T-PWR-01
Táctico	REQ-11: Operar bajo condiciones de temperatura y humedad presentes en el territorio argentino.	IMP-AMB-01 IMP-AMB-02 IMP-AYT-01 IMP-AYT-02	T-AMB-01 T-AMB-02
Táctico	REQ-12: Poder conectar el producto a la plataforma de VR sin configuración manual previa.	FUN-GEN-02	T-GEN-01
Cliente	REQ-13: Baterías recargables.	INT-PWR-01 PER-03	T-PWR-02 T-PWR-03
Cliente	REQ-14: Uso intuitivo.	RAM-MAN-04 RAM-MAN-05 RAM-MAN-06 RAM-MAN-07	T-MAN-01 T-PRV-02 D-MAN-02
Cliente	REQ-15: Conector Jack DC para cargar o alimentar el dispositivo.	INT-PWR-02	T-PWR-01 T-PWR-02
Cliente	REQ-16: No experimentar sensación de retraso en la interacción con el mundo virtual.	PER-02	T-SDK-01
Cliente	REQ-17: Producto seguro y apto para mayores de 14 años.	RAM-SEG-01 RAM-SEG-01	T-SEG-01

		RAM-SEG-02 RAM-SEG-03	
Cliente	REQ-18: Apagado automático por inactividad.	FUN-GEN-01 INT-DCA-02	T-DCA-01 T-GEN-02
Encuesta	REQ-19: Producto adaptable a manos de hombres y mujeres.	IMP-DIM-02 RAM-SEG-01	D-DIM-02
Ley Argentina	REQ-20: Cumplimiento de la Resolución SC N°169/2018.	IMP-EMC-01	T-SEG-01
Cliente	REQ-21: Ver estado de carga.	INT-SDK-05 INT-PRV-02 INT-DCA-03	T-PRV-02
Cliente	REQ-22: MTBF no menor a 9 meses	RAM-CON-02	T-LCY-01
Cliente	REQ-23: Poder actualizar, diagnosticar o configurar.	INT-DCA-01 INT-DCA-02 INT-DCA-03 RAM-MAN-01 RAM-MAN-02 RAM-MAN-03	T-DCA-01
Táctico	REQ-24: Interfaz de carga robusta.	INT-PWR-03 INT-PWR-05 INT-PWR-06	T-PWR-02
Cliente	REQ-25: Vida útil igual o superior a 2 años con disponibilidad mayor a 99%.	RAM-DIS-01 RAM-CON-01	T-LCY-01

Tabla 4.6: Matriz de Trazabilidad de Validación

4.5. Plan de Verificación y Validación

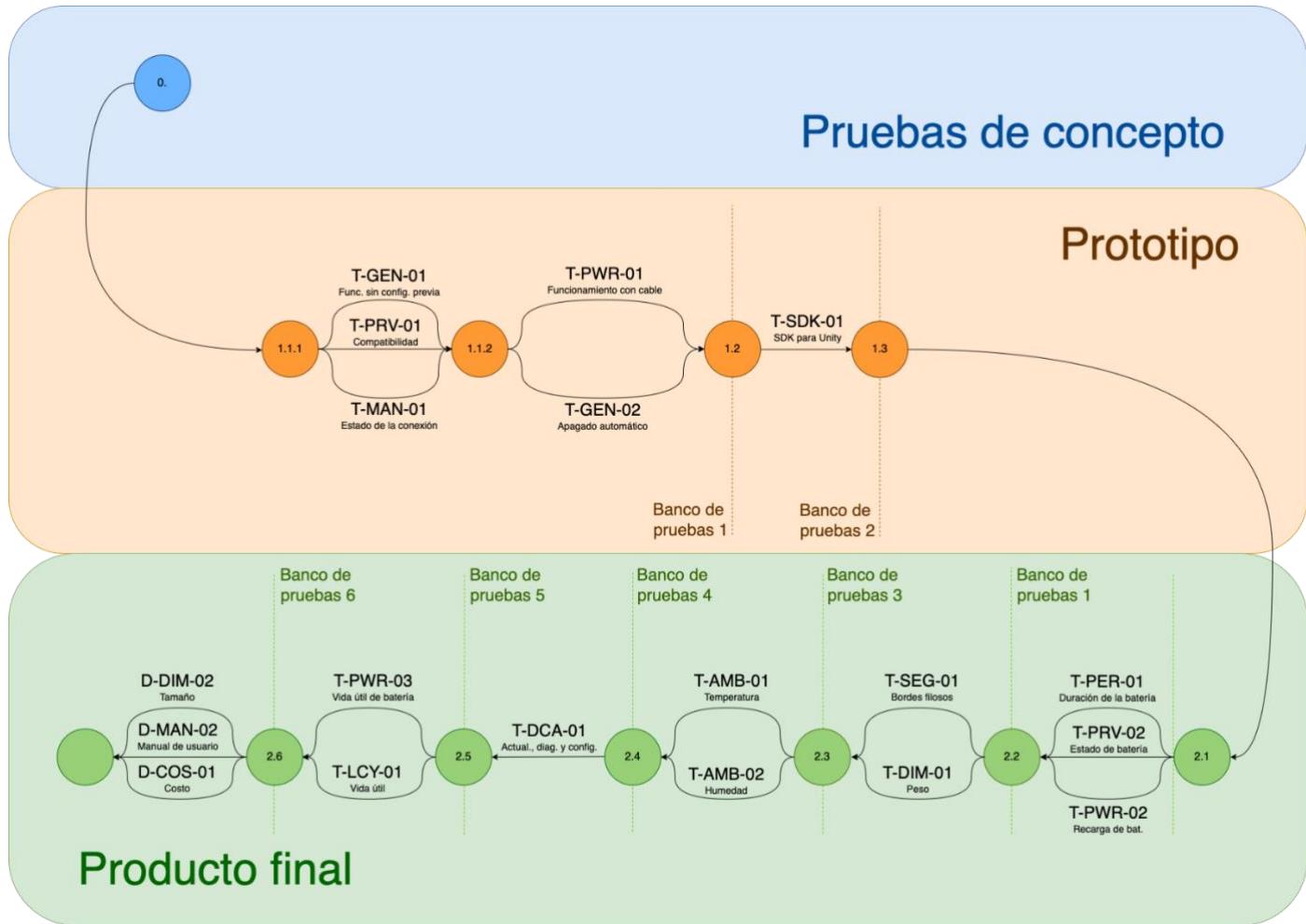


Ilustración 4.1: Plan de Validación

5. Análisis de Factibilidad

La presente sección está dedicada al análisis de la factibilidad del proyecto en cuatro pilares fundamentales: tecnológica, de tiempos, económica y de carácter legal y civil. Se realizará un análisis de cada una de ellas, exponiendo los principales factores que las afectan, y las acciones que se tomarán a nivel proyecto para que se pueda llevar a cabo.

5.1. Factibilidad tecnológica

La primera factibilidad para estudiar es la tecnológica. Se considerarán en esta sección todos los aspectos planteados en los requerimientos, que exigen una solución desde la aplicación de la tecnología, y se estudiarán diversas herramientas disponibles en el mundo científico-tecnológico de hoy, para poder ofrecerla. El producto será subdividido en módulos funcionales, para luego estudiar en detalle aquellos cuya función sea crítica para la realización del producto. Para estos módulos seleccionados, se ofrecerá una gama de soluciones que puedan sortear el problema, justificando luego la elección de una de ellas.

5.1.1. Esquema Modular

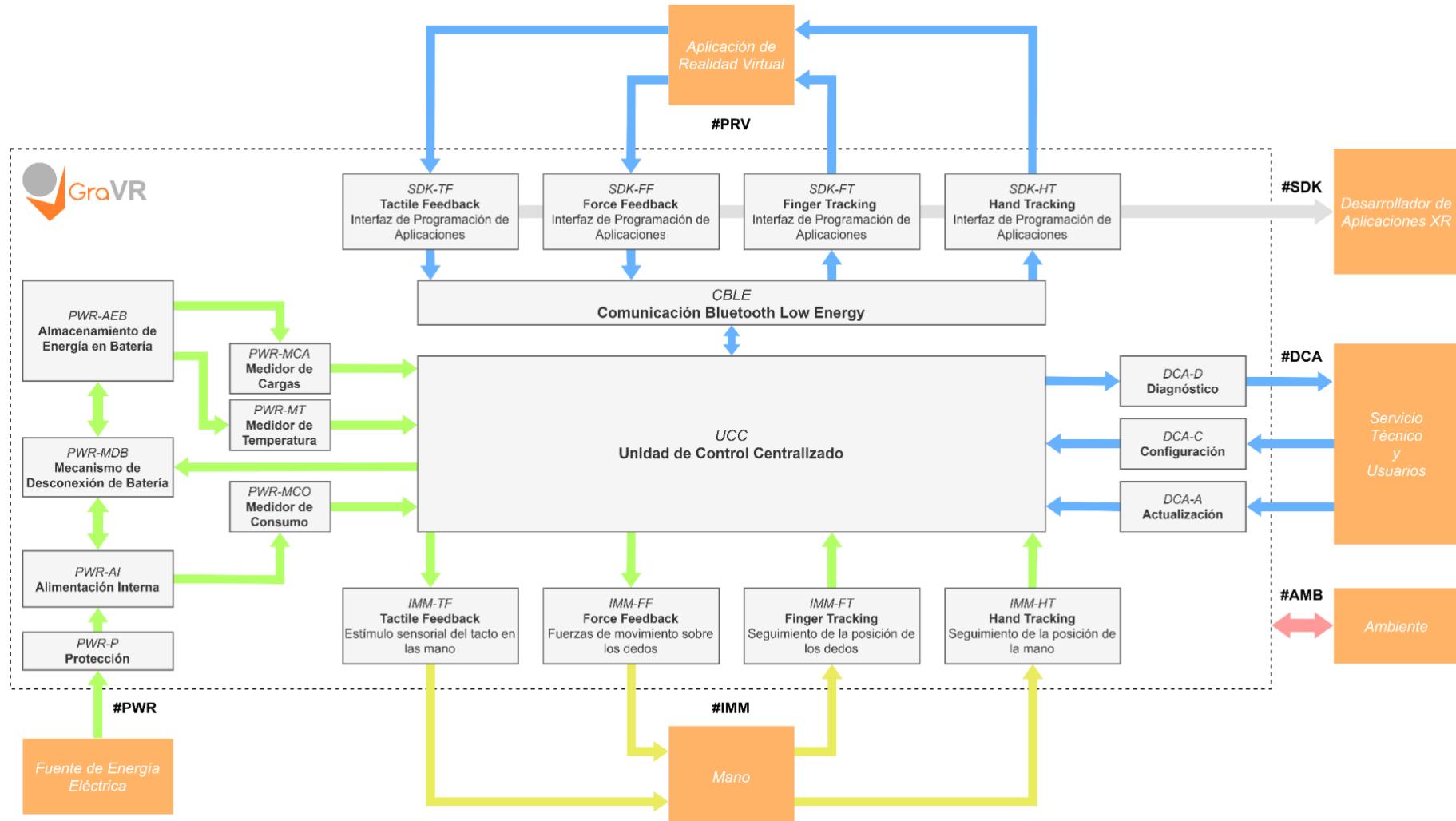


Ilustración 5.1: Esquema Modular

Se enumeran a continuación los módulos y se describe la función que cumplen.

- El módulo **PWR-P** es la protección de la entrada eléctrica proveniente de la interfaz de carga o alimentación, que protege frente a sobretensiones, conexiones de polaridad invertida, cortocircuitos o sobreconsumo.
- El módulo **PWR-AI** provee la alimentación eléctrica interna necesaria por los módulos funcionales, es un módulo de infraestructura que provee servicio al resto.
- El módulo **PWR-MDB** es el mecanismo de desconexión de batería que será accionado por la unidad de control centralizado cuando la batería se encuentre fuera de los rangos de operación de temperatura y consumo de corriente eléctrica. Esto es una medida de seguridad que deriva de las especificaciones técnicas del producto.
- El módulo **PWR-AEB** funcionalmente refiere al almacenamiento de la energía eléctrica que permite que el producto opere de forma autónoma o inalámbrica, sin necesidad de estar conectado directamente a la línea de tensión. Por requerimientos del cliente este módulo se materializa en una batería.
- El módulo **PWR-MT** es el medidor de temperatura de la batería.
- El módulo **PWR-MCA** es el medidor de cargas eléctricas de la batería, su función es permitir estimar el nivel de batería que será necesario de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto.
- El módulo **PWR-MCO** es el medidor de consumo de corriente eléctrica.
- El módulo **IMM-TF** cumple la función de enviar estímulos mecánicos a la piel del usuario para emular la respuesta sensorial del tacto cuando se produce interacción con objetos virtuales. Coloquialmente se refiere a este módulo como Tactile Feedback.
- El módulo **IMM-FF** cumple la de enviar fuerzas de restricción del movimiento de flexión sobre los dedos para simular las fuerzas de reacción producidas por los objetos en interacción con la mano. Coloquialmente se refiere a este módulo como Force Feedback.
- El módulo **IMM-FT** cumple la función de obtener mediciones en tiempo real para seguir la ubicación y el movimiento de los dedos, que son posteriormente utilizados por la plataforma de realidad virtual para hacer la simulación física y determinar colisión con objetos y superficies. Coloquialmente se refiere a este módulo como Finger Tracking.
- El módulo **IMM-HT** cumple la función de obtener mediciones en tiempo para seguir la ubicación y el movimiento de la mano. Coloquialmente se refiere a este módulo como Hand Tracking.
- El módulo **DCA-D** se encarga de las funciones de diagnóstico accesibles por el usuario o el personal del servicio técnico a través de la interfaz correspondiente.
- El módulo **DCA-C** se encarga de las funciones de configuración de los parámetros internos del guante de realidad virtual.
- El módulo **DCA-A** es encarga de las funciones de actualización de los módulos internos del guante de realidad virtual.
- El módulo **CBLE** es la comunicación con la plataforma de realidad virtual a través de una conexión establecida sobre Bluetooth Low Energy.
- El módulo **UCC** es la unidad de control centralizado, a través de la cual pasa toda la información y todas las comunicaciones.
- El módulo **SDK-TF** brinda servicios al desarrollo de aplicaciones en los aspectos referentes a la estimulación del tacto.
- El módulo **SDK-FF** brinda servicios al desarrollo de aplicaciones en los aspectos referentes a la estimulación de la kinestesia del ser humano.
- El módulo **SDK-FT** brinda servicios al desarrollo de aplicaciones en los aspectos referentes a la detección, ubicación y seguimiento de la posición de los dedos de la mano.
- El módulo **SDK-HT** brinda servicios al desarrollo de aplicaciones en los aspectos referentes a la detección, ubicación y seguimiento de la posición de la mano.

5.1.2. Implementación del módulo IMM-TF

El módulo IMM-TF, destinado a la estimulación del tacto del usuario, está sujeto a las especificaciones de diseño INT-IMM-04, INT-IMM-05 e INT-IMM-08. Para satisfacer tales especificaciones, el módulo debe tener la capacidad de generar presiones de contacto en los pulpejos del dedo y vibraciones en múltiples ubicaciones de la palma de la mano. Estos aspectos son críticos y requieren de un análisis de factibilidad tecnológica independiente para cada uno.

5.1.2.1. Alternativas de diseño

Las tecnologías o alternativas de diseño que se consideran para este mecanismo de presión son las siguientes,

1. **Plataformas móviles:** es un mecanismo compuesto de dos plataformas, una fija sobre la parte trasera del dedo y otra móvil que se desplaza y se presiona sobre el pulpejo del dedo para generar efectos de presión, la Ilustración 5.2 muestra un ejemplo de esta alternativa [2]. Este enfoque requiere utilizar tres motores de corriente continua o servomecanismos de tamaño reducido y livianos en peso. El control de estos actuadores requiere realizar transformaciones matemáticas para determinar cómo se aplica la presión. Puede resultar incómodo para el usuario e incluso entorpecer la movilidad cuando los dedos se encuentran cerca. Permite controlar la ubicación de la presión de contacto, regular su intensidad y modificar la orientación de la normal.



Ilustración 5.2: Plataformas móviles

2. **Arreglo de pines:** es un mecanismo compuesto de elementos (pines) en un arreglo bidimensional que pueden desplazarse en altura para ejercer una presión puntal y localizada sobre el pulpejo del dedo, la Ilustración 5.3 muestra un ejemplo de esta alternativa. Los elementos pueden ser desplazados por actuadores electromecánicos, electrostáticos o electromagnéticos. Requiere un diseño y fabricación a medida para la confección del arreglo de pines, y el control individual de cada pin puede requerir un grado de complejidad mecánica muy elevado. El control a nivel lógico de los elementos o pines puede resultar muy sencillo, es decir, se actúan aquellos pines que están en la zona de la piel que se quiere estimular. Permite generar múltiples puntos de presión de contacto localizados según la resolución que dispone el arreglo bidimensional, y mediante la modulación del desplazamiento de los pines en conjunto se puede recrear efectos de tacto variados, como curvatura, vibración, entre otros.



Ilustración 5.3: Arreglo de pines

3. **Sistemas neumáticos:** los sistemas neumáticos son un tipo particular de arreglo de pines en donde se utilizan actuadores neumáticos para controlar el desplazamiento de los pines, y se consideran de forma separada e independiente ya que, si bien el concepto es similar, la tecnología cambia. La Ilustración 5.3

muestra un ejemplo de esta alternativa. Permite generar múltiples puntos de presión de contacto localizados según la resolución que dispone el arreglo bidimensional, y mediante la modulación del desplazamiento de los pinos en conjunto se puede recrear efectos de tacto variados, como curvatura, vibración, entre otros. Requiere un diseño y fabricación a medida, y conlleva a una alta complejidad mecánica por la distribución de los canales de aire para la actuación neumática.



Ilustración 5.4: Sistema neumático

4. **Plataforma con cinturón:** es un mecanismo compuesto de una plataforma fija sobre la parte trasera del dedo que sujetas los extremos de un cinturón compuesto de una tela determinada con dos motores de corriente continua o servomecanismos, y mediante el desplazamiento de la tela se puede generar estímulos sobre la piel. La Ilustración 5.5 muestra un ejemplo de esta alternativa. Según la orientación del movimiento rotatorio de ambos motores (y, por ende, extremos) puede generar un estímulo de fricción por deslizamiento de la tela o bien retraer la tela para generar una presión global sobre el pulpejo. Esta solución presenta ventajas en su complejidad mecánica, utiliza menos actuadores. No obstante, el grado de estímulos que puede producir es menor. Existe evidencia científica de que la combinación de los estímulos que se pueden generar con este enfoque permite simular parcialmente el peso de un objeto [3].



Ilustración 5.5: Plataforma con cinturón

Las tecnologías o alternativas de diseño que se consideran para el mecanismo de vibración son las siguientes,

1. **Motor de rotación excéntrica:** es un motor de corriente continua que posee una masa acoplada mecánicamente al eje con una distribución no simétrica que provoca un desplazamiento del centro de masa, dando lugar a fuerzas centrífugas durante la rotación del eje. La amplitud y frecuencia de la vibración es consecuencia de la velocidad angular del motor, producto de la corriente que circula el mismo, lo cual provoca que no se pueda controlar de forma independiente la frecuencia y la amplitud. Dado que es un sistema mecánico con masa, la presencia de masa y su inercia provoca un tiempo de retardo en la actuación. No obstante, este puede ser reducido mediante técnicas de control activo como el frenado activo para parar el motor rápidamente, o bien utilizando tensiones de sobreexcitación para acelerar el arranque. Funciona con tensiones de corriente continua.
2. **Actuador de resonancia lineal:** es un actuador electromagnético que genera un campo magnético cuando se lo excita con una corriente eléctrica, desplazando una masa de material ferromagnético que se encuentra acoplado con un resorte mecánico. Puede tener un tiempo de respuesta de arranque muy pequeño, no obstante, la parada del movimiento es muy lenta a razón del resorte mecánico. Resolver este inconveniente requiere de un complejo esquema de control de frenado activo. Funciona con tensiones de corriente alterna.
3. **Vibrador piezoelectrónico:** es un mecanismo de vibración que actúa bajo el efecto piezoelectrónico.

- Actuador piezoelectrónico:** es un actuador de efecto piezoelectrónico, es decir, frente a una diferencia de potencial eléctrico (o un campo eléctrico) se produce una deformación o desplazamiento de un material. Si diferencia del vibrador piezoelectrónico en la controlabilidad del desplazamiento, y, por ende, de la vibración. Requiere tensiones de corriente continua muy elevadas, pero posee un tiempo de respuesta bajo y un consumo muy bajo.

5.1.2.2. Elección de una solución

Para el mecanismo que genera presión de contacto sobre el pulpejo de los dedos, en primer lugar, se definen como criterios de decisión los siguientes aspectos,

- Costo:** es una estimación del costo de fabricación del módulo.
- Accesibilidad de los componentes:** si los componentes, insumos o materia prima se encuentran disponibles en el mercado al cual puede acceder el equipo de trabajo.
- Conocimiento y experiencia:** es una medición del nivel de conocimiento y experiencia que posee el equipo de trabajo en lo que respecta a las tecnologías involucradas en la alternativa de diseño.
- Peso:** es una estimación del peso del módulo.
- Comodidad:** es una medida del grado de comodidad que posee el usuario cuando el módulo está fabricado utilizando la tecnología bajo análisis.
- Complejidad:** es una ponderación del grado de complejidad del diseño y fabricación de la solución, siguiendo el enfoque o alternativa bajo análisis.
- Estímulos:** caracteriza qué tipos de estímulos pueden reproducirse con la tecnología, y se incluye este aspecto ya que las tecnologías no sirven exclusivamente para el propósito de aplicar una presión normal, por ende, existirán alternativas que tendrán un mayor beneficio en la fidelidad o realismo.

La Tabla 5.1 muestra el análisis y la comparación cuantitativa entre las tecnologías consideradas para el mecanismo de presión de contacto. Para obtener este análisis cuantitativo, primero se realizó una comparación cualitativa de las características (técnicas y no técnicas) asociadas a cada alternativa, y luego se utilizaron escalas para llegar a una evaluación objetiva y numérica de la mejor solución. Para más detalles sobre estas escalas y los análisis cualitativos, véase la sección del anexo Módulo IMM-TF.

	Plataformas móviles	Arreglo de pines	Sistemas neumáticos	Plataforma con cinturón	
Costo	5	3	1	1	3
Accesibilidad de los componentes	5	1	0	0	1
Conocimiento y experiencia	1	1	0	0	1
Peso	2	2	2	2	2
Comodidad	2	0	1	1	1
Complejidad	5	0	0	0	1
Estímulos	5	2	3	4	2
Valoración total (normalizada)		4.55	3.38	4.03	5.45

Tabla 5.1: Matriz de decisión para el mecanismo de presión de contacto en el módulo IMM-TF

Para el mecanismo que genera vibración, en primer lugar, se definen como criterios de decisión los siguientes aspectos,

1. **Costo**: es una estimación del costo de fabricación del módulo.
2. **Accesibilidad de los componentes**: si los componentes, insumos o materia prima se encuentran disponibles en el mercado al cual puede acceder el equipo de trabajo.
3. **Peso**: es una estimación del peso del módulo.
4. **Comodidad**: es una medida del grado de comodidad que posee el usuario cuando el módulo está fabricado utilizando la tecnología bajo análisis.
5. **Tiempo de respuesta**: es el tiempo de respuesta que tiene el actuador.
6. **Amplitud de vibración**: es una medida de la amplitud de la vibración que genera el módulo, y se expresa en unidad G, esto es, aceleración relativa a la gravedad de la tierra de una masa de 100 gramos.
7. **Consumo**: estimación del consumo eléctrico que tiene la alternativa planteada.
8. **Tensiones de operación**: rango de tensiones necesarias para la operación del actuador.
9. **Controlabilidad de la vibración**: grado en que se puede controlar la vibración del actuador.

La Tabla 5.2 muestra el análisis y la comparación cuantitativa entre las tecnologías consideradas para el mecanismo de vibración. Para obtener este análisis cuantitativo, primero se realizó una comparación cualitativa de las características (técnicas y no técnicas) asociadas a cada alternativa, y luego se utilizaron escalas para llegar a una evaluación objetiva y numérica de la mejor solución. Para más detalles sobre estas escalas y los análisis cualitativos, véase la sección del anexo Módulo IMM-TF.

		Motor de rotación excéntrica	Actuador de resonancia lineal	Vibrador piezoelectrónico	Actuador piezoelectrónico
Costo	5	3	3	1	1
Accesibilidad de los componentes	5	1	1	1	1
Peso	2	3	3	2	2
Comodidad	2	2	2	2	2
Tiempo de respuesta	5	1	0	2	2
Fuerzas de vibración	2	1	2	2	3
Consumo	2	1	1	3	2
Tensiones de operación	5	1	1	1	0
Controlabilidad de la vibración	1	2	1	1	3
Valoración total (normalizada)	6.50		6.00	6.33	6.33

Tabla 5.2: Matriz de decisión para el mecanismo de vibración en el módulo IMM-TF

En conclusión, para el mecanismo de presión de contacto la mejor solución son las plataformas con cinturón, y para el mecanismo de vibración la mejor solución es utilizar motores de rotación excéntrica.

5.1.3. Implementación del módulo IMM-FF

El módulo IMM-FF está destinado a restringir el movimiento de los dedos, sujeto a las especificaciones INT-IMM-01 e INT-IMM-07. Para cumplir con lo especificado, el módulo debe ser capaz de ejercer 10N de fuerza o más sobre cada dedo, restringiendo su movimiento de flexión. Es necesario un análisis de factibilidad tecnológica para elegir la mejor alternativa.

5.1.3.1. Alternativas de diseño

A continuación, se listan las variantes analizadas para la implementación:

1. **Freno electrostático:** Está conformado por dos placas conductoras separadas por un dieléctrico, una de las placas está fija en la parte superior de la mano y la otra se mueve junto con el dedo, como se puede ver en la Ilustración 5.6, obtenida de [4]. Al aplicar una tensión del orden de 1kV entre las placas, se activa el freno, bloqueando el movimiento relativo entre placas, y por ende del dedo. El espesor de los materiales necesarios es del orden de los μm , el dieléctrico usado suele ser de $12\mu\text{m}$, y las placas conductoras de $100\mu\text{m}$. La expresión resultante para la fuerza ejercida por el freno viene dada por $F = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A V^2}{2d^2}$, donde vemos que cuanto menor es la distancia entre placas conductoras y mayor la tensión aplicada, mayor es la fuerza ejercida. Para ello es muy importante que el dieléctrico sea muy delgado y que el adhesivo sea conductor, como se muestra en la Ilustración 5.7.

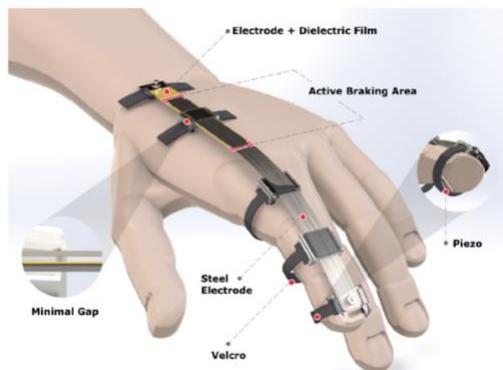


Ilustración 5.6: Esquema del freno electrostático para un dedo

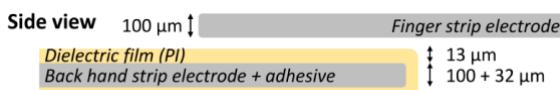


Ilustración 5.7: Vista lateral del freno electrostático

2. **Servo motores:** En esta alternativa se aprovecha la capacidad de controlar con precisión la posición del rotor de un servomotor, para restringir el movimiento de los dedos. El sistema completo, se conforma por, además de un servo, un hilo que sostiene soportes solidarios al dedo, y un mecánico que permite enrollar el hilo siguiendo los movimientos del dedo del usuario. Se muestra una imagen del sistema en la Ilustración 5.8 obtenida de LucidVR



Ilustración 5.8: Sistema que utiliza servomotores en un guante

5.1.3.2. Elección de una solución

Se consideran los siguientes factores para la toma de una decisión:

1. **Costo**: es una estimación del costo de fabricación del módulo para la mano entera.
2. **Accesibilidad de los componentes**: si los componentes, insumos o materia prima se encuentran disponibles en el mercado al cual puede acceder el equipo de trabajo.
3. **Peso**: es una estimación del peso del módulo.
4. **Comodidad**: es una medida del grado de comodidad que posee el usuario cuando el módulo está fabricado utilizando la tecnología bajo análisis.
5. **Complejidad**: es una ponderación del grado de complejidad del diseño y fabricación de la solución, siguiendo el enfoque o alternativa bajo análisis.
6. **Consumo**: estimación del consumo eléctrico que tiene la alternativa planteada.

En la Tabla 5.3 se condensa la comparación de ambas tecnologías en los factores elegidos. Vemos que, si bien la opción del freno electrostático es más cómoda y tiene menor consumo y peso, presenta como principal desventaja la baja accesibilidad a los componentes necesarios. Para replicar lo hecho en [4], es necesario un adhesivo conductor, que en [5] dicen adquirir de la empresa Adhesives Research®. Se contactó a dicha empresa, pero no se obtuvo respuesta.

	<i>Freno electrostático</i>	<i>Servo-motores</i>
Costo (por mano)	U\$S 40	U\$S 25
Accesibilidad de componentes	NO	SI
Nivel de conocimiento	DESCONOCIMIENTO TOTAL	CONOCIMIENTO Y EXPERIENCIA
Peso (por dedo)	10g	15g
Comodidad	SE SIENTE	PUEDE AFECTAR
Complejidad	ALTA	BAJA
Consumo (por dedo)	60mW	0.5W

Tabla 5.3: Comparación cualitativa de las tecnologías para la restricción del movimiento de los dedos.

En la Tabla 5.4 se muestra la matriz de decisión para el módulo, con el análisis y comparación de las alternativas pasado a puntajes numéricos.

Criterio	Peso	Freno Electrostático	Servo Motores	Máximo
Costo	5	1	2	2
Accesibilidad de componentes	5	0	1	1
Peso	2	2	1	2
Comodidad	2	1	0	2
Conocimiento y experiencia	2	1	2	2
Complejidad	2	2	1	2
Consumo	5	3	1	3
Puntaje total normalizado		3.70	5.00	10.00

Tabla 5.4: Matriz de decisión para el mecanismo de fuerzas sobre los dedos en el módulo IMM-FF

En conclusión, la mejor opción para el presente módulo son los servo motores, principalmente porque superan a los frenos electrostáticos en dos de los tres factores críticos, el costo y la accesibilidad de componentes.

5.1.4. Implementación del módulo IMM-HT

La ubicación y orientación de las manos en el espacio es la funcionalidad a la que se dedica el módulo de *Hand Tracking IMM-HT*. Esta funcionalidad es de vital importancia para la interacción del usuario, en aplicaciones donde se requiera movimiento en el espacio e interactuar con objetos lejanos, pero al alcance, es decir, donde las manos no estén fijas.

5.1.4.1. Alternativas de diseño

Las especificaciones a cumplir son FUN-IMV-04, INT-IMM-03 y INT-SDK-03, de las cuales lo más relevante a esta sección es que el dispositivo deberá poder ubicar la posición relativa de las manos con una precisión igual o menor a 2mm. Se listan esta y otras características que serán tenidas en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología para llevar a cabo este módulo:

1. **Precisión de detección:** poder detectar posición de la mano con precisión espacial de 2mm.
2. **Costo:** costo que representaría la adquisición de tal tecnología o sensores.
3. **Consumo:** es deseable que sea el menor posible, teniendo en cuenta el carácter portable que debe tener el diseño.
4. **Tiempo de desarrollo:** tiempo que implicaría incorporar tal tecnología al diseño.
5. **Experiencia previa y desarrollos hechos:** íntimamente relacionado con los tiempos de desarrollo, abarca el material disponible en cuanto a experiencias previas con un determinado sensor, así como guías de uso para la implementación que se está buscando.
6. **Disponibilidad:** posibilidad de adquirir la tecnología por parte de los diseñadores, ubicados en Buenos Aires, Argentina, durante los años 2021 y 2022.
7. **Velocidad de lectura:** debido a la carga computacional de las tareas que estará efectuando la Unidad de Control, en bajos tiempos de latencia, es deseable que la lectura de los sensores para implementación del módulo IMM-HT sea lo menos demandante posible.

8. **Factor de forma:** incluye consideraciones relacionadas a la comodidad del usuario al emplear una u otra tecnología. Por ejemplo, cuánto peso aporta o cuánta estructura exterior requiere (en el caso de tener que usar diseños estilo exoesqueletos).

En el mercado y en la frontera de investigación relacionada al *hand tracking*, se identifican tres tipos de tecnologías que podrían satisfacer las necesidades planteadas:

1. **IMU:** capaces de medir aceleración, velocidad angular y orientación. Están compuestos por 3 acelerómetros (uno por eje), 3 giroscopios y 3 magnetómetros, acumulando un total de 9 DoF. Su probado funcionamiento y madurez en el desarrollo son su principal ventaja, mientras que el tamaño y la deriva son sus mayores desventajas. Para su uso en *hand tracking* pueden ser colocados en el dorso de la mano y/o en la muñeca, y resulta una solución con buen factor de forma, en tamaño relativo. Posee, sin embargo, el problema de la deriva, que se basa en que, para detectar posición con estos sensores, es necesario una integración de las aceleraciones, y la necesidad de un punto de referencia; esta integración puede introducir pequeños errores que, al acumularse en sucesivas iteraciones, podrían generar una separación de la posición real respecto de la medida. El tratamiento matemático para corregir la deriva puede ser complejo, aunque su repetido uso en guantes comerciales prueba su viabilidad.
2. **Flex sensors:** presentan una relación aproximadamente lineal (dentro de cierto rango de trabajo) entre su resistencia y la flexión mecánica impuesta sobre ellos. Su mayor ventaja es la sencillez para la detección, con posibilidad de ser incorporado en zonas restringidas y pequeñas del diseño. Los problemas que puede aportar están relacionados a la posibilidad de rotura o baja vida útil en caso de no ser colocados y cuidados adecuadamente. Para *hand tracking*, algunas implementaciones plantean su uso en articulaciones como el codo y hombros, para obtener la posición de las manos a partir de la posición de la cabeza.
3. **Cámaras:** soluciones basadas en procesamiento de imágenes en tiempo real, con redes neuronales entrenadas para la detección de las manos, y su traducción en una posición. Requiere de una complejidad algorítmica considerable, y sufre del problema de oclusión debido a su carácter visual, aunque para la ubicación de las manos, este problema no se presenta tanto. Puede considerarse su uso mediante la incorporación de soluciones *off-the-shelf*.
4. **Controles:** solución basada en el uso del control que viene junto con el visor de realidad virtual. Utilizan un sistema denominado “*Inside-out tracking system*”, los controles tienen LEDs infrarrojos que las cámaras del visor detectan y toman fotos continuamente para luego triangular la posición de cada control.

5.1.4.2. Elección de una solución

Teniendo en cuenta los criterios presentados en la sección anterior, se asignan factores de peso (en escala de 1 a 10) para cada una de las características, y se estudia su resultado para elegir la tecnología a utilizar. Cada una de ellas será valorada también en la misma escala, y los resultados finales serán normalizados por el valor máximo a obtener dividido 10, para que también se encuentren en escala de 1 a 10. Para los 8 factores, el máximo puntaje a obtener surge de:

$$(8 + 10 + 2 + 9 + 8 + 6 + 5 + 8) \cdot 10 = 560$$

En la sección 11.11.2 del anexo se presentan brevemente las justificaciones para los pesos y valoraciones asignadas.

Peso		IMUs	Cámaras	Flex sensors	Controles
Precisión de detección	8	2	9	2	10
Costo	10	8	2	6	10

Consumo	2	7	1	10	10
Tiempo de desarrollo	9	3	9	3	9
Experiencia previa	8	7	9	3	9
Disponibilidad	6	10	8	10	10
Velocidad de lectura	5	8	1	10	10
Factor de forma	8	8	10	3	1
Valoración total (norm.)	-	6.375	6.786	5.018	7.875

Tabla 5.5: Matriz de decisión para IMM-HT

De los resultados obtenidos, se observa que la solución con mejor valoración es la de utilizar el *hand tracking* que proviene de los controles mismos del *Meta Quest 2*, para de esta manera reducir considerablemente los costos de implementación, así como acelerar los tiempos de desarrollo y disminuir la carga de procesamiento a cargo de la unidad de control, perdiendo un poco de comodidad por el peso del control y el tamaño.

5.1.5. Implementación del módulo IMM-FT

El módulo de *Finger Tracking IMM-FT* es aquel dedicado a la transducción de los movimientos dactilares de la mano a señales interpretables por el sistema, permitiendo entender esos movimientos para luego representarlos adecuadamente en el mundo virtual. Su correcto funcionamiento es de vital importancia para la calidad del diseño, debido a que una correcta detección de estos movimientos implica lograr la inmersividad solicitada por los usuarios. En suma, del posicionamiento detectado por el *Finger Tracking* conforma una de las principales variables de entrada para la decisión del accionamiento de los actuadores, ya que, por ejemplo, será responsable de detectar la colisión con un objeto al ser agarrado.

5.1.5.1. Alternativas de diseño

En primer lugar, se listan los requerimientos a cumplir por las tecnologías que puedan ser utilizadas para Implementación del módulo IMM-FT, características que luego serán tenidas en cuenta para la elección de una por sobre las demás. Las especificaciones que hacen referencia a este módulo son FUN-IMV-03, INT-IMM-02, INT-IMM-06 e INT-SDK-02, las cuales se traducen en que la tecnología a implementar debe cumplir con:

1. **Precisión de detección:** poder detectar posición de los dedos con precisión espacial de 2mm.
2. **Grados de libertad:** Se deberá poder detectar la extensión o flexión para las falanges distales y proximales de todos los dedos, y se deberá poder detectar la abducción o aducción del metacarpo del dedo pulgar. Es decir, por lo menos 11 DoF.

Además de los listados anteriormente, para la consideración de la tecnología a utilizar se tendrán en cuenta criterios de:

3. **Costo:** costo que representaría la adquisición de tal tecnología o sensores.
4. **Consumo:** es deseable que sea el menor posible, teniendo en cuenta el carácter portable que debe tener el diseño.
5. **Tiempo de desarrollo:** que implicaría incorporar tal tecnología al diseño.

6. **Experiencia previa y desarrollos hechos:** íntimamente relacionado con los tiempos de desarrollo, abarca el material disponible en cuanto a experiencias previas con un determinado sensor, así como guías de uso para la implementación que se está buscando.
7. **Disponibilidad:** posibilidad de adquirir la tecnología por parte de los diseñadores, ubicados en Buenos Aires, Argentina, durante los años 2021 y 2022.
8. **Velocidad de lectura:** debido a la carga computacional de las tareas que estará efectuando la Unidad de Control, en bajos tiempos de latencia, es deseable que la lectura de los sensores para Implementación del módulo IMM-FT sea lo menos demandante posible.
9. **Factor de forma:** incluye consideraciones relacionadas a la comodidad del usuario al emplear una u otra tecnología. Por ejemplo, cuánto peso aporta o cuánta estructura exterior requiere (en el caso de tener que usar diseños estilo exoesqueletos).

A rasgos generales, existen cinco tecnologías en el mercado con la capacidad de realizar el finger tracking de forma efectiva, todas ellas explicadas en detalle en [1]. En resumidas cuentas, las variantes son las siguientes:

1. **IMU:** este tipo de sensores son capaces de medir aceleración, velocidad angular y orientación. Están compuestos por 3 acelerómetros (uno por eje), 3 giroscopios y 3 magnetómetros, acumulando un total de 9 DoF. Su probado funcionamiento y madurez en el desarrollo son su principal ventaja, mientras que el tamaño y la deriva son sus mayores desventajas. A pesar de ser sensores visualmente chicos, en comparación al tamaño de los dedos de la mano, pueden provocar la necesidad de un factor de forma incómodo para el diseño. Además, el problema de la deriva se basa en que, para detectar posición con estos sensores, es necesario una integración de las aceleraciones, y la necesidad de un punto de referencia; esta integración puede introducir pequeños errores que, al acumularse en sucesivas iteraciones, podrían generar una separación de la posición real respecto de la medida. El tratamiento matemático para corregir la deriva puede ser complejo, aunque su repetido uso en guantes comerciales prueba su viabilidad.
2. **Flex sensors:** presentan una relación aproximadamente lineal (dentro de cierto rango de trabajo) entre su resistencia y la flexión mecánica impuesta sobre ellos. Su mayor ventaja es la sencillez para la detección, con posibilidad de ser incorporado en zonas restringidas y pequeñas del diseño. Los problemas que puede aportar están relacionados a la posibilidad de rotura o baja vida útil en caso de no ser colocados y cuidados adecuadamente. De todas formas, es muy empleado en guantes comerciales con buen éxito.
3. **Stretch sensors:** concepto similar a los flex sensors pero en función del estiramiento; pueden ser resistivos o capacitivos. Comparten sus ventajas en cuanto a la sencillez, y ofrecen usualmente una durabilidad ligeramente mayor. En contraste con los anteriores, se los consigue con factores de forma generalmente de mayor tamaño, y a mayor costo.
4. **Sensores rotacionales:** capaces de convertir una posición angular en una extensión o flexión de un dedo, una vez conectado a un medio mecánico (cables o hilos con carretes) que transformen el movimiento de los dedos en una rotación. Pueden funcionar muy bien en conjunto con un *Force Feedback* basado en motores rotacionales, pudiendo utilizar la misma estructura, pero de no ser así, agregan un volumen y peso considerable al diseño. No permiten la detección de grados de libertad de aducción/abducción.
5. **Cámaras:** soluciones basadas en procesamiento de imágenes en tiempo real, con redes neuronales entrenadas para la detección de las manos, y su traducción en posición y gestos. Requiere de una complejidad algorítmica considerable, y sufre del problema de oclusión debido a su carácter visual. Puede considerarse su uso mediante la incorporación de soluciones *off-the-shelf*.
6. **Híbridos:** se pueden emplear una mezcla de las anteriores tecnologías también, atacando distintos grados de libertad con distintos tipos de sensores. Este *approach* es muy utilizado en guantes comerciales. Esta alternativa no será directamente evaluada, ya que sus características dependen del tipo de mezcla de tecnologías que se realice. Sí será tenida en cuenta como opción ante un escenario donde se quieran aprovechar claras ventaja de dos o más tipos de sensores, que trabajen de forma complementaria.

Todas las anteriores tecnologías tienen algo en común, y es que en ellas se supone que cada sensor se presupone ubicado en una posición de los dedos, tal que incremente los DoF detectados en uno. Es decir, la cantidad de DoF que el sistema es capaz de detectar, es equivalente a la cantidad de sensores. La siguiente alternativa es un tanto más disruptiva, ya que apunta a resolver los 25 grados de libertad [6] (ver Ilustración 11.29: Grados de libertad de la mano) presentes en la mano humana, con un arreglo de sensores de mayor tamaño.

7. **Arreglo de sensores de estiramiento y modelo de Deep Learning:** la solución propuesta por [7] incorpora una metodología disruptiva para la solución del finger tracking. Mediante la utilización de múltiples sensores de estiramiento, un proceso de fabricación específico y un modelo de red neuronal entrenado especialmente para traducir los datos de los sensores en movimientos de la mano, logran una detección de alta fidelidad, con un factor de forma delgado y liviano. Las desventajas de este diseño consisten en la alta complejidad de su reproducción, y la latencia que presenta para las lecturas de los sensores y su traducción a movimientos en la mano.

5.1.5.2. Elección de una solución

Teniendo en cuenta los criterios presentados en la sección anterior, se asignan factores de peso (en escala de 1 a 10) para cada una de las características, y se estudia su resultado para elegir la tecnología a utilizar. Cada una de ellas será valorada también en la misma escala, y los resultados finales serán normalizados por el valor máximo a obtener dividido 10, para que también se encuentren en escala de 1 a 10. Para los 9 factores, el máximo puntaje a obtener surge de:

$$(7 + 3 + 10 + 2 + 9 + 8 + 6 + 7 + 6) \cdot 10 = 580$$

En la sección 11.11.3 del anexo se presentan brevemente las justificaciones para los pesos y valoraciones asignadas.

Peso		IMUs	Flex sensors	Stretch sensors	Sensores rotacionales	Cámaras	Arreglo de stretch sensosrs con DL
Precisión de detección	7	4	8	8	6	1	10
Grados de libertad	3	8	6	4	4	10	10
Costo	10	8	7	4	10	2	2
Consumo	2	7	10	10	5	1	2
Tiempo de desarrollo	9	4	8	6	8	9	3
Experiencia previa	8	7	9	8	9	9	6
Disponibilidad	6	10	10	4	10	8	1
Velocidad de lectura	7	8	10	10	10	1	1
Factor de forma	6	5	7	9	2	10	10
Valoración total (norm.)	-	6.621	8.276	6.793	7.759	5.638	4.690

Tabla 5.6: Matriz de decisión IMM-FT

Se concluye entonces que la tecnología con mejor valoración para el módulo Implementación del módulo IMM-FT es la de *flex sensors*. Sin embargo, teniendo en cuenta la decisión tomada en Implementación del módulo IMM-FF de usar motores rotacionales acoplados a los dedos mecánicamente por cables (o hilos), y en virtud de lograr un mejor factor de forma y reducir costos, se decide implementar una solución híbrida.

Se plantea el uso de la combinación de dos tecnologías: *flex sensors* y sensores rotacionales. La Ilustración 5.9: Esquema para IMM-FT da una idea de los componentes físicos y la distribución de los recursos que podría ser empleada. Mediante un sensor rotativo acoplado al motor de *Force Feedback*, y un *flex sensor*, se obtiene información de dos grados de libertad de extensión/flexión por dedo, en particular, de las primeras dos falanges de cada dedo. Un *flex sensor* adicional se coloca en la sindactilia del dedo pulgar e índice (juntura entre los dos), para medir un grado de libertad de aducción/abducción del pulgar, llegando así a los 11 grados de libertad solicitados en la especificación INT-IMM-06.

De esta manera se logra complementar las ventajas de cada tecnología, reducir costos, utilizando la cantidad de sensores mínima y necesaria, aprovechándose de implementaciones de otros módulos.



Ilustración 5.9: Esquema para IMM-FT

5.1.6. Implementación del módulo UCC

El módulo UCC, la unidad de control centralizado, está destinado a recibir y procesar toda la información proveniente de los distintos sensores y módulos pertenecientes al sistema. Además, deberá emitir las señales de control para los actuadores a utilizar, y poder llevar a cabo la comunicación con el dispositivo de VR correspondiente.

5.1.6.1. Alternativas de diseño

En base a las especificaciones que le afectan a este módulo, es que se consideran microcontroladores con arquitectura de 32 bits, integrados en un módulo que cuente con certificaciones de RF, y en particular de Bluetooth Low Energy, con la finalidad de facilitar el proceso diseño. Es por ello, que se proponen las siguientes 4 alternativas.

1. BM832A

Módulo fabricado por Fanstel, con un microcontrolador (nRF52810) de la marca Nordic Semiconductors. Cuenta con un CPU ARM Cortex M4, con una frecuencia de clock máxima de 64MHz, 128kB de memoria flash y 24kB de RAM. Este módulo dispone, además, de 2 canales I2C, 4 canales PWM, 8 canales ADC y 32 GPIO.

Es la opción más económica, con un precio de U\$D 3 en lotes de 1000 unidades, y una disponibilidad que supera ampliamente nuestras necesidades.

En cuanto al consumo de este módulo, la máxima corriente utilizada se da en la transmisión de datos por RF y, en particular, picos de 7,5mA en la trasmisión y de 5,4mA en la recepción.



2. BC833M

Si bien este módulo difiere del anterior en su microcontrolador (nRF52833), comparte por ser del mismo fabricante varias de sus características, como son su CPU, clock, canales I2C, canales PWM, ADC. Donde difiere este módulo del anterior es en su memoria, con 512kB de flash y 128kB de RAM, GPIO, con 18, precio, U\$D 4,49 en lotes de 1000 unidades, y consumo, con 4,9mA en la transmisión y 4,7mA en la recepción. Sin embargo, este modulo cuenta con una disponibilidad muy baja en comparación con nuestras necesidades.



3. BC840

Se repite el caso de los dos módulos anteriores, por lo cual únicamente se detallan las diferencias que presenta este en particular. Este módulo cuenta con 1MB de Flash y 256kB de RAM, 48 GPIO y un consumo de 13,6mA en la transmisión y 6,4mA en la recepción. Su precio es de U\$D 6,3 en lotes de 1000 unidades.



4. ESP32 WROOM

Por último, se considera para esta aplicación el ESP32, Fabricado por Espressif. Cuenta con un CPU Xtensa LX6 Dual Core, con una frecuencia máxima de clock de 240MHz. Cuenta, además, con 4MB de memoria flash y 520kB de RAM. En cuanto a interfaces, ofrece 2 canales de I2C, 16 PWM, 18 ADC y 34 GPIO. Sin embargo, el consumo de este módulo es considerablemente mas elevado que el del resto con 165mA para la transmisión y 118mA para la recepción de datos. Este es un factor no menor ya que el hardware utilizado para el resto de los módulos ya cuenta con un consumo elevado, con lo cual es importante intentar minimizarlo.

El precio de el mismo es de U\$D4,08 en lotes de 1000 unidades.



5.1.6.2. Elección de una solución

Se consideran los siguientes factores para la toma de una decisión:

1. **Costo**
2. **Tiempo de desarrollo**
3. **Interfaces de hardware**
4. **Potencia de procesamiento**
5. **Memoria**
6. **Disponibilidad**
7. **Tamaño**
8. **Encapsulado**
9. **Consumo**
10. **Disponibilidad y precio del kit de desarrollo**
11. **Necesidad de periféricos para implementación**

Se realiza entonces, una matriz de decisión con los factores considerados y se analizan los puntajes obtenidos.

		BM832A	BC833M	BC840	ESP32
Costo	5	3	2	1	2
Tiempo de desarrollo	5	3	3	3	2
Interfaces de hardware	3	1	1	2	3
Potencia de procesamiento	4	2	2	2	3
Memoria	3	1	2	3	3
Disponibilidad	4	3	1	2	2
Tamaño	1	2	2	3	1
Encapsulado	1	1	1	1	3
Consumo	2	3	3	3	1
Disponibilidad y precio del kit de desarrollo	3	2	0	2	3
Necesidad de periféricos para la implementación	2	1	1	2	3
Valoración total (normalizada)		5.35	4.75	6.67	6.97

Tabla 5.7: Matriz de decisión módulo UCC.

Como resultado, puede observarse que se obtiene como mejor solución, la implementación del ESP32 como microcontrolador a utilizar.

5.1.7. DFMEA

Se Muestra a continuación el análisis DFMEA del producto:

Nº	Efectos de la falla	Modo de la falla	Causas de la falla	Aceptabilidad				Acción de reducción/Prevención de riesgo	Aceptabilidad				Referencia
				NS	PO	DE	IC		NS	PO	DE	IC	
1	No se puede utilizar el dispositivo	El producto no enciende	Microcontrolador defectuoso	4	2	4	32	Interfaz de Diagnóstico por USB	4	2	2	16	
2	No se puede utilizar el dispositivo	El producto no enciende	Protección de la batería activada	4	2	3	24						
3	No se puede utilizar el dispositivo	El producto no enciende	Batería descargada	4	3	3	36	Luz de indicación de la carga de la batería	4	3	1	12	
4	No se puede utilizar el dispositivo	El producto no enciende	PCB defectuoso	4	2	5	40	Fabricación de PCB ajustados al estándar y verificación de conexión eléctrica	4	1	5	20	
5	No se puede utilizar el dispositivo	El producto no enciende	Botón de encendido dañado	4	3	2	24						
6	El usuario pierde la inmersión	Force feedback no funciona correctamente	Hilo de algún dedo se corta	3	4	1	12						
7	El usuario pierde la inmersión	Force feedback no funciona correctamente	Soportes de los dedos rotos o defectuosos	3	4	1	12						
8	El usuario pierde la inmersión	Force feedback no funciona correctamente	Motores defectuosos	3	3	4	36	Interfaz de Diagnóstico por USB	3	3	1	9	
9	El usuario pierde la inmersión	Force feedback no funciona correctamente	Transmisión de los servos desgastada	3	3	3	27						
10	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Cinturón cortado	3	2	1	6						
11	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Servomecanismo del cinturón defectuoso	3	3	3	27						
12	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Motor de vibración defectuoso	3	3	3	27						
13	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Ajuste al dedo incorrecto	3	3	2	18						

14	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Agarre del cinturón desgastado	3	4	2	24					
15	El usuario pierde la inmersión	Tactile feedback no funciona correctamente	Cables cortados	3	4	5	60	Cable diseñado para ser flexionado continuamente con una malla protectora	3	1	5	15
16	El usuario pierde la inmersión	Finger tracking no funciona correctamente	Sensor de flexión defectuoso	3	2	4	24					
17	El usuario pierde la inmersión	Finger tracking no funciona correctamente	Ajuste del guante incorrecto	3	3	2	18					
18	El usuario pierde la inmersión	Finger tracking no funciona correctamente	Sensor de flexión montado incorrectamente	3	2	4	24					
19	El usuario pierde la inmersión	Finger tracking no funciona correctamente	Hilo de algún dedo se corta	3	4	1	12					
20	El usuario pierde la inmersión	Hand tracking no funciona correctamente	Cámara tapada	3	2	1	6					
21	El usuario pierde la inmersión	Latencia demasiado alta	Código demasiado complejo	3	2	3	18					
22	El usuario pierde la inmersión	Latencia demasiado alta	Interferencias en la comunicación	3	2	4	24					
23	El usuario no puede mover algún dedo	Falla en el force feedback	Motor bloqueado	5	2	2	20					
24	El usuario no puede mover ningún dedo	Falla en el force feedback	Hilo atascado	5	4	3	60	Materiales De fabricación que limiten su efecto, reemplazo de hilos por bandas	5	1	3	15
25	El usuario siente molestias en la mano	Tactile feedback irrita el dedo	Movimiento constante y humedad sobre la yema del dedo	4	4	1	16					
26	El usuario siente molestias en la mano	Temperatura muy alta	Cortocircuito en la placa principal	5	3	5	75	Sensor de corriente y de temperatura	5	1	1	5
27	El usuario siente molestias en la mano	Temperatura muy alta	Motores sobrecalentados	5	4	3	60	Sensor de corriente	5	1	1	5
28	El usuario no ve la indicación de conexión	Indicación apagada	LED defectuoso	1	3	3	9					
29	La conexión con el dispositivo de VR no pudo realizarse	El dispositivo no es encontrado	Guante demasiado alejado del headset	2	3	2	12					
30	La conexión con el dispositivo de VR no pudo realizarse	El dispositivo no es encontrado	Falla en el módulo de Bluetooth	2	3	4	24					

Tabla 5.8: DFMEA del proyecto.

Severidad	Probabilidad	Detectabilidad	
insignificante	remota	completa	1
poco significativo	poco probable	mayor	2
moderado	media	moderada	3
grave	alta	pequeña	4
muy grave	muy alta	minima	5

Tabla 5.10: Referencia de puntajes DFMEA.

Nivel de IC	
Aceptable	IC \leq 27
Reducir hasta razonablemente práctico	27 < IC < 48
No aceptable	IC \geq 48

Tabla 5.9: Referencia de niveles de IC para DFMEA.

Participantes	Gonzalo Davidov, Facundo Farall, Lucas Kammann, Carlos Maselli, Nicolas Trozzo
Fecha	10/10/2021

Tabla 5.11: Participantes DFMEA.

5.2. Factibilidad de tiempos.

5.2.1. Planificación (PERT y simulación de Montecarlo)

La Tabla 5.12 muestra el listado de las tareas y actividades en las cuales se descompone el proyecto. Para cada una de ellas, se describe cuáles son sus actividades predecesoras, cuál es su duración pesimista, más probable y optimista para la aplicación de PERT. Para mejorar la granularidad de la planificación se utilizan tareas resumen que agrupan actividades individuales, y estas tareas resumen se muestran en itálica, sin una duración dado que resulta de cómo se desarrollan las actividades internas. Las duraciones están expresadas en días laborables considerando una jornada de trabajo de 8 horas.

Las actividades principales del proyecto se organizan en las siguientes tareas resumen con un enfoque desde la capa de abstracción más alta a la más baja,

1. Descripción, especificación y evaluación inicial del proyecto
2. Pruebas tecnológicas
3. Arquitectura
4. Diseño e implementación del hardware exterior
5. Diseño e implementación del hardware interior
6. Diseño e implementación del firmware
7. Implementación de la interfaz de programación de Unity
8. Diseño e implementación de la aplicación de escritorio
9. Construcción y validación del prototipo

El hardware es separado en dos capas o niveles, interior y exterior. El exterior corresponde a aquellos módulos mecánicos y eléctricos de sensores y actuadores que se encuentran distribuidos en el guante. El interior corresponde al módulo central de electrónica que gobierna el funcionamiento del guante.

ID	Nombre	Predecesoras	Duración pesimista	Duración más probable	Duración optimista
1	<i>Descripción, especificación y evaluación inicial del proyecto</i>				
2	Análisis de antecedentes y contexto del proyecto		3	4	7
3	Estudio inicial de los objetivos y el alcance		3	4	7
4	Relevamiento inicial de regulaciones legales		3	4	7
5	Encuesta	3	5	6	10
6	Requerimientos del cliente		7	8	10
7	Diagrama funcional de interfaces		1	2	3
8	Casa de calidad	5;6	7	8	10
9	<i>Especificaciones de diseño</i>	7;6			
10	Especificaciones de interfaces		2	3	4
11	Especificaciones funcionales		1	2	3
12	Especificaciones de implementación		1	2	3
13	Especificaciones de servicio		2	3	4
14	Especificaciones de performance		2	3	4
15	Plan de validación	9	7	8	12
16	Revisión y correcciones de casa de calidad, requerimientos, especificaciones y validación		4	5	6
17	Diagrama modular	16	1	2	4
18	<i>Factibilidad tecnológica</i>		0	20,85	0

19	Módulo IMM-FF	16	10	14	18
20	Módulo IMM-TF	16	10	14	18
21	Módulo IMM-FT	16	10	14	18
22	Módulo IMM-HT	16	10	14	18
23	Módulo UCC	16	2	3	4
24	Análisis DFMEA	16	2	3	4
25	Factibilidad de tiempos	16	4	5	6
26	Factibilidad económica	16	4	5	6
27	Factibilidad legal y responsabilidad civil	16	4	5	6
28	Revisión y correcciones del análisis de factibilidad		7	10	13
29	Pruebas tecnológicas				
30	POC-00: BLE + ESP32 + Unity	28	14	15	19
31	POC-01: Finger Tracking	28	14	15	19
32	POC-02: Hand Tracking	28	5	6	7
33	POC-03: Force Feedback	28	21	22	25
34	POC-04: Tactile Feedback Presión	28	21	22	25
35	POC-05: Tactile Feedback Vibración	28	21	22	25
36	POC-06: Creación de un SDK para Unity	28	5	6	7
37	Arquitectura	29			
38	Diagrama de bloques del nivel exterior	17	1	2	3
39	Especificación de interfaces eléctricas y cableado del nivel exterior	38	2	3	4
40	Diagrama de bloques del nivel interior	38	2	3	4
41	Especificación de interfaces eléctricas y cableado del nivel interior	40	2	3	4
42	Diseño de la interfaz de programación para desarrolladores en Unity	18	7	8	14
43	Plan de pruebas para la interfaz de programación para desarrolladores en Unity	42	2	3	5
44	Protocolo de comunicación con la plataforma de realidad virtual (Bluetooth 5.0)	9;42	7	8	14
45	Protocolo de comunicación de la interfaz de diagnóstico, configuración y actualización	9	9	10	14
46	Diseño e implementación del hardware exterior				
47	Diseño mecánico integrador del guante	39			
48	<i>Diseño de los módulos del nivel exterior</i>	39	0	13,35	0
49	Módulo Tactile Feedback		10	12	14
50	Módulo Force Feedback		10	12	14
51	Módulo Finger Tracking		10	12	14
52	Probar diseño mecánico del guante y correcciones	47;49;50;51	10	12	14

53	Diseño del gabinete para la electrónica principal	40	4	5	7
54	<i>Plan de pruebas para los módulos del nivel exterior</i>	52			
55	Módulo Tactile Feedback		5	6	7
56	Módulo Force Feedback		5	6	7
57	Módulo Finger Tracking		5	6	7
58	<i>Diseño e implementación del hardware interior</i>				
59	Diagrama en bloques de los módulos del circuito impreso	48;41	2	3	4
60	Diseño de módulos del circuito impreso	59	14	15	18
61	Diagrama esquemático del circuito impreso	60	3	4	5
62	Placa de circuito impreso (PCB)	61	14	15	18
63	Panelizado de placa de circuito impreso	62	1	2	3
64	Preparación de archivos para fabricación del circuito impreso y compra de los materiales	63	1	2	3
65	Fabricación del circuito impreso	64	7	10	14
66	Ensamble del circuito impreso	65	1	2	3
67	Plan de pruebas del circuito impreso	64	4	5	7
68	Correcciones a la primera iteración	67;66	7	8	10
69	<i>Diseño e implementación del firmware</i>	44;45			
70	<i>Diseño del firmware</i>				
71	Diagrama de estados	40	7	10	14
72	Diagrama de flujo y actividades	71	7	10	14
73	Diagrama de clases y descripción de funciones o subrutinas	72	7	10	14
74	Plan de pruebas de módulos de software	73	5	6	7
75	Implementación del firmware	70	28	29	33
76	Integración con el hardware	58;75	7	8	10
77	<i>Implementación de la interfaz de programación para Unity</i>	42			
78	Comunicación Bluetooth 5.0		7	8	10
79	Módulo SDK-HT	78	10	12	15
80	Módulo SDK-FT	79	10	12	15
81	Módulo SDK-TF	80	9	12	14
82	Módulo SDK-FF	81	9	10	14
83	<i>Diseño e implementación de aplicación de escritorio</i>	45			
84	<i>Construcción y validación del prototipo</i>				
85	Compra de materiales para el prototipo	68	7	10	14
86	Fabricación de la placa de circuito impreso	68	14	15	17
87	Ensamble de la placa de circuito impreso	86	1	2	3
88	Pruebas del circuito impreso	87	2	3	4

89	Fabricación del gabinete de la electrónica principal	53	4	5	6
90	Prueba del firmware	88	10	14	17
91	Armado de la caja de electrónica principal	88;53	2	3	4
92	Montaje del prototipo	91;89	1	2	3
93	Pruebas del prototipo	92	10	14	17
94	Pruebas de la interfaz de programación para desarrolladores en Unity	93	4	5	7

Tabla 5.12: Listado de tareas y actividades del proyecto

Se utiliza el método PERT (Program Evaluation and Review Technique) para modelar matemáticamente la duración de las actividades de forma estocástica. Luego, aplicando la técnica de simulación de Monte Carlo, se realizan $N = 1000$ simulaciones y se estima la función densidad de probabilidad de la duración total del proyecto en días. El resultado se puede observar en la Ilustración 5.10.

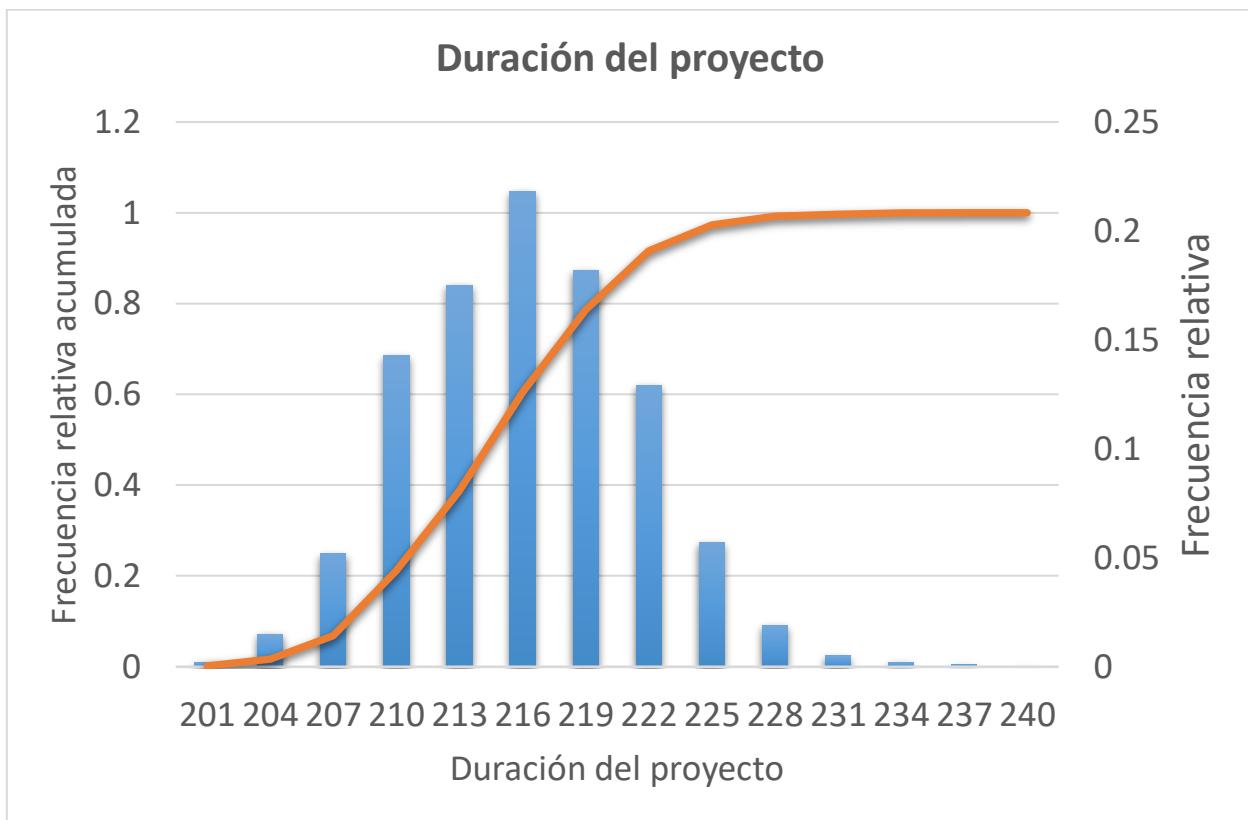
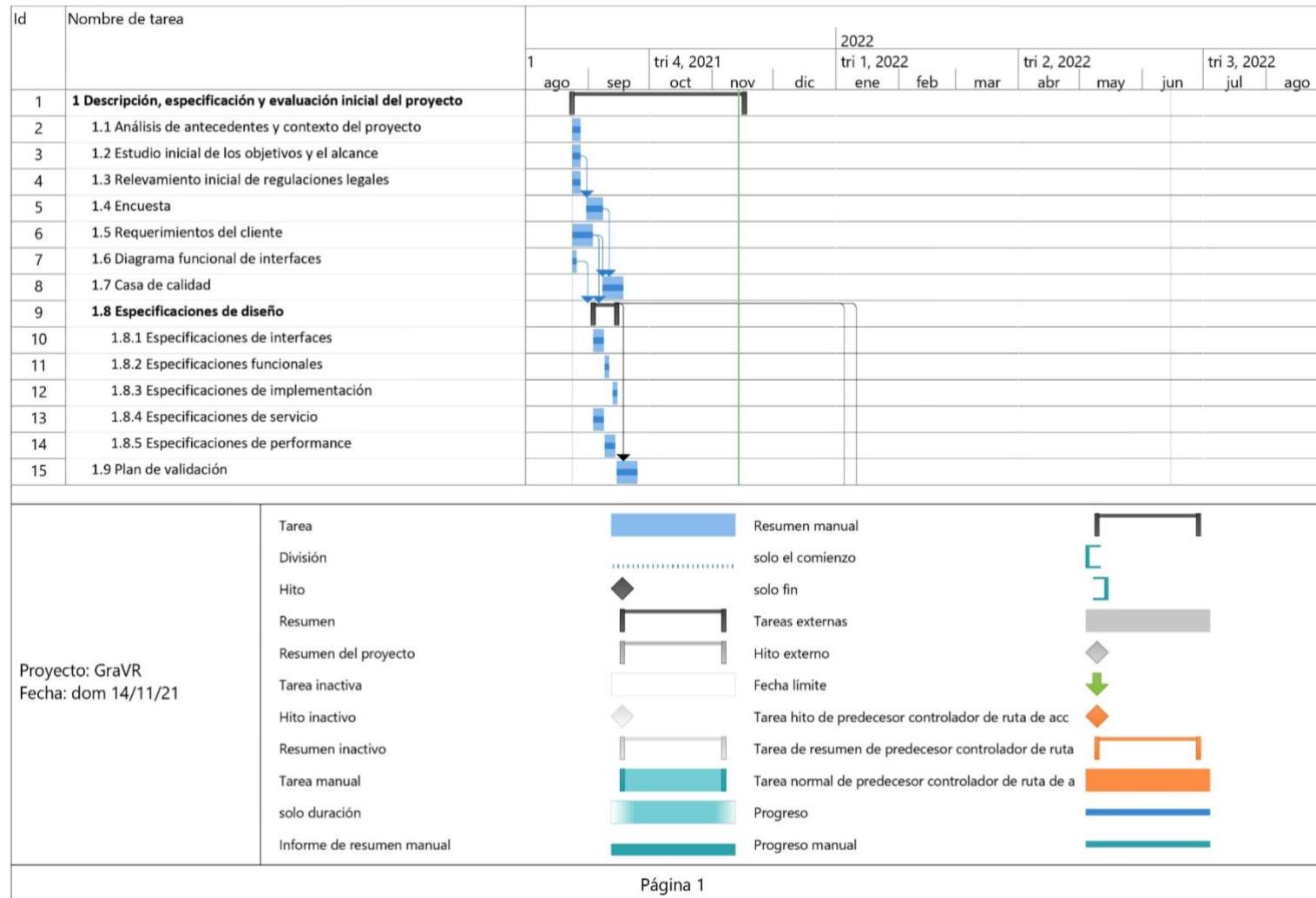
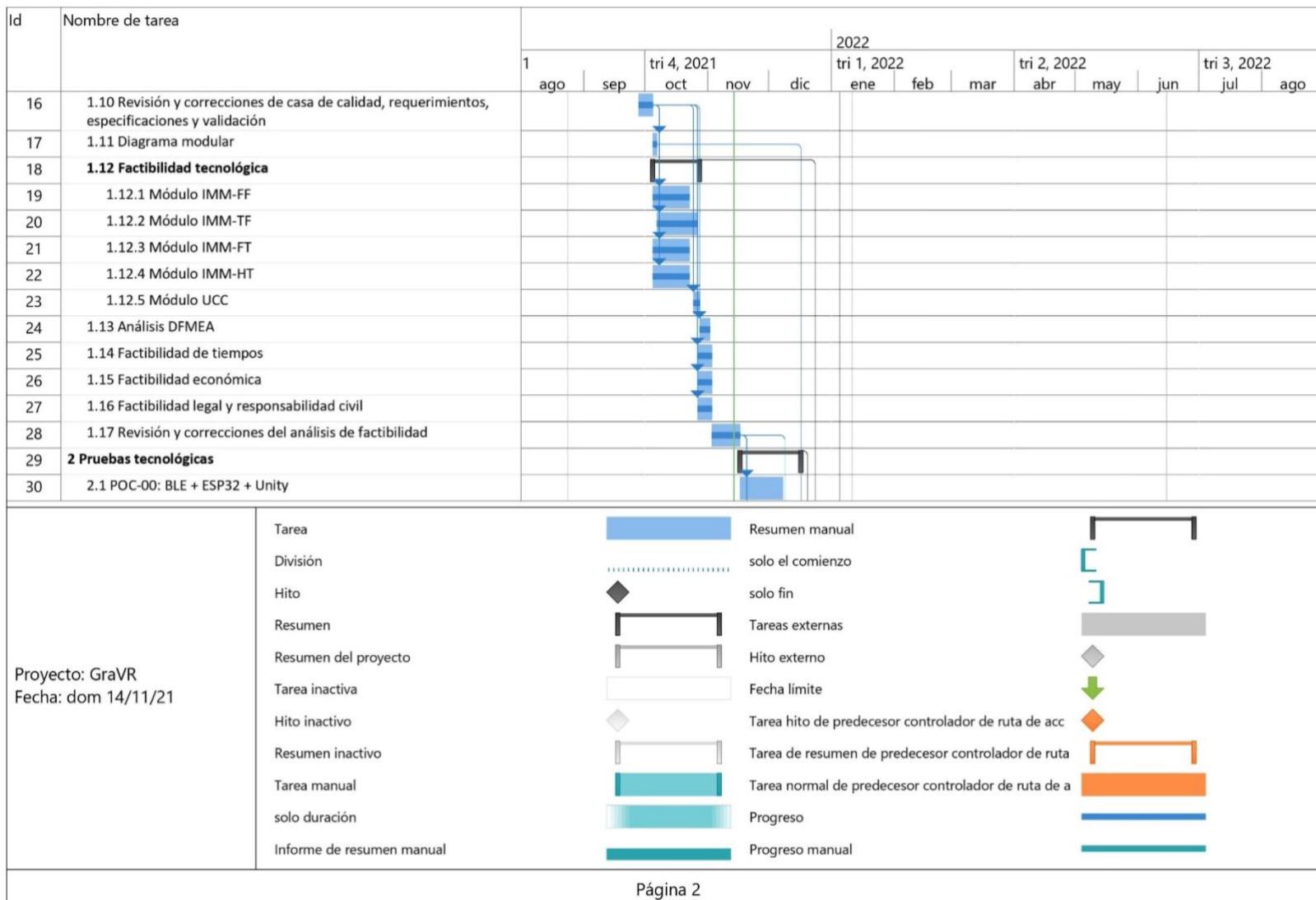
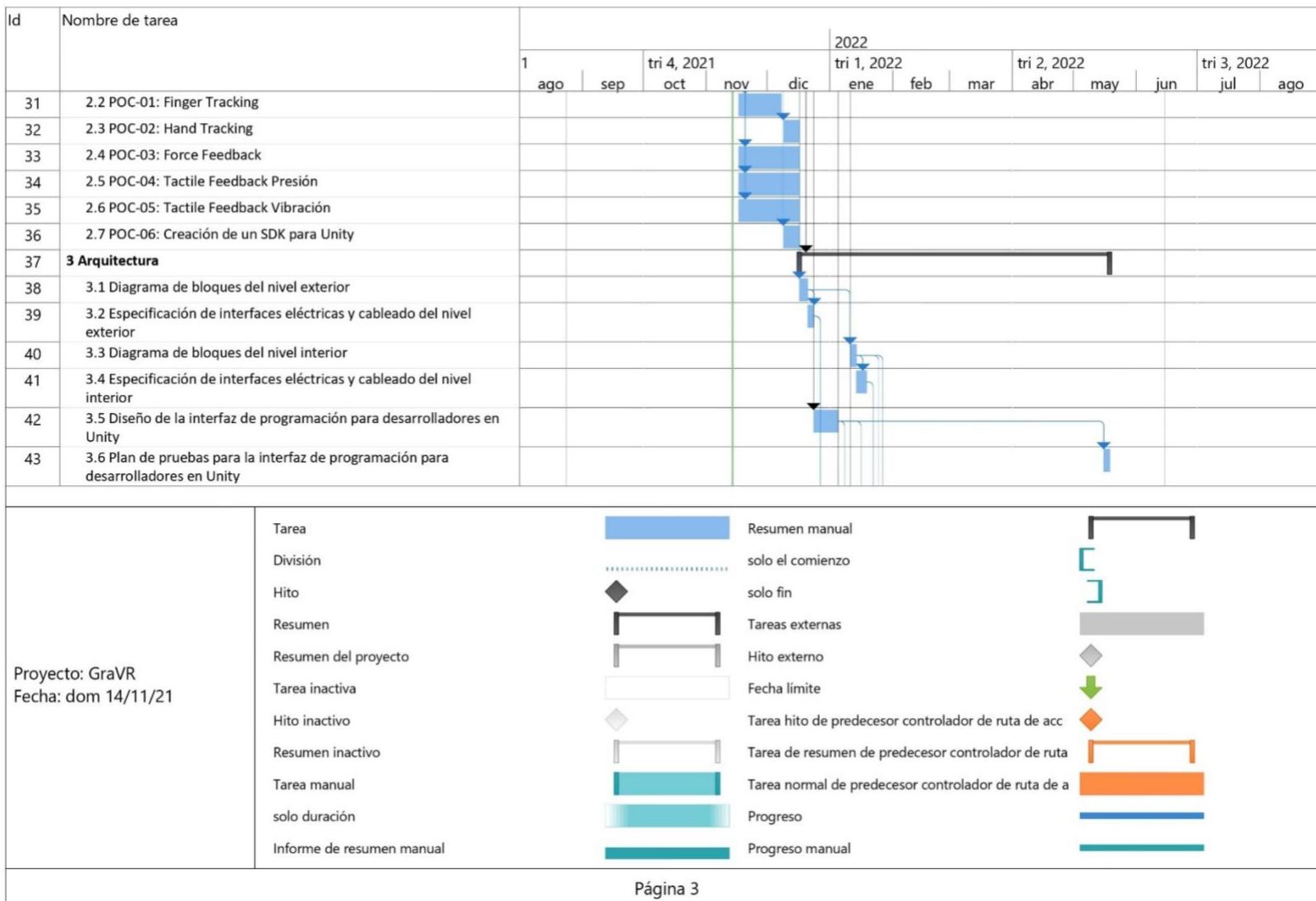


Ilustración 5.10: Histograma de la duración del proyecto obtenido con la simulación de Monte Carlo

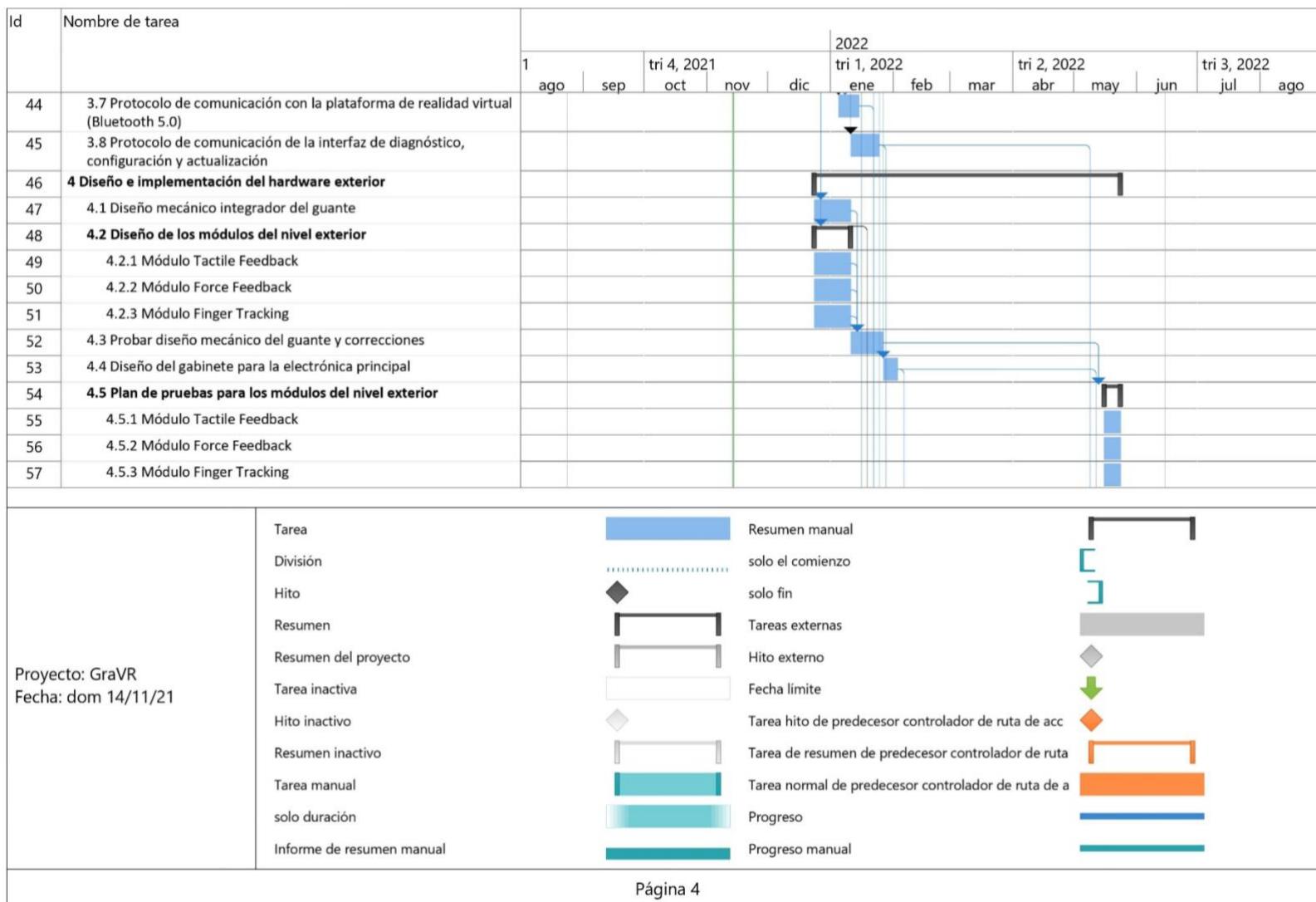
5.2.2. Programación (Gantt)

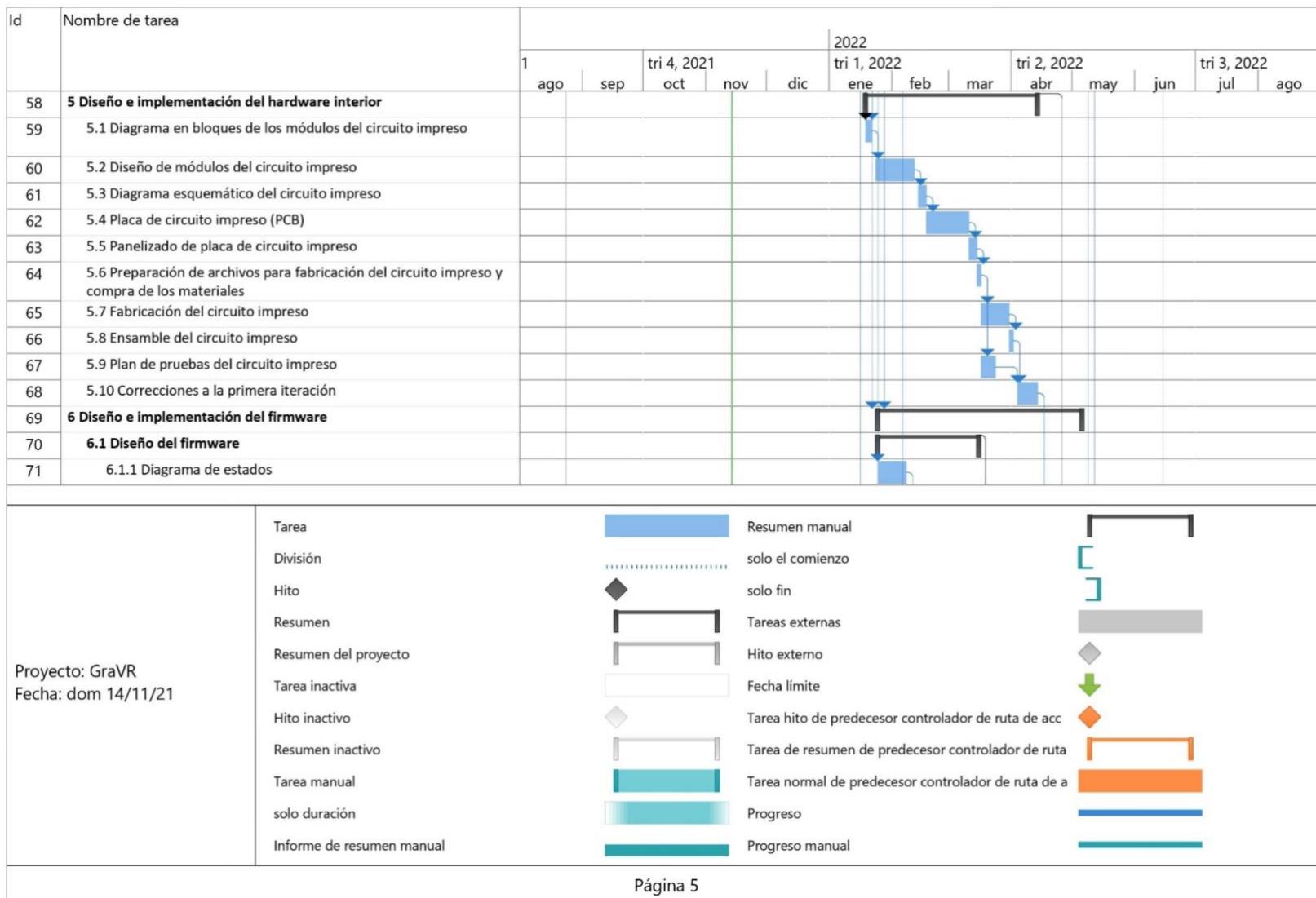


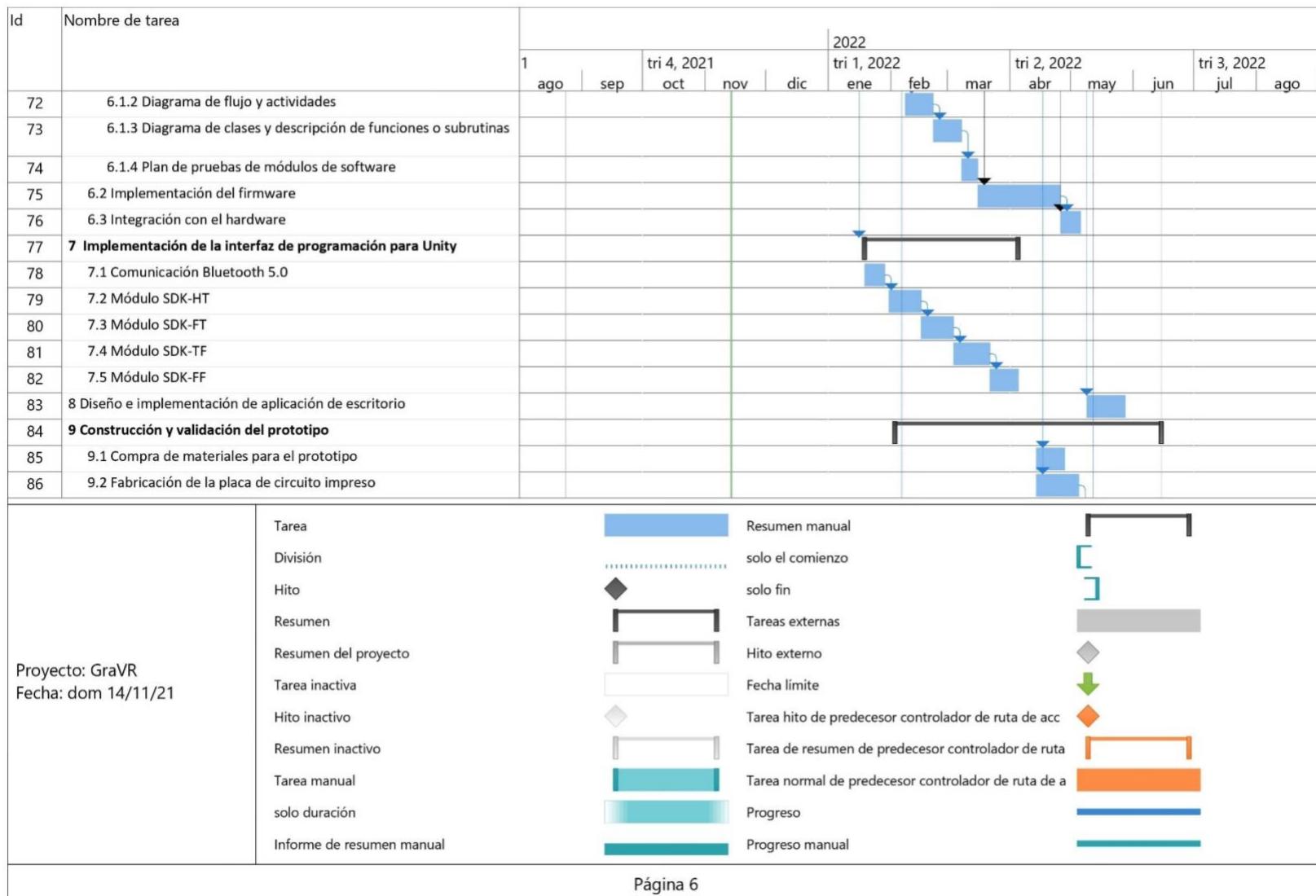


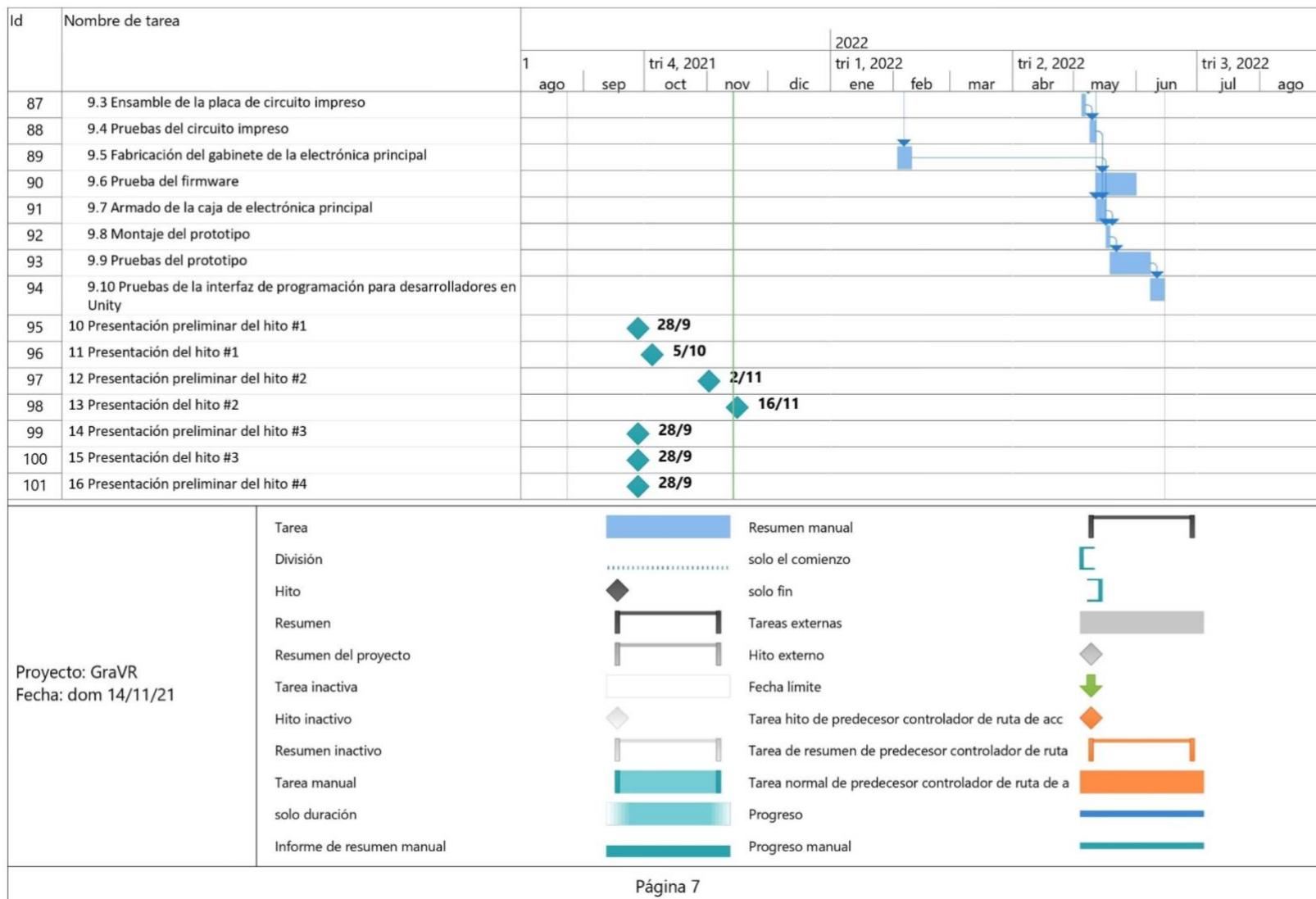


Página 3









Página 7

Utilizando la programación de las actividades realizada con el diagrama de Gantt, se puede utilizar nuevamente la técnica de simulación de Monte Carlo, y se estima la distribución de probabilidad de la fecha de finalización del proyecto. El resultado se puede observar en la Ilustración 5.11.



Ilustración 5.11: Histograma de la fecha de finalización obtenido con la simulación de Monte Carlo

5.3. Factibilidad económica. (Mercado, costos, VAN, TIR, Punto de Equilibrio)

5.3.1. Mercado

El producto está destinado a ser introducido al mercado global. Dentro de la población se debe analizar el mercado interesado en realidad virtual junto con el que ya lo utiliza en la actualidad. Se obtiene de la página web Statista³ que actualmente hay 20.000 usuarios de realidad virtual de los cuales aproximadamente un 70% utiliza Meta Quest y se estima que solo un 1,5% de ellos serían potenciales compradores de un guante GraVR.

Luego, debido a la encuesta realizada se obtiene que solo un 56% de los encuestados (pertenecientes a las clases sociales mencionadas previamente) están interesados en adquirir su propio visor de realidad virtual y se considera que, a lo largo de 5 años, el 2% de ellos efectivamente lo adquieran. Con este análisis se tiene que aproximadamente 4.000 guantes serán vendidos a lo largo de 5 años.

5.3.2. Costos

Para analizar los costos totales del producto se deben contemplar tanto los costos de desarrollo del producto final como los costos fijos, y los costos variables una vez desarrollado el producto.

La Tabla 5.13 muestra el costo total de fabricación de una unidad de forma estimada.

Módulo	Costo por unidad (US\$)
Guante	\$5
Módulo de alimentación	\$10
Módulo de <i>tactile feedback</i>	\$90
Módulo de <i>force feedback</i>	\$25
Módulo de <i>finger tracking</i>	\$90
Módulo de conexión	\$10
Electrónica general	\$70
TOTAL	\$300

Tabla 5.13: Costo de fabricación unitario

Se evalúa tercerizar el soldado y ensamblado de todos los componentes y contratar personal calificado únicamente para realizar las pruebas de los módulos y el ensamblado y testeo del sistema completo. Se fija una jornada laboral de 8 horas al día, 5 días a la semana. La Tabla 5.14 muestra la cantidad de empleados considerada necesaria para el proceso de ensamblado, validación y ventas.

Función	Cantidad de empleados
Ensamblado	4
Validación y tests	4
Ventas y administración	2

Tabla 5.14: Personal

³ [Statista - Página de estadísticas globales](#)

Se considera necesario que en el personal de ensamblado haya 4 ingenieros a cargo y 2 técnico para brindar apoyo, la validación y los tests serán realizados por 4 técnicos y luego 4 personas especializadas en el sector administrativo a cargo de la venta y la administración.

Los sueldos para el personal considerando salarios promedio en Argentina son los siguientes:

Profesión	Salario mensual (US\$)
Ingenieros (x4)	\$6.000
Técnicos (x4)	\$4.000
Administrativo (x2)	\$1.600
TOTAL	\$11.600

Tabla 5.15: Salarios mensuales

Además, se consideran los costos de embalaje y envío del producto. El embalaje será una caja de cartón, internamente una espuma que rodee y acomode al guante para prevenir que el mismo se mueva y se golpee durante el envío. Para el envío se estimará un costo promedio.

Función	Costo por unidad (US\$)
Embalaje	\$20
Envío	\$15
TOTAL	\$35

Tabla 5.16: Embalaje y envío

Se considera un gasto elevado en publicidad y marketing del producto y finalmente, se tiene en cuenta un costo de renta mensual tomando un valor promedio de oficinas o talleres en el Gran Buenos Aires, del tamaño necesario para el trabajo cómodo y ordenado de 14 empleados.

Tipo de servicio	Costo mensual (US\$)
Alquiler	\$500
Telefonía e Internet	\$100
Publicidad	\$300
TOTAL	\$900

Tabla 5.17: Servicios

Además de todos los costos mencionados, se debe considerar también un gasto importante de inversión inicial para obtener el material necesario para realizar el ensamble y los tests requeridos de cada módulo, y del producto terminado.

Material	Costo unitario (US\$)	Costo Total (US\$)
Visores Meta Quest 2 (x8)	\$300	\$2.400
Multímetro (x7)	\$25	\$175
Estación de soldado (x5)	\$50	\$250

Diligent Explorer Board (x5)	\$500	\$2.500
Mesas de trabajo/Escritorios (x7)	\$55	\$900
Cajas de herramientas (x5)	\$25	\$125
Computadoras (x15)	\$1.000	\$15.000
Publicidad	\$10.000	\$10.000
TOTAL		\$31.350

Tabla 5.18: Inversión Inicial

Finalmente, se tienen en cuenta los costos, tanto variables como fijos, a los que se les puede discriminar el IVA.

Concepto	Costo sin IVA (US\$)	IVA
MPD (por unidad)	\$234,7	\$49,3
Costos fijos (Servicios mensuales)	\$1.223	\$257
Costos de inversión inicial	\$9.132	\$1.918

Tabla 5.19: IVA discriminado

5.3.3. Ingresos

La única forma por la cual se generarán ingresos es mediante la venta del producto, por lo tanto, se elige el precio de venta por unidad especificado en la siguiente Tabla. El mismo se basó en los estudios de mercado realizados, se fijó un margen de ganancia del 60%. Teniendo en cuenta que el costo de la materia prima directa (MPD) es \$249, sumándole el envío y embalaje se obtiene un costo de \$284 por unidad, y considerando también el impuesto al valor agregado (IVA) del 21 %. Se elige un precio de venta unitario de \$550 (USD).

Producto	Precio (US\$)
Guante para VR	\$550

Tabla 5.20: Precio del guante

Se considera que, como fue mencionado previamente en el análisis de mercado, se venderán aproximadamente 2800 guantes en los próximos dos años. Por lo tanto, asumiendo que los primeros meses las ventas son más bajas debido a la nueva incorporación al mercado, se presenta la siguiente proyección de ventas:

Período (Año)	Cantidad de ventas	Ingreso (US\$)
1	500	\$ 275.000
2	800	\$ 440.000
3	800	\$ 440.000
4	750	\$ 412.500
5	650	\$ 357.500

Tabla 5.21: Ingresos trimestrales

5.3.4. Flujo de fondos y rendimiento (VAN, TIR)

En la siguiente Tabla se presenta el flujo de fondos del proyecto incluyendo desde la inversión inicial necesaria para comenzar el negocio hasta el posicionamiento en el mercado luego de un tiempo y las ventas durante cinco años.

Año	0	1	2	3	4	5
ventas	\$-	\$275.000,00	\$440.000,00	\$440.000,00	\$412.500,00	\$357.500,00
costos fijos	\$-	\$150.000,00	\$150.000,00	\$150.000,00	\$150.000,00	\$150.000,00
costos variables	\$-	\$150.000,00	\$240.000,00	\$240.000,00	\$225.000,00	\$195.000,00
amortizaciones	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
UAIG	\$-	\$(25.000,00)	\$50.000,00	\$50.000,00	\$37.500,00	\$12.500,00
I(45%)	\$-	\$(11.250,00)	\$22.500,00	\$22.500,00	\$16.875,00	\$5.625,00
Uneta	\$-	\$(13.750,00)	\$27.500,00	\$27.500,00	\$20.625,00	\$6.875,00
Inv Inicial	\$(30.000,00)	\$-	\$-	\$-	\$-	\$-
FEO	\$(30.000,00)	\$(13.750,00)	\$27.500,00	\$27.500,00	\$20.625,00	\$6.875,00
VA	\$-	\$(11.956,52)	\$20.793,95	\$18.081,70	\$11.792,41	\$3.418,09

Tabla 5.22: Flujo de fondos

En base al flujo de fondos presentado en la Tabla 5.22 se procede a calcular el VAN del proyecto, para saber si el mismo generará beneficios. Se toma una tasa de descuento anual del 15% y se obtiene:

$$VAN = \$ 12,129.63$$

Al obtener un valor positivo, se puede concluir que el proyecto generará beneficios.

Otra medida que se analiza es la tasa interna de retorno (TIR), en base al flujo de fondos:

$$TIR = 27\%$$

Al obtener un TIR mayor a la tasa de descuento para dos años se puede decir que el proyecto es viable.

VAN (Tasa de descuento 15% anual)	TIR (5 años)
\$12,129.63	27%

Tabla 5.23: Factibilidad económica

5.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil

5.4.1. Regulaciones aplicables

La regulación que aplica a productos electrónicos de baja tensión en la República Argentina es la Resolución N°169/2018. Sin embargo, aplica únicamente a equipos que operen con tensiones superiores a los 50V. Como no es el caso del producto a diseñar, la regulación no aplica, pero se la usa como guía para aspectos de seguridad e información.

En primer lugar, obtenemos la información que debe ser indicada en el producto:

- Industria Argentina
- Nombre del fabricante o marca comercial
- Modelo, número de tipo, lote, serie o cualquier elemento de identificación del equipamiento eléctrico

Además, se extraen requisitos esenciales de seguridad:

- El equipo deberá contener información acerca de las características fundamentales de cuyo conocimiento y observancia dependa su utilización acorde con el destino y empleo seguro.
- El equipo debe ser fabricado (y diseñado) para garantizar un conexionado seguro y adecuado
- El equipo deberá responder a las exigencias mecánicas previstas en su uso con el objeto de que no corran peligro personas, animales ni bienes.
- El equipo deberá resistir influencias no mecánicas de carácter ambiental previstas en su uso con el objeto de que no corran peligro personas, animales ni bienes.
- No deberá poner en peligro a las personas o al entorno bajo condiciones previstas de sobrecarga
- Deberá asegurarse de que las condiciones de almacenamiento y/o transporte del equipamiento eléctrico no comprometan el cumplimiento del objetivo de seguridad.

5.4.2. Compatibilidad electromagnética y edad mínima

En lo que respecta a la compatibilidad electromagnética (EMC), se debe cumplir lo dictaminado por la *Federal Communications Commission (FCC)* de EE.UU en la Parte 15 de su regulación. Allí se dan los límites a la intensidad de campo eléctrico irradiado a 3 y a 10 metros de distancia, como se muestra en la Tabla 5.24. El producto deberá cumplir estos límites.

Frecuencia de Emisión [MHz]	Máxima intensidad de campo a 3m [dBuV/m]	Máxima intensidad de campo a 10m [dBuV/m]
30 - 88	40.0	39.0
88 - 216	43.5	43.5
216 - 690	46.0	46.5
Mayor a 960	54.0	49.5

Tabla 5.24: Límites de emisión electromagnética FCC Parte 15

Con respecto a la edad mínima requerida para el uso del producto, la primera limitante es la edad mínima de uso del Meta Quest 2, que es de 14 años. No tiene sentido que el guante pueda ser utilizado por menores de 14 años porque no pueden usarlo en conjunto con la plataforma de realidad virtual.

Luego, se debe determinar si 14 años es apropiado para el producto o es necesario limitar aún más la edad, para lo que se consultó [8]. Allí, en la sección de Tecnología, subsecciones de Equipamiento Audiovisual y Videojuegos, se determina que para niños mayores a 6 años no hace falta tener consideraciones sobre los tamaños de las partes y formas de los bordes, factores que podrían limitar la edad mínima de uso del producto. Además, a partir de los 9 años los niños prefieren juegos interactivos y de simulación, los cuales son perfectamente compatibles con la realidad virtual. Por lo tanto, se considera que 14 años es más que suficiente desde este punto de vista y es la edad mínima con la que se puede usar el producto.

5.4.3. Información para los usuarios

Debido a todo lo mencionado anteriormente, se debe aclarar lo siguiente a los usuarios:

- El producto no se puede utilizar con las manos húmedas
- El producto no puede ser utilizado por personas menores de 14 años
- No se recomienda el uso para personas que usen marcapasos

- Industria Argentina
- Fabricante: GraVR
- Modelo y número de serie del producto

5.4.4. Responsabilidad civil

A la hora de elegir el tipo social para la empresa en la República Argentina, al momento de escribir este documento las dos opciones son una Sociedad Anónima (SA) y una Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL), dado que la Sociedad Anónima Simplificada (SAS) no está disponible.

En la República Argentina, a diferencia de otros países, no hay un tratamiento tributario diferenciado para los distintos tipos sociales, por lo que no es un factor a la hora de elegir. Las SRL tienen ciertas ventajas para las pequeñas y medianas empresas, por ejemplo, su capital social no tiene un mínimo legal, no pagan tasa anual a la Inspección General de Justicia (IGJ) ni deben presentar balances en la IGJ, y sus costos de constitución y mantenimiento son menores. Un beneficio de las SA es que la responsabilidad de los accionistas queda limitada a las acciones que adquiere, mientras que en las SRL se tiene responsabilidad solidaria por el total de las cuotas de la empresa.

Más allá de estos factores, la opción elegida es SA debido a que su capital social está dividido en acciones, las cuales son transmisibles con mayor facilidad que las cuotas de una SRL, que deben ser inscriptas en un registro público y presentan mayores complicaciones. Además, mientras que las SRL están limitadas a 50 socios, las SA no tienen un límite. Estos factores son de gran importancia debido a que es posible que el proyecto precise inversiones, y las acciones de la empresa son una forma de financiarlas.

6. Ingeniería de detalle

6.1. Hardware

En la Ilustración 6.1 se puede observar el diagrama en bloques que presenta los módulos de hardware de alto nivel que integran al guante GraVR. Se emplea una arquitectura centralizada en un módulo principal denominado **NerveBox**, que procesa la información proveniente de los módulos secundarios y emite las señales de excitación necesarias para actuar sobre ellos. Los módulos secundarios contienen los sensores, actuadores y elementos mecánicos para interactuar físicamente con la mano del participante.

En el diagrama se presentan los módulos internos, tanto el principal como los secundarios, en color gris. Por otro lado, en color naranja se presentan módulos externos con los cuales interactúa el hardware.

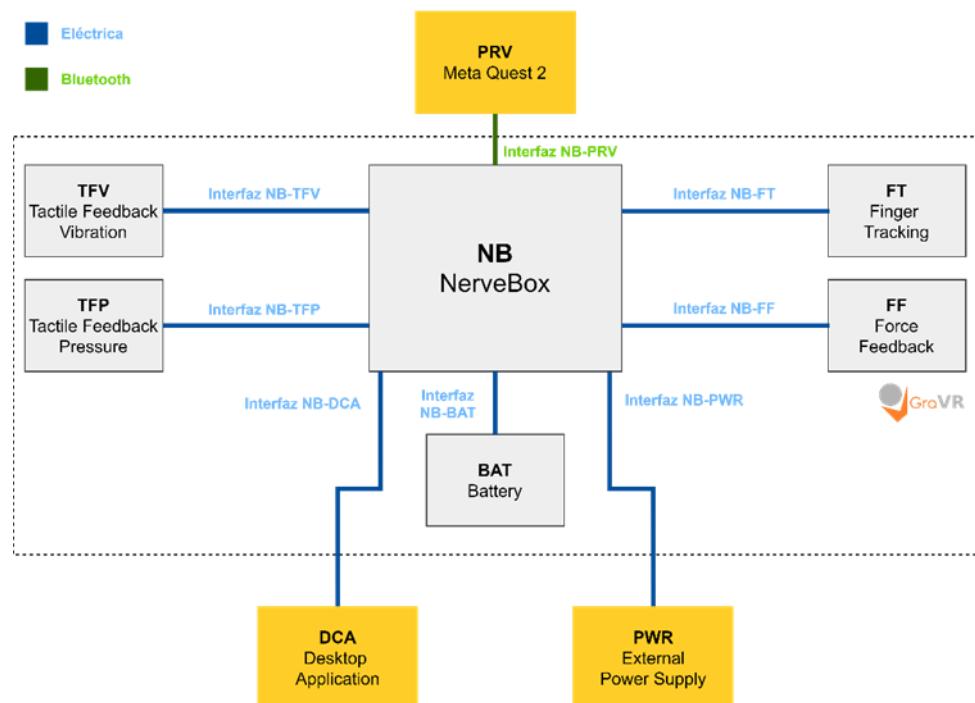


Ilustración 6.1: Diagrama de bloques del Hardware del guante

6.1.1. NerveBox

Como se menciona previamente, el módulo NerveBox es el encargado de comandar y procesar la información de todo el resto de los módulos, interconectando todas las señales necesarias con la unidad central de procesamiento. La Ilustración 6.2 muestra mediante un diagrama de bloques los diferentes módulos que lo conforman, y su esquemático puede verse en la Ilustración 11.1 del Anexo.

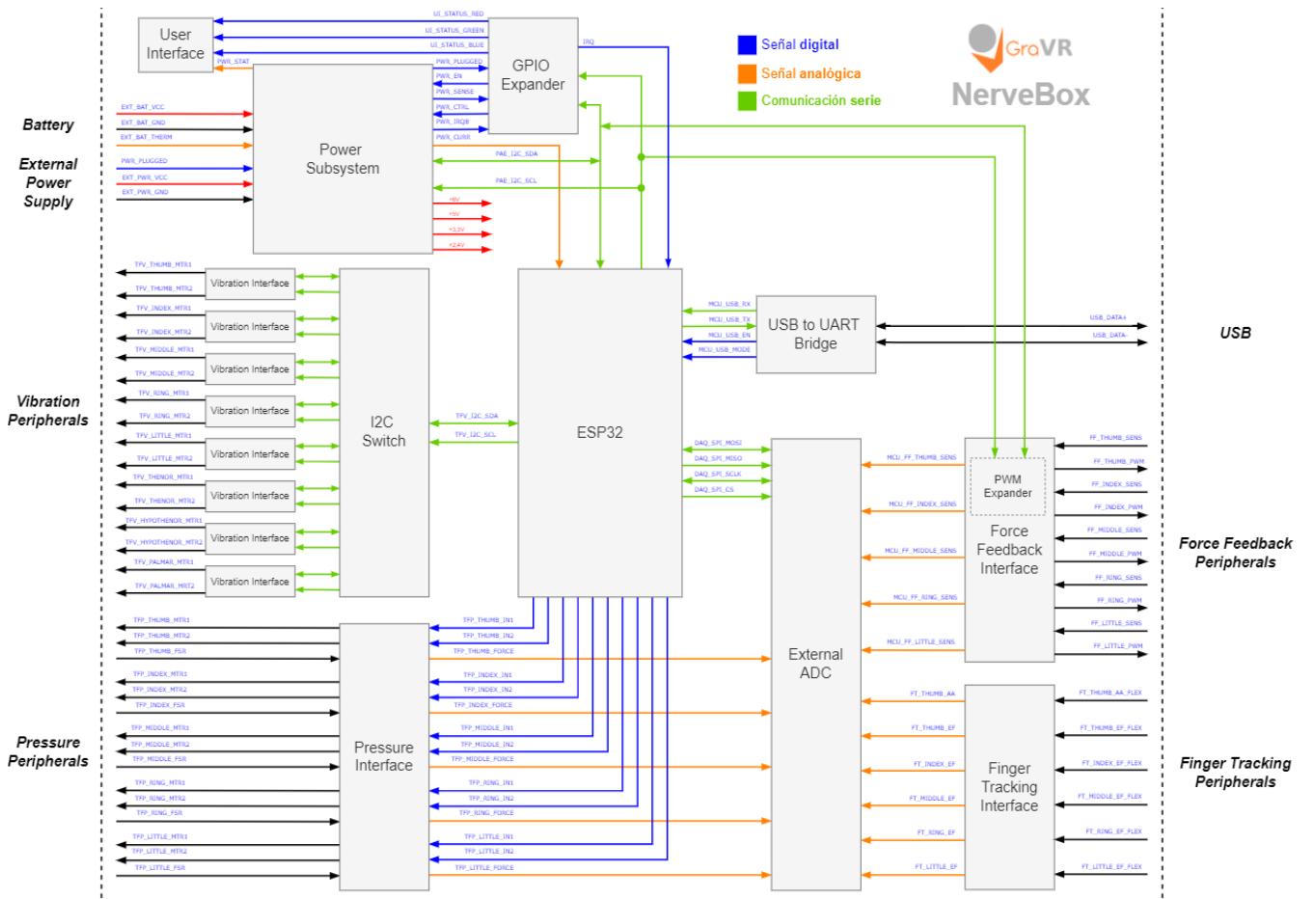


Ilustración 6.2: Diagrama en bloques del módulo NerveBox.

Los distintos submódulos se describen brevemente a continuación y serán explicados en más detalle en las siguientes subsecciones.

- **ESP32**: Es el módulo central de procesamiento. El “cerebro” del producto, se comunica mediante señales analógicas, digitales y por comunicaciones seriales con el resto de los módulos.
- **GPIO Expander**: Provee de 8 pines extra de GPIO para suplir la falta de estos en el ESP32.
- **PWM Expander**: Provee de 16 pines extra de PWM de los cuales se usan 5 para controlar los servo-motores de *force feedback*.
- **External ADC**: Conversor analógico a digital de 16 canales para poder manejar las señales analógicas provenientes de los módulos de *pressure feedback*, *force feedback* y *finger tracking*.
- **USB to UART bridge**: Se utiliza para la programación del microcontrolador y la comunicación con la interfaz de diagnóstico y calibración. Internamente, se comunica con el microcontrolador vía UART.
- **User Interface**: Se encarga de informarle al usuario mediante una luz LED el estado del dispositivo en cuanto a conexión y los diferentes estados de la batería.
- **Pressure Interface**: Tiene por objetivo proveer al procesador de una señal analógica con la información de la presión (o fuerza) que está siendo aplicada sobre el pulpejo del dedo. Además de una etapa de potencia capaz de excitar al motor y proveer de la corriente necesaria para actuar sobre él según lo indicado por las señales provenientes del procesador central.
- **Vibration interface e I2C Switch**: Se encargan de controlar los actuadores de vibración utilizando comunicación I2C para la comunicación con el microcontrolador.
- **Force Feedback Interface**: Tiene por objetivo proveer al procesador de una señal analógica con la información sobre el valor del potenciómetro y proveer a los servomotores las señales necesarias para controlarlos de la forma deseada.
- **Finger Tracking Interface**: El objetivo es proveer al procesador de una señal analógica con la información sobre el valor de la resistencia de cada *flex sensor*.

- **Power subsystem:** Este módulo se encarga de proveer y suministrar la energía de todos los otros módulos utilizando una batería o una fuente externa.

Para mayor claridad, se explica en las secciones los respectivos módulos secundarios las interfaces circuitales de *pressure feedback* (6.1.2.3), *vibration feedback* (6.1.3.3), *force feedback* (**Error! Reference source not found.**) y *finger tracking* (6.1.5.3). Además, el subsistema de alimentación tiene una sección propia (6.1.6) por su alto grado de complejidad.

6.1.1.1. Módulo central de procesamiento

Por módulo central de procesamiento, nos referimos principalmente al ESP32-WROOM-32E, que es el microcontrolador que se utiliza para implementar este producto.

Se puede ver un diagrama de las conexiones de este módulo en la Ilustración 11.16. En este, se observa que además del circuito de *Enable* clásico, utilizado para cualquier microcontrolador se incluyen los *pull-ups* para 2 canales de I2C, utilizados para los módulos de expansión, para el control de vibración y para el sistema de alimentación.

6.1.1.2. Expansión de pines

Dada la numerosa cantidad de sensores y actuadores utilizados por los módulos secundarios, hay una gran cantidad de señales que deben conectarse a los *pines* del microcontrolador. En la Tabla 6.1 se lista la cantidad y tipo de *pines* requeridos.

Función	Periférico	Pines utilizados	Comentarios
Vibration	I2C	2	
Pressure	ADC	5	
	PWM	10	Lazo de control sensible a retrasos
User Interface	GPIO	3	
Power subsystem	GPIO	4	
	ADC	1	
	I2C	2	
	UART	2	
USB to UART Bridge	GPIO	1	Debe ser conectado al MCU
	PWM	5	
Force Feedback	ADC	5	
	ADC	6	
46			

Tabla 6.1: Pines necesarios del microcontrolador

Sin embargo, el ESP32 cuenta con 27 *pines* utilizables, por lo que se debe recurrir a *hardware* adicional para expandir la cantidad de entradas y salidas. Se consideraron tanto la opción de agregar un microcontrolador adicional, como la de recurrir a circuitos integrados con funciones específicas. Se eligió la segunda opción para reducir la complejidad del desarrollo, dado que el agregado de un microcontrolador adicional implicaría desarrollo adicional de firmware, mayor probabilidad de fallas por errores en la comunicación, el agregado de otra interfaz de programación, entre otras complicaciones.

Se soluciona el problema mediante el agregado de un **ADC externo**, un **expansor GPIO** y un **expansor PWM**, cuyos funcionamientos se explican a continuación.

De todas las entradas y salidas que se pueden expandir, se deben tener en cuenta las restricciones que presentan las señales. En particular, las señales PWM del módulo de presión son sensibles a retrasos dado que forman parte de un lazo de control, por lo que se elige no expandirlas y conectarlas directo al microcontrolador. Además, una señal GPIO del conversor de USB a UART debe ir conectado al microcontrolador. Mas allá de eso, el resto de las señales pueden ser expandidas.

ADC Externo

En primer lugar, se agregan 16 entradas con el uso del **ADS7957SRHBT**, un conversor analógico a digital de 10 bits y 16 canales. Se lo utiliza a una máxima tasa de muestreo de 500ksps, para lo cual se limita el ancho de banda de cada señal con un filtro *anti-alias* de $f_c = 1061\text{Hz}$. Dada f_c , la mínima frecuencia de muestreo necesaria para cumplir el criterio de Nyquist es de 34kHz o 272ksps , con lo que 500ksps deja un margen adecuado.

El circuito se muestra en la Ilustración 11.20 del Anexo. Para la elección de los componentes se siguieron las recomendaciones del fabricante, teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo elegida.

Expansor GPIO

En segundo lugar, se utiliza el circuito integrado **SX1502I087TRT** de Semtech, tiene una comunicación I²C con el microcontrolador y permite configurar 8 pines como entrada o salida. Además, tiene un pin extra para interrumpir al microcontrolador ante el cambio de alguna de las entradas, el cual es utilizado. El circuito implementado es el recomendado por el fabricante, su esquemático se muestra en la Ilustración 11.21 del Anexo.

Expansor PWM

Se utiliza el controlador **PCA9685** de NXP, se comunica por un bus I²C con el módulo central de procesamiento y tiene 16 canales de salida. Se lo utiliza para controlar los 5 servo motores del módulo de *force feedback*, que son las únicas señales PWM expansibles dado que las del módulo de presión son sensibles a retrasos.

La frecuencia de la señal de salida es la misma para todos los canales, configurable entre 24Hz y 1526Hz, lo cual es compatible con el requerimiento del módulo de *force feedback*. Se sigue la recomendación del fabricante para el diseño del circuito, cuyo esquemático se presenta en la Ilustración 11.17 del Anexo.

6.1.1.3. Interfaz de comunicación externa

Al hablar de interfaz de comunicación externa, en el contexto de la NerveBox, se habla de la comunicación serial vía USB 3.0 que ofrece el guante de GraVR. Mediante este canal, se pueden realizar diagnósticos (a través de *logs* que el microcontrolador puede enviar), configuraciones que puede comunicar una computadora al microcontrolador, y, fundamentalmente, la programación del microcontrolador. La principal función de este módulo es, consecuentemente, hacer de puente de comunicación entre el protocolo USB 3.0, y los protocolos seriales manejados por el ESP-32, que en este caso será UART.

Este tipo de módulos son de uso frecuente en las múltiples placas de desarrollo que utilizan al ESP-32, y los diseños de circuitos, así como los circuitos integrados utilizados, están estandarizados. La documentación de *Espressif* (desarrollador del ESP-32) lista los diferentes integrados utilizados como puente USB-UART en todas sus placas de desarrollo⁴. De ella se extraen las opciones de la familia de integrados FT230 del fabricante FTDI, la familia CP2102 de SiLabs, y el integrado CH340 de WCH, todos ellos ofreciendo prestaciones similares y adecuadas a los requerimientos de este proyecto. Justamente ante la equivalencia en utilidad de estos módulos, se utilizó como criterio de decisión la existencia de documentación y ejemplos de uso previo, así como disponibilidad en el mercado. El elegido fue finalmente el **CP2102N-A02-GQFN28** de *SiLabs*, por los criterios mencionados anteriormente, y por contar con 3 variantes de este integrado igualmente útiles y compatibles pin a pin. Esto último resultó de particular utilidad ante la falta de stock de circuitos integrados en el mercado global.

La Ilustración 11.18 del Anexo muestra el circuito que acompaña al CP2102N-A02-GQFN28 para complementar al módulo. Este circuito está inspirado en los esquemáticos de la placa de desarrollo *Devkit 1* del ESP-32, con la variante de usar un conector USB-C en lugar de un Micro-USB. Esta variante se debe a las tendencias actuales a utilizar este conector, que incluyen al Meta Quest 2.

⁴ [Lista](#) de puentes USB-UART utilizados por placas de desarrollo del ESP-32.

6.1.1.4. Interfaz de usuario

La principal vía de comunicación del guante GraVR es vía bluetooth y hacia la plataforma de realidad virtual. Sin embargo, una mínima interfaz de comunicación de estados del sistema hacia el usuario es necesaria, y esa es la función del circuito mostrado en la Ilustración 11.19 del Anexo. Mediante el uso de un LED RGB, se informan los siguientes estados al usuario:

Estado	LED RGB
Anuncio de servicio BLE de GraVR	Azul intermitente
Conectado por Bluetooth a un cliente	Azul sólido
Conectado y batería cargándose	Verde intermitente
Conectado con carga completa	Verde sólido
Batería baja	Rojo sólido

Tabla 6.2: Estados de la interfaz de usuario.

La detección de los estados mencionados queda a cargo del microcontrolador, quien consecuentemente maneja las señales *UI_GREEN*, *UI_RED* y *UI_BLUE*. Las últimas dos controlan directamente el encendido o no de los LEDs correspondientes, mientras que la primera cuando transmite el estado lógico “low” apaga al LED, pero al transmitir “high” deja el encendido del LED verde al circuito de carga de la batería.

6.1.1.5. Elección de conectores

Para la elección de conectores a utilizar se tienen en cuenta varios factores. Por un lado, se busca que el conector hembra esté soldado sobre la placa y sobresalga por el gabinete que la contiene para poder realizar la conexión con los módulos externos de manera sencilla y rápida. Además, deben ser conectores horizontales ya que la conexión será por los costados del gabinete.

Por otro lado, se debe tener en cuenta el diámetro de los cables que puede utilizar cada conector ya que esto define la corriente que pueden soportar. En la Sección 11.12.2 del Anexo se encuentran especificadas todas las señales que van desde los módulos exteriores hacia los conectores de la NerveBox junto con las corrientes máximas que utilizan. En la Tabla 6.3 se muestra el máximo valor de AWG que se puede utilizar para los cables de cada módulo.

Módulo	Cantidad de señales	Corriente máxima	AWG
<i>Finger Tracking</i>	7	600 μA	Todos
<i>Force Feedback</i>	12	1 mA	Todos
<i>Vibration Feedback</i>	16	100 mA	≤ 31
<i>Pressure Feedback</i>	16	700 mA	≤ 23

Tabla 6.3: AWG máximo para el cableado de cada módulo.

Por lo tanto, se decide utilizar los conectores de la Tabla 6.4, como puede verse en la Ilustración 11.25 del Anexo.

Módulo	Conector	Fabricante
<i>Finger Tracking</i>	1053142108	Molex
<i>Force Feedback</i>	1053141112	Molex

<i>Vibration Feedback</i>	1053141116	Molex
<i>Pressure Feedback</i>	1053141116	Molex

Tabla 6.4: Conectores seleccionados.

6.1.1.6. Diseño del gabinete de la NerveBox

El gabinete de la NerveBox debe poder abrirse para insertar tanto la placa como la batería, y debe tener aperturas tanto para los conectores de los módulos externos, como para el *soft power switch* (botón de encendido y apagado), el cargador de la batería, la conexión USB-C y para que se pueda visualizar la luz LED desde el exterior.

Para ello se diseña una pieza capaz de sostener e insertar piezas que realicen contacto con el positivo y el negativo de la batería, como se muestra en la Ilustración 6.3.

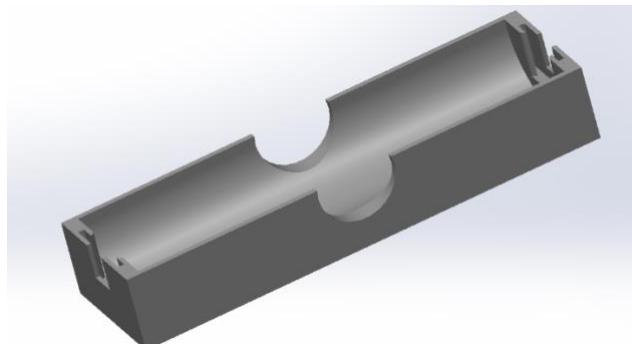


Ilustración 6.3: Carcasa para la batería.

Dicha carcasa luego es incluida dentro del gabinete propio de la NerveBox, como se muestra en la Ilustración 6.4.

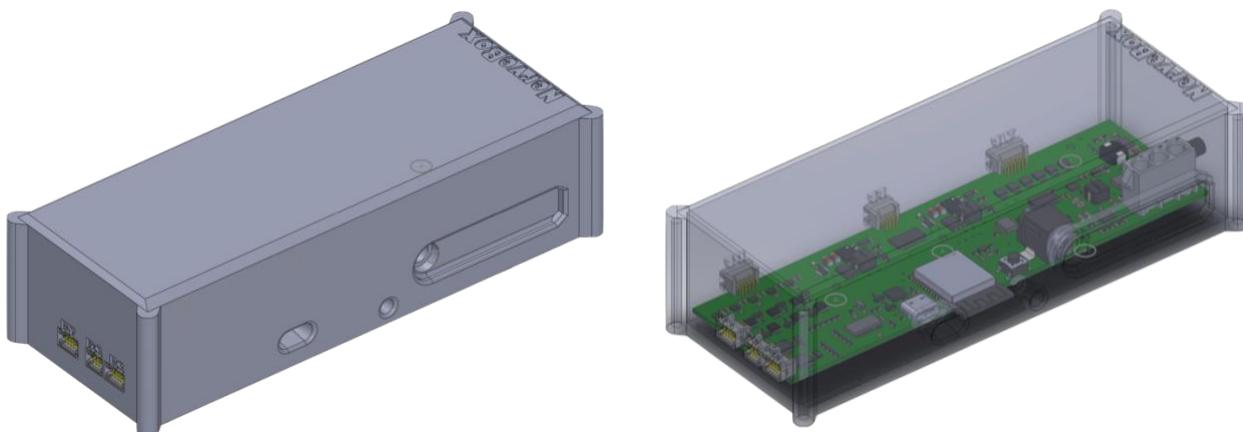


Ilustración 6.4: Gabinete de la NerveBox.

Para visualizar el diseño de la NerveBox en más detalle se tiene la **Error! Reference source not found.** del Anexo, mostrando diferentes capas y perspectivas de esta.

6.1.2. Pressure Feedback

6.1.2.1. Principio de funcionamiento

El módulo de *Pressure Feedback* cumple la función de aplicar presión sobre el pulpejo de los dedos. Para hacerlo, se enrolla, por medio de un motor de corriente continua, un cinturón de tela que se encuentra alrededor del dedo. Por medio de un sensor de presión, es posible saber cuánta fuerza se ejerce sobre el dedo, y en base a esto es posible controlar el giro del motor.

Este diseño permite obtener fuerzas variables en el tiempo, que simulan la fuerza de reacción que haría un objeto al ser tomado.

6.1.2.2. Diseño del módulo

Se muestra en la Ilustración 6.5 una vista explotada del módulo de *Pressure Feedback* y sus componentes

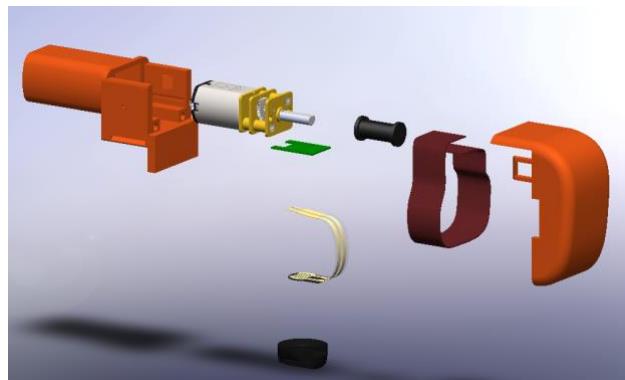


Ilustración 6.5: Vista explotada del módulo de *Pressure Feedback*

A continuación, se entra en detalle sobre cada una de las partes que componen el actuador y su función en el sistema. Cabe aclarar que se sigue un orden de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo

Base

Se muestra en la Ilustración 6.6 una vista detallada de la base donde se observan sus características más importantes.

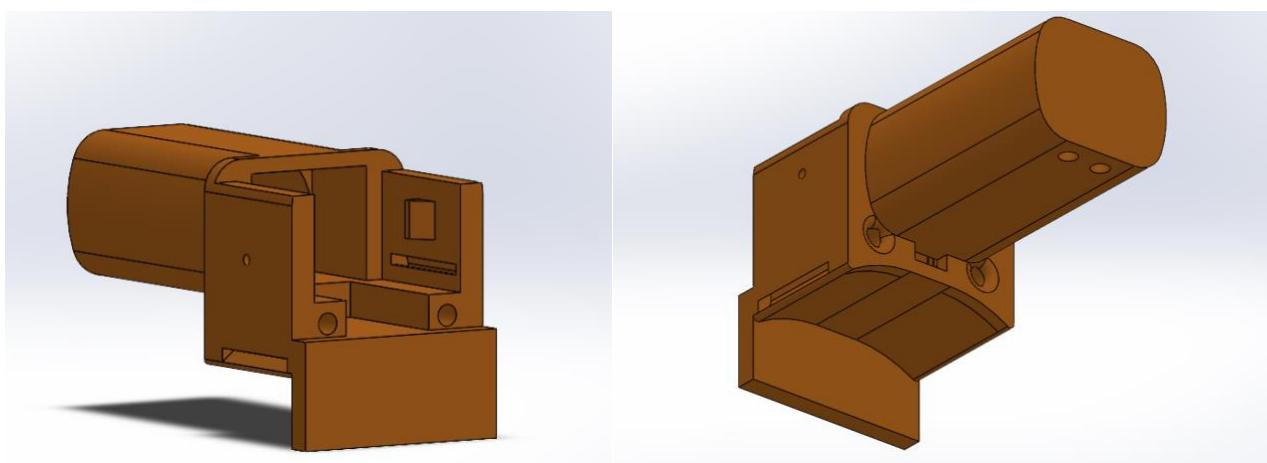


Ilustración 6.6: Base de montaje del módulo de *Pressure Feedback*

La función de este componente del módulo es principalmente la de contener al motor de forma de poder montar el módulo en el dedo sin que resulte incómodo o restrinja el movimiento de este de alguna manera. Además son, junto con el pad, las únicas piezas que se encuentran en contacto constante con el dedo del usuario. Debido a ello, se presta especial cuidado a la forma de la zona inferior de la base.

Por otro lado, también cumple la función de guiar el cinturón para lograr que el movimiento de este sea predecible. Cuenta entonces con un canal interno que permite que pase el cinturón evitando, además, que el mismo haga contacto con la piel de los laterales del dedo. De no ser así, el movimiento constante de la tela causaría molestias en el usuario.

Por último, cuenta en su parte frontal con un tope saliente que ayuda a que el usuario posicione correctamente su dedo al colocarse el guante y a aplicar la fuerza realizada por el módulo de *Force Feedback*. Para ello, también cuenta con agujeros pasantes a ambos lados de la apertura para el motor que permiten atar el hilo del módulo dicho módulo, funcionando así el actuador de *Pressure Feedback* como terminador del actuador de *Force Feedback*.

Motorreductor de corriente continua

Como motor para enrollar al cinturón, se utiliza un motorreductor Pololu con 330rpm con una corriente máxima de 1,5A y un torque de 1,6Kg.cm, como el que se muestra en la Ilustración 6.7

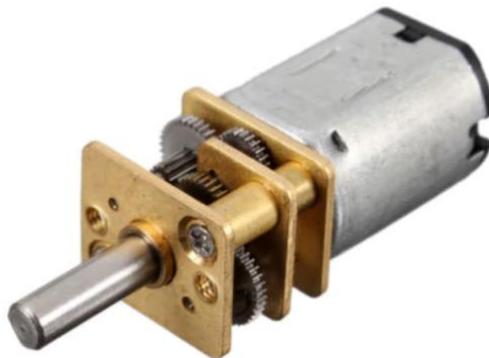


Ilustración 6.7: Motorreductor Pololu

Este es controlado por una señal PWM cuyo *Duty Cycle* es regulado por un lazo de control PID. La realimentación de este sistema se hace con el sensor de presión. De esta forma es posible controla la fuerza aplicada sobre el dedo del usuario

Tambor rotativo

Se muestra en la Ilustración 6.8 el tambor rotativo utilizado. Se acopla al motor aprovechando el chavetero del motorreductor y al girar provoca que el cinturón de tela se enrolle, aplicando así presión sobre el dedo. En sus extremos cuenta con alas que evitan que el cinturón se desalinee.

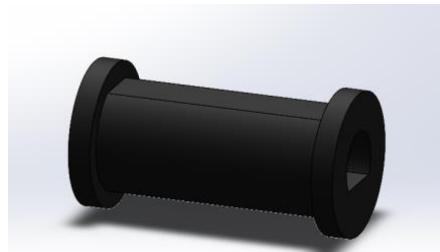


Ilustración 6.8: Tambor rotativo del módulo de Pressure Feedback

Cinturón

Cinturón de tela que transfiere la fuerza realizada por el motor al pad que se encuentra en contacto con el pulpejo. Si bien las fuerzas involucradas no son elevadas, se elige un material que puede resistirlas de forma prolongada.

Protector

El protector evita que el usuario tenga acceso al motor o al cinturón mientras hace uso del guante. Este se sujeta a la base por medio de 2 encastres mecánicos que se muestran en la Ilustración 6.9

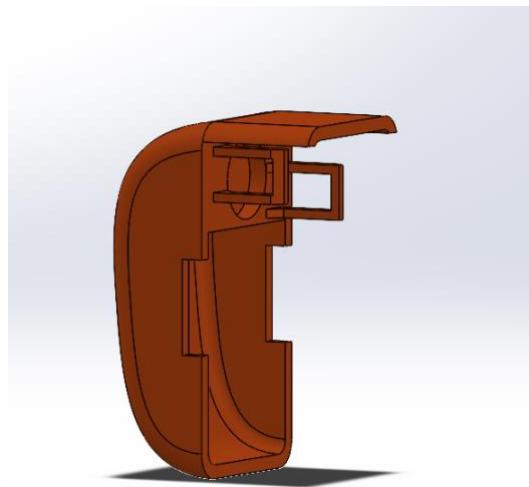


Ilustración 6.9: Protector del módulo de Pressure Feedback

Sensor de presión

Para realimentar este sistema, se utiliza el sensor de presión resistivo FSR-400 (Ilustración 6.10) adherido al pad de contacto de forma que, al aumentar la presión aplicada sobre el dedo, es posible medir una disminución de la resistencia medida en los bornes del sensor. Su resistencia varía desde $1M\Omega$ a $2.5K\Omega$ permitiendo medir fuerzas mínimas de hasta 2gr con una sensibilidad de 0.1N.



Ilustración 6.10: Sensor de presión resistivo FSR-400

Pad de contacto

El pad de contacto protege al sensor y ayuda a lograr una interfaz de contacto cómoda con el pulpejo del dedo. Además, como se observa en la Ilustración 6.11, cuenta con un canal para pasar el cinturón y permitir la correcta transmisión de fuerza.

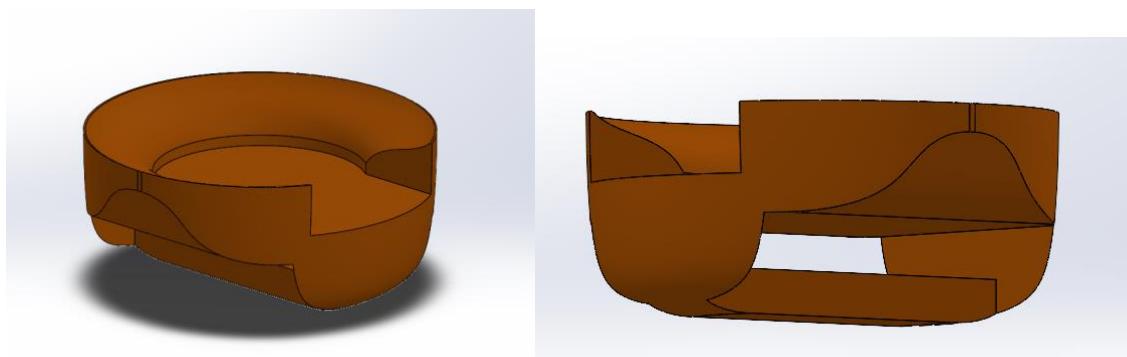


Ilustración 6.11: Pad de contacto el módulo de Pressure Feedback

6.1.2.3. Interfaz circuital

Es posible dividir la interfaz circuital en 2 secciones, la entrada de la señal de control, con su circuito de acondicionamiento y la salida de potencia para la señal PWM que va hacia el motor.

Se puede ver el esquemático de ambas en la Ilustración 11.5.

Para el acondicionamiento de señal de entrada se utiliza un amplificador operacional para convertir la variación de resistencia del sensor en una variación de tensión en el rango de 0V a 2,5V, aprovechando al máximo el rango de linealidad del ADC del ESP32.

Para controlar el motor, se utiliza el IC DRV8837, un puente H de baja tensión con una capacidad de corriente de salida de 1,8A que cumple ampliamente con la corriente necesaria para alimentar al motor.

6.1.3. Vibration Feedback

6.1.3.1. Principio de funcionamiento

El módulo de vibración utiliza motores de rotación excéntrica (ERM) para la actuación, acorde a la elección de la Sección 5.1.2. Se trata de motores de corriente continua que se controlan con una señal PWM y tienen un consumo máximo aproximado de 50mA. El módulo permite al microcontrolador generar formas de onda complejas como rampas, múltiples vibraciones seguidas, vibraciones prolongadas y combinaciones de ellas con mínimo desarrollo de firmware. Esto es logrado mediante un circuito integrado que, comandado por una comunicación serie digital I²C, genera la señal necesaria para controlar el motor. Para disminuir la cantidad de señales de la interfaz con el microcontrolador, la comunicación de los ocho actuadores se realiza a través del mismo bus, para lo cual se debe usar un demultiplexor I²C debido a colisiones en el direccionamiento.

6.1.3.2. Diseño del módulo

El actuador elegido es el VC0720B001F de la Ilustración 6.12, un motor ERM de 10000 RPM y tensión nominal 3V_{DC}. La elección se debe a que presenta pads para que se le suelden cables, a diferencia de otros motores del mismo tipo que vienen con cables soldados y de un largo inferior al que se necesita en esta aplicación. De esta manera, se tiene flexibilidad a la hora del diseño mecánico para conectar el actuador al módulo principal de la forma más conveniente. El control está a cargo de la interfaz NB-TFV de la Ilustración 6.1 y se realiza mediante una señal PWM de amplitud 3V y frecuencia 20.5kHz.



Ilustración 6.12: Actuador VC0720B001F

Para colocar los actuadores en el guante, se colocan de una forma los que van en los dedos y de otra para los que van en la palma de la mano. Para los dedos se utiliza la pieza de la Ilustración 6.13 en la que encaja el motor y se une al guante con un elástico, lo cual evita que tenga que ser ajustado para cada tamaño de dedo. Por otro lado, para la palma de la mano se agregan bolsillos al guante, abiertos por un lado para que salgan los cables.

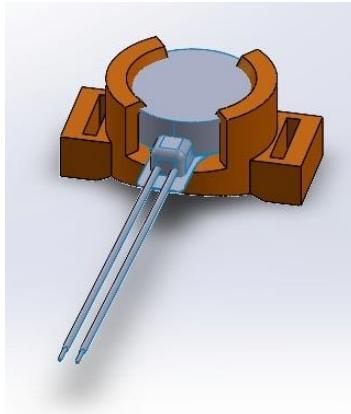


Ilustración 6.13: Pieza para los actuadores de los dedos

6.1.3.3. Interfaz circuital

Descripción general

Para el control se utiliza el circuito integrado DRV2605L de Texas Instruments, cuyo circuito se muestra en la Ilustración 11.3 del Anexo. Este circuito integrado se comunica por un bus I²C con el microcontrolador y provee una librería con más de 100 efectos, los cuales se listan en la Ilustración 11.30 del Anexo. De esta manera, se elimina la necesidad de programar formas de onda en el microcontrolador. De todas formas, se lo puede utilizar en un modo de vibración continua con amplitud configurable, con lo que si se desea se pueden hacer más efectos que los provistos.

Por último, el driver es capaz de aplicar automáticamente arranque y frenado activos para romper la inercia del motor y reducir los tiempos de respuesta. El arranque activo consiste en aplicar una tensión mayor a la nominal por un corto período de tiempo y el frenado aplica tensión con polaridad invertida.

Dado que la dirección del circuito integrado no es configurable, no es posible controlar los drivers de todos los actuadores por un mismo bus, por lo cual se utiliza el switch I²C TCA9548A de Texas Instruments. El diseño del circuito se muestra en la Ilustración 11.2 del Anexo.

Selección de componentes

Se debe elegir el valor de las resistencias de *pull-up* de las interfaces I²C entre el TCA9548A y los DRV2605L. La resistencia máxima viene dada por el tiempo de *rise* requerido y la capacidad del bus. La capacidad máxima del bus viene dada en la especificación I²C, es de 400pF. En esta aplicación las conexiones son cortas, por lo que no se espera que la capacidad sea alta, se elige un valor de 200pF para diseñar. El máximo tiempo de *rise* depende del modo de I²C que se esté utilizando. Si bien probablemente se use el *Standard Mode*, con $S_{CL} = 100kHz$, se busca que el hardware no limite la frecuencia que se puede utilizar, por lo que se diseña para el *Fast Mode*, con $S_{CL} = 400kHz$. El máximo tiempo de *rise* admitido para la señal en este modo es de 300ns según la especificación, como se muestra en la Ilustración 6.14 [9].

Parameter		Standard Mode (Max)	Fast Mode (Max)	Fast Mode Plus (Max)	Unit
t_r	Rise time of both SDA and SCL signals	1000	300	120	ns
C_b	Capacitive load for each bus line	400	400	550	pF
V_{OL}	Low-level output voltage (at 3 mA current sink, $V_{CC} > 2 V$)	0.4	0.4	0.4	V
	Low-level output voltage (at 2 mA current sink, $V_{CC} \leq 2 V$)	–	$0.2 \times V_{CC}$	$0.2 \times V_{CC}$	V

Ilustración 6.14: Requisitos para distintos parámetros de la especificación I²C

Por lo tanto, se tiene:

$$R_{max} = \frac{t_r}{(0.8473 \cdot C_b)} = 1770\Omega$$

La resistencia mínima depende de I_{OL} del dispositivo que entrega la corriente. En esta aplicación dichos dispositivos son el microcontrolador y el IC TCA9548A, cuya I_{OL} mínima es de 3mA. Luego, usando también el valor de la especificación de V_{OL} , calculamos:

$$R_{min} = \frac{V_{CC} - V_{OLmax}}{I_{OL}} = 966\Omega$$

El valor medio entre ambas resistencias $\frac{R_{min}+R_{max}}{2}$ es de $1.4k\Omega$, con lo que se elige el valor $1.2k\Omega$ para estar más cerca del límite por corriente que por velocidad, posicionándose a favor de la velocidad en la relación de compromiso con la potencia, dado que el aumento de consumo en estas magnitudes de corriente es despreciable frente al consumo total del módulo y del total del sistema.

6.1.4. Force Feedback

6.1.4.1. Principio de funcionamiento

Para explicar el principio de funcionamiento del módulo de *Force Feedback*, se divide el mismo en 3 partes funcionales principales, que trabajan en conjunto para cumplir con los requerimientos planteados.

La primera es la restricción de movimiento del dedo. Este submódulo está formado por un servomotor, un carrete y un hilo. Cuando se requiere restringir el movimiento del dedo del usuario, el brazo que gira solidariamente al eje del servomotor frena mecánicamente el giro del carrete por medio de un tornillo colocado en la cara frontal de este. Finalmente, el hilo que se encuentra enrollado en el carrete se conecta a la primera falange del dedo del usuario, con guías de por medio, lo que restringe el movimiento del dedo en sentido de cierre de la mano (no en la apertura).

La segunda parte funcional del módulo de *Force Feedback* es la encargada del retroceso del hilo en el carrete. Para lograrlo, se utiliza un resorte motor, fijado en el centro del carrete. Este resorte, se comprime al extender el hilo, aplicando una fuerza contraria al movimiento del dedo. Dicha fuerza deberá ser suficiente como para hacer retornar el hilo extendido fuera del carrete, pero suficientemente leve para no perder inmersión.

La tercera es un potenciómetro, que funciona como eje del carrete y también como sensor de flexión/extensión del dedo, moviéndose solidariamente al carrete y permitiendo obtener así una medición aproximada del largo de hilo fuera del submódulo.

6.1.4.2. Diseño del módulo

Se detallan a continuación los componentes más importantes para el funcionamiento del módulo de *Force Feedback*.

Base de fijación a la mano

Para el correcto funcionamiento del módulo de *Force Feedback* es necesario que, cada uno de los submódulos, compuesto por los componentes detallados antes, se encuentre correctamente fijado a la mano. De esta forma, se asegura que la fuerza realizada por el servo sobre el carrete es transmitida en su totalidad al dedo.

Se diseña entonces, una base que se ajusta a la mano como la que se observa en la Ilustración 6.15.

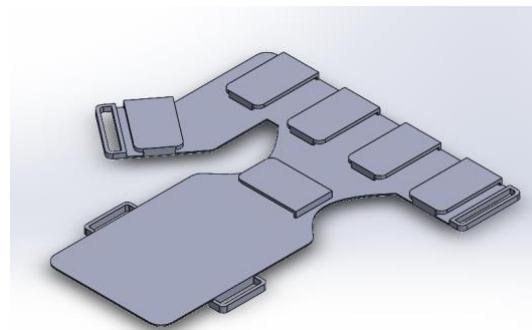


Ilustración 6.15: Base de fijación a la mano para módulo de Force Feedback.

Es posible regular el ajuste para diferentes tamaños de mano por medio de una cinta de velcro que atraviesa las 2 ranuras laterales, que se observan en la Ilustración. Además, para que su utilización sea cómoda para el usuario, se adhiere una capa de espuma de polietileno en la parte inferior de la base.

En adición, cuenta con una base para poder adherir la NerveBox.

Base de montaje del servo

Se muestra en la Ilustración 6.16, la base en la que se montan tanto el servo como el carrete y el potenciómetro. Esta, a su vez, se monta sobre la base de fijación a la mano deslizándose sobre las guías en la cara superior.

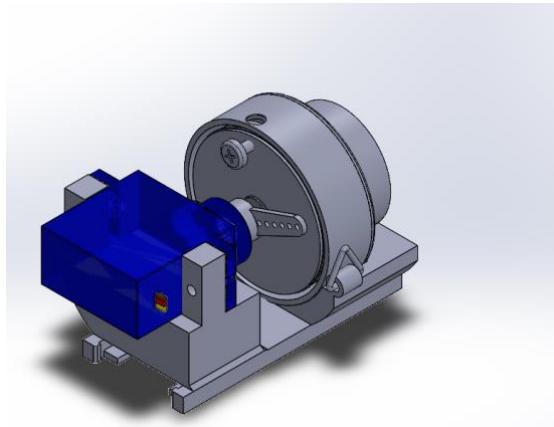


Ilustración 6.16: Base de montaje del servo para el módulo de Force Feedback.

Como se puede observar en la ilustración, la base de montaje, además de cumplir la función de fijación para los componentes del submódulo, cuenta en su lateral con una guía para el hilo. Es necesaria debido a que el hilo sale del carrete desde su lateral, y el movimiento del hilo debe acompañar a la flexión/extensión del dedo, es decir, de forma perpendicular a como sale del carrete, con lo que la fuerza del rozamiento sería considerable si no se incluyera esta guía en el diseño.

Servomotor

Como muestra la Ilustración 6.16, se monta el servomotor en su respectiva base con uno de los tornillos con los que viene empaquetado. Se utiliza además el brazo, también incluido con el servo, para ejercer fuerza sobre el carrete.

El motor seleccionado es el Tower Pro SG90 9G de la Ilustración 6.17, un servomotor de baja velocidad, pero con un torque de 2.5 Kg.cm. Este valor resulta correcto, junto con una correcta elección de radio de carrete, para cumplir con los requerimientos acerca de la fuerza a realizar sobre el dedo de 10N.



Ilustración 6.17: Servomotor Tower Pro SG90.

Además, debido a su construcción en plástico, el peso del actuador completo es de 14 gr. Es importante remarcar el peso de este componente dado que uno de los requerimientos (REQ-03) fija un peso máximo de todo el producto.

Por último, la tensión nominal de este motor es de 5 V_{DC} y es posible controlar la posición angular del mismo por medio de una señal PWM, en uno de sus terminales.

Carrete

Se puede ver en la Ilustración 6.18 el carrete armado y su vista explotada. Se detalla a continuación cual es la función de cada uno de sus componentes.

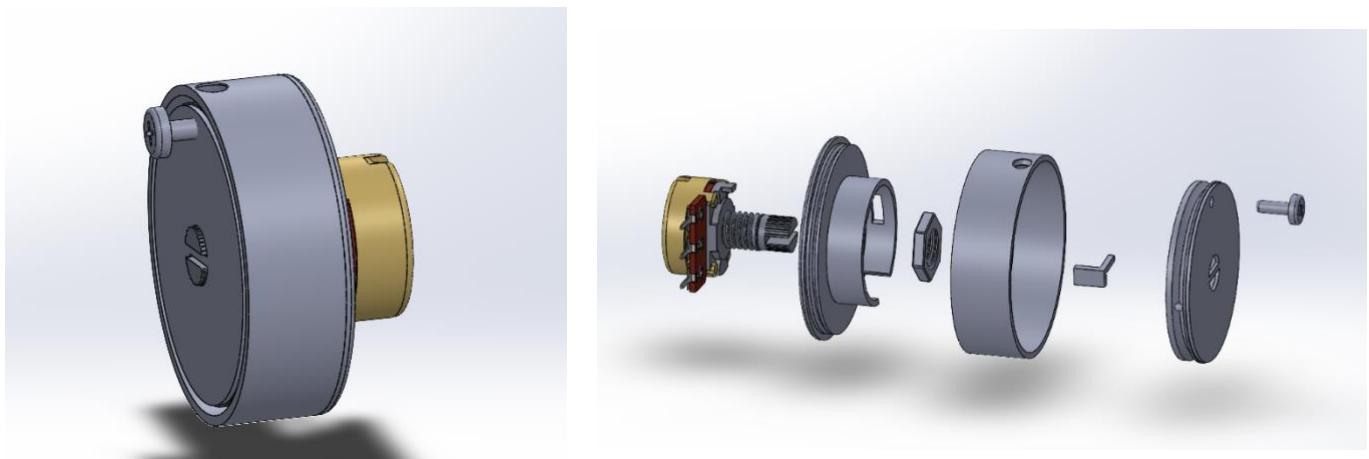


Ilustración 6.18: Carrete ensamblado y su vista explotada para módulo de Force Feedback.

De izquierda a derecha se tiene primero al potenciómetro. Se utiliza un potenciómetro de $10\text{ K}\Omega$ que, como se detalló anteriormente, cumple las funciones de sensado de posición para la obtención de un grado de libertad del dedo y la función de eje mecánico, que mantiene armado al carrete. Para seleccionar este componente, se tiene en cuenta que el rango de movimiento del tornillo del carrete, debido a la naturaleza del movimiento del dedo, no es el completo de 270 grados que permite el potenciómetro, por lo que el rango de la tensión de salida de este, utilizado como divisor de tensión, no varía de 0 a 5V (la tensión a la que se alimenta) sino de 0 a 3V aproximadamente.

Continuando con los componentes del carrete, se tiene al acople entre el potenciómetro y el resorte motor, como el que se ve en la Ilustración 6.19.



Ilustración 6.19: Resorte motor de módulo de Force Feedback

Luego, se observa el cobertor del carrete, que se utiliza principalmente para guiar el hilo hacia el carrete, de forma que este se enrolle de correctamente.

La siguiente pieza es simplemente para poder acoplar correctamente el resorte al eje del potenciómetro.

Por último, se observa el carrete donde efectivamente se enrolla el hilo y el tornillo utilizado como tope para el brazo del servomotor.

Tensor de hilo

La tensión del hilo es fundamental para que la fuerza aplicada por el motor sea transmitida al dedo. Es por ello por lo que se diseña un tensor que permita mantenerla para distintos tamaños de mano. Se muestra en la Ilustración 6.20 el tensor de hilo diseñado.

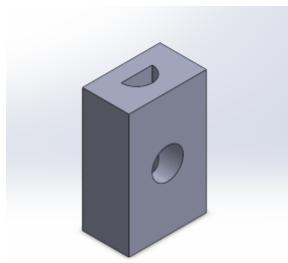


Ilustración 6.20: Tensor de hilo para módulo de Force Feedback.

6.1.4.3. Interfaz circuital

Se puede ver en la Ilustración 11.17 del Anexo, el esquemático de la interfaz para este módulo.

Dado que cada servomotor tiene su propio control de posición, no hay una interfaz de control dedicada para ello. Sin embargo, cada uno de los actuadores requiere una señal PWM, provenientes del expansor PCA9685BS controlado por I²C, como fue explicado en la Sección 6.1.1.2.

Se agrega, además, para cada uno de los potenciómetros utilizados, un *buffer* seguidor de tensión implementado con un amplificador operacional. Esto se hace para evitar cargar el divisor de tensión realizado con el potenciómetro, con el circuito que hace la interfaz con el ADC, en este caso, un filtro *antialias*.

6.1.5. Finger Tracking

6.1.5.1. Principio de funcionamiento

Esta sección dedicada al *Finger Tracking* explicará las decisiones de diseño tomadas, particularmente, para los *flex sensors* utilizados como herramienta para medir un grado de libertad del movimiento de los dedos de la mano. Cabe recordar que este proyecto tiene por requerimiento la medición de dos grados de libertad por dedo, para extensión/flexión, y un grado de libertad adicional para el pulgar, en lo que respecta a aducción/abducción (ver especificación INT-IMM-06). Un grado de libertad de extensión/flexión, por dedo, está cubierto por sensores potenciométricos que forman parte del módulo de *Force Feedback*, por razones constructivas, y su diseño está también explicado en la sección **Error! Reference source not found..**

Como se adelantaba en la sección 5.1.5, el funcionamiento de los *flex sensors* está basado en una variación de la resistencia eléctrica del componente, ante la deformación mecánica producto de la acción de flexionarlo. En su rango de funcionamiento, los *flex sensors* tienen una respuesta que puede considerarse lineal, y la variación de la resistencia va desde 30kΩ a 120kΩ aproximadamente. Es deseable que el circuito de acondicionamiento de la señal, que sea utilizado para la lectura de estas variaciones por parte del microcontrolador, mantenga esta característica de linealidad.

6.1.5.2. Diseño del módulo

La Ilustración 5.9 de la factibilidad tecnológica hace mención a la disposición elegida para colocar los *flex sensors*, y que estos sean capaces de medir apropiadamente un grado de libertad. Mecánicamente, es importante el método de sujeción elegido para permitir que los sensores sigan de la forma más fiel a los movimientos de los dedos. Al mismo tiempo, los sensores deben ser colocados en zonas densamente cargadas de componentes de otros módulos del guante, por lo cual la sujeción debe ser lo menos invasiva posible.

Con las consideraciones descriptas, se diseñaron 3 piezas que deben ser pegadas al guante, las cuales pueden verse en las Ilustraciones Ilustración 6.21, Ilustración 6.22 y Ilustración 6.23. De la primera de las tres se utilizan dos por dedo para extensión/flexión, y se coloca una en la base del *flex sensor*, y una cercana al extremo opuesto, haciendo pasar al sensor por la ranura horizontal; el *flex sensor* se pega al soporte de la base, para limitar su movimiento en la dirección de los soportes. Del segundo soporte se utiliza uno por dedo para la extensión/flexión, y se coloca a la altura de las articulaciones metacarpo-falángicas (nudillos) de cada dedo; la particularidad de estas piezas es que incorporan una guía para los hilos que forman parte del sistema de *Force Feedback*. Finalmente, el último tipo de soporte es utilizado para la

aducción/abducción del dedo pulgar, utilizándose dos de ellos para este dedo, uno a cada extremo del *flex sensor*; ambos soportes van pegados al guante y al sensor.

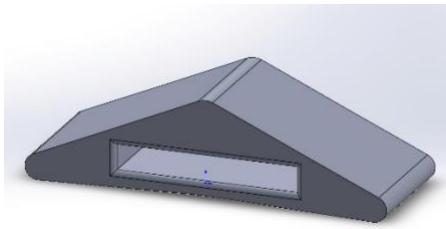


Ilustración 6.21: Sujeción flex sensors extensión/flexión.

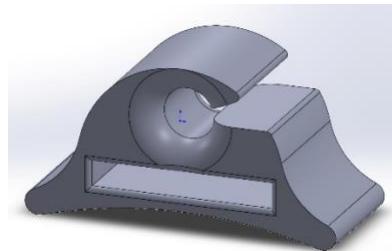


Ilustración 6.22: Sujeción flex sensors extensión/flexión con guía para hilo Force Feedback.

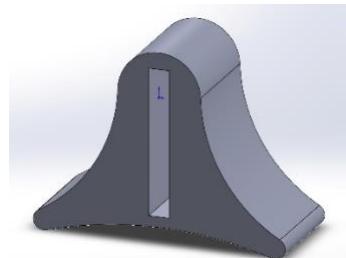


Ilustración 6.23: Sujeción flex sensors aducción/abducción del pulgar.

6.1.5.3. Interfaz circuital

Como se dijo anteriormente, es importante para el circuito de acondicionamiento mantener la linealidad de los sensores. Con este propósito en mente, se diseñó el circuito de las Ilustraciones Ilustración 11.23 y Ilustración 11.24, los cuales solo difieren en un valor de una resistencia. Estos circuitos podrían ser resumidos como una fuente de corriente basada en un amplificador operacional, con ganancia de corriente lograda por un transistor PNP, cuyo valor puede ser calibrado por la resistencia R_{150} y R_{180} , respectivamente. La corriente suministrada circula por el *flex sensor*, cuyas variaciones en resistencia eléctrica se traducen en variaciones de caída de tensión sobre ella. Esta caída de tensión, tras pasar por un filtro pasa-bajos de acondicionamiento de señal, es leída por el microcontrolador.

En los párrafos subsiguientes se detallará la elección de los componentes que conforman el módulo.

Flex Sensor



Fabricante	Spectra Symbol	Spectra Symbol
Número de parte	FS-L-095-103-ST	FS-L-0055-253-ST
Dimensiones	6.45 x 73.66 x 0.43mm	6.45 x 112.24x 0.43mm
Rango resistivo	25kΩ a 125kΩ	10kΩ a >20kΩ
Temperaturas de func.	-35 a 80°C	-35 a 80°C
Vida útil	>1 millón de dobleces	>1 millón de dobleces

Precio ⁵	<u>U\$S 6.00</u>	<u>U\$S 12.82</u>
Accesibilidad	<i>Se consigue localmente</i>	<i>Se consigue localmente</i>

Tabla 6.5: Comparación cualitativa de flex sensors

Se decide utilizar el *flex sensor* de 73.66mm de largo (el más chico) por adaptarse mejor a los requerimientos dimensionales, y por conllevar, además, un costo de la mitad de la otra alternativa.

Amplificador operacional

Para el circuito de acondicionamiento de la señal del sensor, será necesario utilizar un amplificador operacional. La señal analógica es de baja frecuencia, por ende, no hay un requerimiento restrictivo sobre el ancho de banda ni el producto ganancia por ancho de banda para el amplificador. Entre las alternativas de bajo costo disponibles comercialmente, se evalúan las siguientes.

	LMV652MMX/NOPB	MCP6001	LM358	AS358
Fabricante	Texas Instruments	Microchip Technology	On Semiconductors	Diodes Incorporated
Número de parte	LMV652MMX/NOPB	MCP6001T-I/OT	LM358EDR2G	AS358MTR-G1
Precio	U\$S 1.02	U\$S 0,29	U\$S 0,38	U\$S 0,39
Cantidad de amplificadores	2	1	2	2
¿Es rail-to-rail?	Sí	Sí	No	No
Producto ganancia por ancho de banda	12 MHz	1 MHz	Entre 1 MHz y 1,2 MHz	Entre 1 MHz y 1,2 MHz
Consumo	118 µA	100 µA	800 µA	700 µA

Tabla 6.6: Elección de amplificador operacional para circuito de acondicionamiento de flex sensors.

En primer lugar, el MCP6001 tiene un precio menor a las otras alternativas, pero es sólo un amplificador. No obstante, si se duplicara el precio considerando que son dos amplificadores, esta opción resulta más económica dado que en las otras habría que usar una protección adicional con diodos Schottky. Esto es porque, al no ser amplificador *rail-to-rail*, para poder usar todo el rango de tensión deseado se debe alimentar con mayor tensión. Por otro lado, el MCP6001 tiene un menor consumo de corriente. Por ende, se escoge el **MCP6001T-I/OT** de **Microchip Technology**.

Por razones de faltantes en la disponibilidad de componentes integrados, el prototipo será llevado a cabo con la alternativa **LMV652MMX/NOPB** de **Texas Instruments**, compatible pin a pin con el componente elegido como idóneo.

Fuentes de corriente

La señal de salida del circuito, denominada $v_o(t)$, está dada por:

$$v_o(t) = I \cdot R_{FS}(t) = \frac{\Delta V_{ref}}{R_{150}} \cdot R_{FS}(t) = \frac{V_{cc} - V_{ref}}{R_{150}} \cdot R_{FS}(t)$$

Donde $\frac{V_{cc} - V_{ref}}{R_{150}}$ determina la corriente de referencia, siendo $V_{CC} = 3,3V$ y $V_{ref} = 2,5V$.

⁵ Los precios se tomaron considerando compras con descuento por cantidad (condiciones reales de producción).

Experimentalmente se determinó que para el rango de movimiento de extensión/flexión de los nudillos, la resistencia de los *flex sensors* acoplada mecánicamente a esta articulación, varía entre valores cercanos a $20\text{ k}\Omega$ y $70\text{ k}\Omega$. El valor de resistencia para R_{150} , de la serie E12, que mejor se adapta a un rango de tensión de salida entre $0,5\text{V}$ y $2,5\text{V}$ (rango de lectura lineal del ADC del ESP32), es de $R_{150} = 27\text{k}\Omega$. Las variaciones no se presentan de igual manera para cada dedo, y eso implicará distintos rangos de la tensión medida, los cuales serán ajustados luego por software.

El *flex sensor* que se empleará para la aducción/abducción del pulgar, será el único con otro valor de corriente, dado su mayor rango de movimiento. Siendo que la resistencia varía entre a $30\text{ k}\Omega$ y $120\text{ k}\Omega$, se escoge $R_{180} = 47\text{k}\Omega$.

6.1.6. Subsistema de Alimentación

Este módulo se encarga de proveer energía a todos los módulos descriptos en las secciones de Hardware anteriores, tanto desde la batería como desde una fuente externa. Está ligado a todas las especificaciones de alimentación INT-PWR-01 a INT-PWR-06, de seguridad RAM-SEG-02 y RAM-SEG-03, de *performance* PER-01 y PER-03, y adicionalmente FUN-GEN-01, INT-DCA-07, INT-PRV-02 e INT-SDK-05.

Para cumplir con las especificaciones de diseño y proveer las funcionalidades requeridas por el resto de los módulos, se tiene la arquitectura presentada en la Ilustración 6.24. Tiene como entradas externas tanto la batería como la fuente, cuya energía pasa por los distintos bloques para obtener tanto las tensiones de alimentación del sistema, como la información adicional requerida para su funcionamiento.

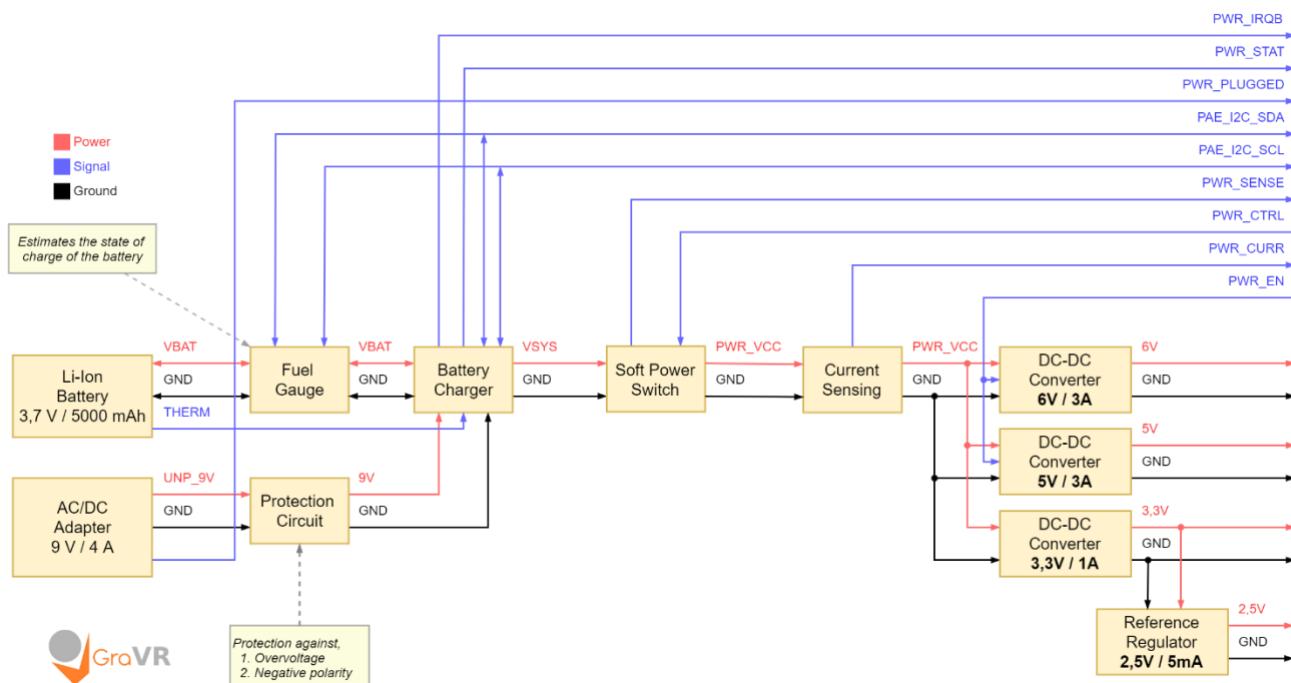


Ilustración 6.24: Arquitectura del subsistema de alimentación

A continuación, se describe brevemente cada bloque, para luego explicarlos en detalle en las siguientes secciones:

- **Fuel Gauge:** Se encarga de la medición del estado de carga de la batería, la cual comunica a través del bus *PAE_I2C*, las señales *PAE_I2C_SDA* y *PAE_I2C_SCL*. Además, provee la medición de la tensión de la batería.
 - **Battery Charger:** Su función es cargar la batería, permitiendo el uso normal del dispositivo durante la carga. Monitorea la temperatura de la batería a través de la señal *THERM* y se comunica por el bus *PAE_I2C* y la señal *PWR_IRQB*. Además, la señal *PWR_STAT* sirve para comunicar mediante una indicación luminosa el estado del proceso de carga.
 - **Protection Circuit:** Protege al dispositivo de la tensión proveniente de la fuente externa.
 - **Soft Power Switch:** Permite el encendido del sistema con un pulsador cuyo estado se refleja en la señal *PWR_SENSE* y el apagado comandado por el microcontrolador a través de la señal *PWR_CTRL*.
 - **Current Sensing:** Medición del consumo del sistema a través de la señal analógica *PWR_CURR*.

- **DC-DC Converter 6V:** Tensión de alimentación para el módulo de *Pressure Feedback*. Señal de entrada *PWR_EN* permite habilitarlo o deshabilitarlo.
- **DC-DC Converter 5V:** Tensión de alimentación para el módulo de *Force Feedback*. Señal de entrada *PWR_EN* permite habilitarlo o deshabilitarlo.
- **DC-DC Converter 3,3V:** Tensión de alimentación para el módulo de *Vibration Feedback*, el microcontrolador y el resto del sistema.
- **Reference Regulator 2,5V:** Tensión de referencia para distintos circuitos de medición y conversión analógica a digital.

Además, la señal *PWR_PLUGGED* del conector Jack indica si hay una conexión de la fuente externa.

El esquemático de nivel superior del subsistema de alimentación se muestra en la Ilustración 11.6 del Anexo.

6.1.6.1. Estimación del consumo del sistema

Previo a la elección de la batería y el diseño detallado del subsistema de alimentación es de vital importancia conocer cómo es el consumo del sistema completo. En la Tabla 6.7 se muestra el consumo por actuador de los distintos módulos del sistema, junto con su tensión de alimentación y la cantidad de actuadores que usa. Como el mismo varía en el tiempo, se presentan sus valores pico y promedio. No se incluyen los módulos cuyo consumo es bajo, como es el caso del *finger-tracking*.

Módulo	Vcc	Consumo máximo por actuador	Consumo medio por actuador (*)	Cantidad de actuadores
Force Feedback	5V	500mA	200mA	5
TF Presión	6V	250mA	50mA	5
TF Vibración	3.3V	50mA	20mA	8

Tabla 6.7: Consumo de cada módulo por actuador. (*) Consumo promedio estimado, depende de la aplicación.

El consumo medio depende fuertemente de la aplicación, y de él dependerá la autonomía. Para estimarlo se considera una aplicación de prueba en la que se restringe el movimiento de los dedos el 50% del tiempo, se actúa el módulo de presión poco más de un 10% del tiempo y la vibración actúa a poco menos de la mitad de la intensidad. Este puede ser el caso de un juego de disparos en el que se quiera disparar la mitad del tiempo.

En la Tabla 6.8 se obtiene el consumo total de cada módulo multiplicando por la cantidad de actuadores.

Módulo	Vcc	Consumo máximo	Consumo medio (*)
Force Feedback	5V	2.5A	1A
TF Presión	6V	1.25A	0.25A
TF Vibración	3.3V	0.4A	0.16A

Tabla 6.8: Consumo total de cada módulo. (*) Consumo promedio estimado, depende de la aplicación.

Por último, se tiene el consumo adicional del resto del sistema, el cual se muestra en la Tabla 6.9 y está compuesto por el MCU con comunicación Bluetooth y un margen para el resto de los consumos. Estos consumos, a diferencia de los módulos anteriores, no presentan variaciones significativas, sino que son aproximadamente constantes en el tiempo.

Módulo	Vcc	Consumo
MCU	3.3V	0.25A
Otros	3.3V	0.15A

Tabla 6.9: Consumo del MCU y el resto del sistema

Con la información de las últimas dos tablas se puede conocer la corriente que deben ser capaces de proveer los distintos conversores de corriente continua.

Luego, se especifica el consumo de potencia del sistema completo. Para ello hay dos etapas, en primer lugar, la potencia que tienen que ser capaces de entregar los conversores que provean las distintas tensiones de trabajo, y luego la potencia

que debe proveer la batería o fuente de alimentación, la cual es mayor debido las pérdidas de los conversores. En la Tabla 6.10 se muestran dichas potencias, considerando una eficiencia del 80% para los conversores DC-DC.

Consumo	Potencia máxima (W)	Potencia media (W) (*)
Conversores	22.64	8.35
Fuente	28.30	10.44

Tabla 6.10: Consumo total del sistema a la salida y a la entrada de la conversión de tensión (*) Consumo promedio estimado.

A partir del consumo de potencia de la fuente, se puede conocer la necesidad de corriente de la batería, la cual depende de su tensión nominal.

6.1.6.2. Elección de la batería

Especificaciones

La batería tiene asociadas las especificaciones INT-PWR-01, PER-01 y PER-03. Para cumplir con la autonomía de 1 hora y media, como el consumo medio es de aproximadamente 10.5W, se precisa que la batería almacene 15.75Wh de energía. Además, debe ser de un tamaño reducido, tal que entre en un gabinete con la electrónica ubicado en la mano. Para ello se la restringe a un espacio de 80x35x35mm. Con esto se completan las especificaciones de la batería de la Tabla 6.11.

ID	Especificación
E-PSS-BAT-01	Debe ser de bajo costo.
E-PSS-BAT-02	Debe soportar picos de hasta 30W.
E-PSS-BAT-03	Debe entregar 15.75Wh de energía.
E-PSS-BAT-04	Debe entrar en un espacio de 80 x 35 x 35mm.
E-PSS-BAT-05	Debe tener un peso igual o inferior a 100 g.
E-PSS-BAT-06	Debe tener una vida útil mayor a 125 ciclos.

Tabla 6.11: Especificaciones de la batería

Descripción general

A la hora de elegir la batería para las especificaciones dadas se deben tener muchos factores en cuenta, siendo los principales su tensión nominal, capacidad y máxima corriente de descarga, las cuales están muy ligadas a la composición química [10]. Se debe elegir la composición correcta para esta aplicación. De las baterías secundarias, se descarta Plomo Ácido por su baja densidad de energía y Níquel-Cadmio por la toxicidad del Cadmio. Se consideran baterías de Li-Ion y de Ni-MH. En general se prefieren las baterías de iones de Litio debido a que tienen una mayor densidad de energía. Sin embargo, las de Ni-MH son capaces de descargarse a una mayor velocidad, es decir, de entregar más corriente, lo cual es necesario para este producto.

La capacidad y máxima corriente de descarga dependen de la tensión nominal de la batería, a mayor tensión se precisará menos corriente y capacidad. En la Tabla 6.12 se muestra la corriente máxima y capacidad real requeridas para distintas tensiones nominales, de distintas configuraciones típicas de baterías de iones de Litio. Para el cálculo de la descarga máxima se utiliza el valor pico de potencia a entregar y para la capacidad la energía almacenada requerida.

Configuración	Tensión nominal	Descarga máxima	Capacidad real
LiFePO ₄ 1S	3.2V	8.8A	4.9Ah

Li-Ion 1S	3.7V	7.6A	4.2Ah
LiFePO4 2S	6.6V	4.3A	2.4Ah
Li-Ion 2S	7.4V	3.8A	2.1Ah

Tabla 6.12: Descarga máxima y capacidad real requeridas para distintas configuraciones de Li-ion

Sin embargo, la capacidad real de una batería depende de cómo se descargue la misma y es siempre menor a su valor nominal. Por lo tanto, para la elección se considera que la capacidad real es un 85% de su valor nominal, con lo que en la Tabla 6.13 se muestran la descarga máxima y capacidad nominal necesarias.

Configuración	Tensión nominal	Descarga máxima	Capacidad nominal
LiFePO4 1S	3.2V	8.8A	5.8Ah
Li-Ion 1S	3.7V	7.6A	5.0Ah
LiFePO4 2S	6.6V	4.3A	2.8Ah
Li-Ion 2S	7.4V	3.8A	2.5Ah

Tabla 6.13: Descarga máxima y capacidad nominal requeridas para distintas configuraciones de Li-ion

Se descarta NiMH por su baja densidad energética, todas las baterías que se encontraron que cumplen la necesidad de capacidad y descarga son muy grandes y pesadas. En la Tabla 6.14 se muestran las mejores opciones encontradas, sin embargo algunas no cumplen con la capacidad requerida, su elección implicaría reducir la autonomía del dispositivo.



Fabricante	Turnigy Nano-Tech	Efest	Fénix
Composición	Lipo	Li-MN	Li-Ion
Peso	92g	70g	50g
Forma y Dimensiones	64 x 50 x 14 mm	21700: 70 x 21 mm	18650: 69 x 18.6 mm
Configuración	2S1P	1S1P	1S1P Protegida
Capacidad nominal	1.8Ah	5Ah	3.5Ah
Máxima descarga	12C constante	10A	5A
Tensión nominal	7.4V	3.7V	3.6V
Precio (U\$S)	\$11.37	\$6.5	\$25.95
Accesibilidad	Sólo se compra al fabricante	Alta	Alta

Tabla 6.14: Comparación cualitativa de baterías

En primer lugar, se descarta la batería Fénix por ser de un costo muy elevado. Siendo esta la única opción protegida, al usar cualquiera de las demás baterías se debe utilizar una protección externa. Luego se elige la batería Efest por sobre la

Turnigy porque la supera en todos los aspectos. Además de su menor costo, peso y volumen, puede almacenar más energía, es más accesible, y cumple con la especificación de autonomía.

Una ventaja adicional de la batería elegida es que tiene versiones del mismo tamaño de menos capacidad que al menos permiten una autonomía de 1 hora y se consiguen en la Argentina, lo cual es de gran importancia para la fabricación del prototipo, por la dificultad que acarrea la importación de baterías.

En la Ilustración 6.25 se listan las características de interés a la hora de diseñar con la batería seleccionada. Además, el fabricante especifica una vida útil de 300 ciclos que varía fuertemente dependiente del uso que se le dé.

Model:	IMR 21700 V1
Rate Capacity:	5000mAh
Nominal Voltage:	3.7V
Voltage of Discharging:	2.5V
Max Charging Current:	4A
Standard Charge:	2A
Discharging Current:	10A
Charging Temperature Range:	0°C - 45°C
Discharging Temperature Range:	-20°C - 75°C
Cell Size:	21(±0.2)mm x 70(±0.2)mm

Ilustración 6.25: Características de la batería Efest IMR 21700 V1

Respecto de la vida útil, si bien se tiene mucho margen para cumplir con los 125 ciclos especificados, se limita el uso del dispositivo hasta una tensión mínima de 3V. En caso de detectar que la tensión es menor, el dispositivo no deberá permitir el uso del guante. Al limitar la mínima tensión, se disminuye la capacidad, dado que el fabricante la especifica para una descarga hasta 2,5V. Para saber cuánto disminuye se recurre a mediciones realizadas por terceros disponibles en internet, dado que el fabricante no provee curvas de descarga. Se observa que para una descarga a un 85% de la máxima corriente, la capacidad disminuye un 20%. Esta diferencia fue cubierta a la hora de considerar que la capacidad real de una batería es menor a la nominal, por lo que no se incumple la especificación de autonomía.

Por último, como la corriente descarga máxima de la batería es de 10A, para la mínima tensión de 3V se podrán entregar picos de hasta 30W en el peor caso, lo cual tiene margen respecto de los picos de 27W estimados.

Selección de la fuente de alimentación externa

Conociendo el consumo máximo del sistema y las condiciones de carga de la batería, se pueden dimensionar las características de la fuente de alimentación externa, que debe cumplir las especificaciones INT-PWR-02 e INT-PWR-04, por las que debe tener un conector Jack-DC y estar dimensionado para alimentar el dispositivo y cargar la batería al mismo tiempo.

Se busca entonces que la fuente pueda entregar 27W pico al dispositivo, y que al mismo tiempo pueda entregar 2A para cargar la batería hasta 4V, donde finaliza el tramo de corriente constante de la carga y comienza el tramo de tensión constante, en el ciclo CC-CV típico de carga de Li-Ion [11]. Por lo tanto, la potencia que debe ser capaz de entregar la fuente es de:

$$P_o = 27W + 4V \cdot 2A = 35W$$

Las tensiones típicas para este tipo de fuentes son 5V, 9V, 12V y superiores, y suelen ser capaces de entregar 5A como máximo típicamente. Se busca que la tensión sea lo más baja posible para que el conversor *Buck* utilizado para bajar el nivel de tensión trabaje de manera más eficiente. Entonces, como para 5V la corriente requerida es muy alta, se elige una fuente de 9V, que debe ser capaz de entregar 3.9A para la potencia calculada, se especifican 4A para tener cierto margen.

En conclusión, la fuente de alimentación externa debe ser de **9V, 4A** y con salida **Jack-DC**.

6.1.6.3. Medición del estado de carga de la batería

Especificaciones

Para cumplir con las especificaciones INT-SDK-05, INT-PRV-02 e INT-DCA-07, es necesario monitorear el estado de carga de la batería, siguiendo las especificaciones de la Tabla 6.15.

ID	Especificación
E-PSS-SCM-01	El módulo debe informar el estado de carga de la batería Li-Ion.
E-PSS-SCM-02	El módulo debe ser compatible con una máxima corriente de descarga de 10A.
E-PSS-SCM-03	El módulo debe informar la tensión de la batería.

Tabla 6.15: Especificaciones para el monitoreo del estado de la carga

Descripción general

Se utiliza el circuito integrado **BQ27541** de Texas Instruments, que provee una interfaz I²C para la comunicación con el microcontrolador. Su diagrama de esquemático se muestra en la Ilustración 11.9 del Anexo. Utiliza una resistencia de medición de 5mΩ a 20mΩ para contar cargas, y su ADC tiene un rango de medición de +/-125mV, por lo que la máxima corriente de descarga que puede medir es de 25A y es apropiado para los 10A de máxima descarga de la batería. La estimación del estado de carga se ajusta según la temperatura, por lo que utiliza un termistor para obtener dicha información.

El BQ27541 provee información adicional sobre la batería, como la corriente promedio que fluye por la misma, su tensión y capacidad real. La medición de tensión es utilizada para evitar una descarga profunda, evitando agregar un circuito adicional. Además, tiene límites en los estados de carga para cuidar la descarga de la batería y un "Load Mode" para indicar cómo se descarga la batería y optimizar el algoritmo.

Respecto de los niveles de tensión, si bien el BQ27541 trabaja con lógica de 2,5V, la comunicación I²C es compatible con el nivel de 3,3V del MCU, puesto que $V_{IHmax} = 6V$, no es necesario realizar un traslado de nivel.

Selección de componentes

El valor de la resistencia de medición está acotado superiormente por la máxima corriente que se quiere medir y el rango de tensiones de entrada del ADC del BQ27541:

$$R_{máx} = \frac{125mV}{10A} = 12,5m\Omega$$

Luego se quiere que sea lo más grande posible para medir con mayor precisión las corrientes pequeñas, por lo que toma un margen y se elige $R_{máx} = 10m\Omega$. La potencia máxima que deberá soportar esta resistencia es de:

$$P_{máx} = I_{máx}^2 \cdot R = 1W$$

Finalmente, el coeficiente de temperatura debe ser menor a 100ppm/°C, para minimizar errores en el algoritmo por desvío del valor de resistencia. La resistencia elegida es **LVT12R0100FER** de **Ohmite**.

6.1.6.4. Cargador de batería

Especificaciones

El cargador de la batería tiene asociadas las especificaciones INT-PWR-02, INT-PWR-03, INT-PWR-04, RAM-SEG-02 y RAM-SEG-03. A partir de dichas especificaciones y las características de la batería elegida, se obtienen las especificaciones para este módulo, listadas en la Tabla 6.16.

ID	Especificación
E-PSS-CHG-01	El módulo debe proveer de energía al resto del sistema, tanto desde la batería sola como en conjunto con la fuente de alimentación externa.
E-PSS-CHG-02	Cuando está conectada la fuente de alimentación externa, el módulo debe permitir que el dispositivo funcione el dispositivo mientras se carga la batería.
E-PSS-CHG-03	El módulo debe ser capaz de entregar al sistema una corriente de hasta 10A, con un rango de tensión de salida en el rango [3V; 4,2V].
E-PSS-CHG-04	El módulo debe permitir desconectar la batería del resto del sistema.
E-PSS-CHG-05	Para la carga de la batería, la máxima tensión que debe proveer es de 4,2V, y la mínima 2,7V. La corriente de carga debe poder ser regulable y con un máximo de 4A.
E-PSS-CHG-06	El módulo debe informar si la temperatura de la batería está fuera de los rangos admisibles.

Tabla 6.16: Especificaciones para el cargador de batería

Descripción general

Se utiliza el **MAX77976** de *Maxim Integrated*, el cual maneja la totalidad de la corriente del sistema, tanto la carga como la descarga de la batería. Esto es logrado con una arquitectura que incluye un sistema de llaves denominado “*Smart Power Selector*”, encargado de distribuir la energía entre la fuente de alimentación, la batería y el resto del sistema. De esta manera se simplifica el diseño del módulo, ya que el circuito integrado se encarga de la distribución de energía cuando el dispositivo se utiliza mientras se carga la batería.

En la Ilustración 6.26 se muestra la arquitectura del cargador, donde se puede ver que la carga de la batería se realiza a través de una fuente *Buck*, cuya entrada de alimentación es el pin *CHGIN* donde se conecta la fuente externa, y su salida es el pin *SYS* que se conecta a la batería dentro del chip. Además, se puede desconectar la batería del resto del sistema cuando se lo alimenta del pin *SYS*. La comunicación con el microcontrolador se realiza mediante una interfaz I²C, sumado a una señal opcional *IRQB* para la notificación de eventos.

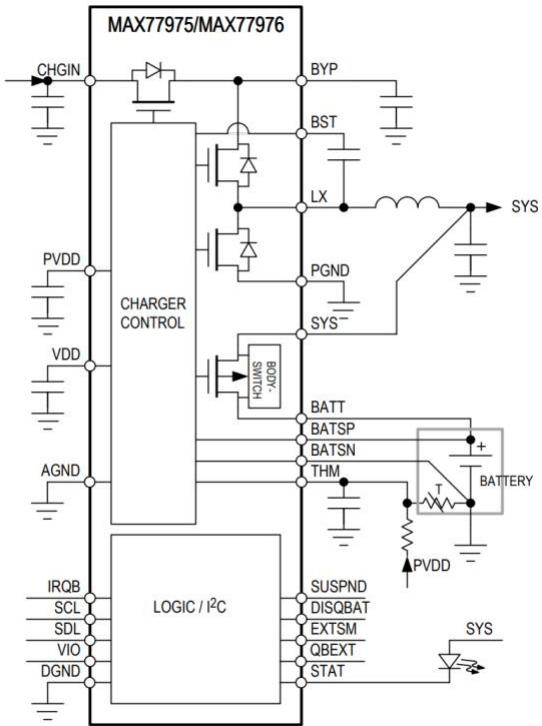


Ilustración 6.26: Diagrama en bloques del MAX77976

Cuando la fuente externa está conectada, el cargador sigue la siguiente lógica para elegir cómo distribuir la energía:

- **Fuente de energía:**
 1. *Fuente de alimentación externa*: Fuente primaria de energía.
 2. *Batería*: Fuente secundaria de energía, necesaria para los picos de corriente mayores a 5,5A.
- **Destino de la energía:**
 1. *Pin BYP*: Prioridad más alta, pin no utilizado.
 2. *Pin SYS*: Segunda prioridad.
 3. El resto de la energía está disponible para la carga de la batería.

La corriente de carga de la batería es configurable y puede llegar hasta 5,5A, superior a la máxima especificada. Por otro lado, la máxima corriente de descarga es de 10A, nuevamente, acorde al máximo especificado. Además, el integrado cuenta con un pin dedicado a medir los valores de un termistor acoplado térmicamente a la batería que es utilizado para monitorear el proceso de carga y descarga.

Cuenta con un pin de salida para un LED de estado, el cual puede indicar si el cargador está prendido, cargando o si la carga ha finalizado. Esta señal es la salida *PWR_STATUS* del subsistema de alimentación y es utilizada en la interfaz de usuario para indicar el estado de la carga.

Por último, el pin de entrada *DISQBAT* sirve para forzar la desconexión de la batería. Si bien no es utilizado para simplificar el diseño, podría agregarse hardware que accione este mecanismo ante determinada condición para aumentar la confiabilidad, eliminando la necesidad de la intervención del microcontrolador.

A modo de resumen, las tareas que cumple el módulo son:

- Carga de la batería, configurable por el microcontrolador.
- Desconexión de la batería ante una orden del microcontrolador.
- Indicación del estado de la carga con la señal *PWR_STATUS* proveniente del pin *STAT*.
- Notificación de eventos mediante interrupción del pin *IRQB* y lectura de registros:
 - Conexión y desconexión de alimentación externa válida.
 - Inserción y remoción de la batería.
 - Activación de un mecanismo para el control de altas temperaturas.
- Información de estados del cargador:

- Estado del proceso de carga: comienzo, etapa del proceso, finalización, error.
- Temperatura: demasiado alta, alta, normal, baja o demasiado baja.

Selección de componentes

El componente al que más atención se le debe prestar en el diseño es el inductor de la fuente *Buck*. Su valor depende de la frecuencia de conmutación a utilizar, que puede ser de 1,3MHz o 2,6MHz. Se elige 1,3MHz para tener mayor eficiencia, para la cual el inductor debe ser de 1uH.

Además, se tienen cotas para la corriente de saturación, la corriente nominal y la frecuencia de resonancia, y la resistencia de pérdidas debe ser lo más pequeña posible [12]. En primer lugar, la corriente de saturación debe ser un 33% mayor a la corriente máxima, de 10A, para que el inductor se comporte como tal, por lo que $I_{sat} > 13,3A$. En segundo lugar, la corriente nominal debe ser mayor a la corriente pico. Por último, la frecuencia de resonancia debe superar en al menos 10 veces el tercer armónico de la frecuencia de conmutación, para que presente el comportamiento esperado para al menos tres armónicos de la cuadrada. En consecuencia, la resonancia debe superar $10 \cdot 3 \cdot 1,3\text{MHz} = 65\text{MHz}$.

El inductor elegido es el **IHL2525CZER1R0M5A** de **Vishay Dale**, con $R_{DC} = 8,45m\Omega$.

Para el resto de los componentes se siguió el diseño de referencia de la placa de evaluación **MAX77976EVKIT+** [13], eligiendo alternativas compatibles en el caso de falta de stock. El diagrama esquemático del cargador se muestra en la Ilustración 11.8 del Anexo.

Análisis térmico

Dado que el cargador maneja la corriente de todo el sistema, es necesario realizar un análisis de su disipación térmica, para evitar problemas por sobrecalentamiento. En primer lugar, se estima el consumo de corriente de la fuente *Buck*, luego se obtiene la eficiencia de la fuente en dichas condiciones y a partir de ella la disipación de potencia. Finalmente, se calcula la resistencia térmica admisible para la disipación calculada, dado un máximo aumento de temperatura.

Se analiza el caso en el que se carga la batería con su corriente estándar y se alimenta todo el sistema al mismo tiempo, con una tensión de la batería de 3,6V, dado que es la mínima tensión para la que la hoja de datos provee información. Al aumentar la tensión de la batería, la disipación será menor porque la fuente *Buck* es más eficiente.

El consumo promedio es de aproximadamente 11W durante el uso del guante, con lo que a 3,6V el consumo del sistema será de 3,1A. Sumando los 2A de la carga nominal de la batería, se tiene que $I_o = 5,1A$ es la corriente de salida de la fuente, y la potencia consumida por el sistema es de 18,3W.

En la Ilustración 6.27 se muestra la eficiencia de la fuente en distintas condiciones, en este caso corresponde la curva roja, que tiene un valor de 89% para el valor estimado de I_o .

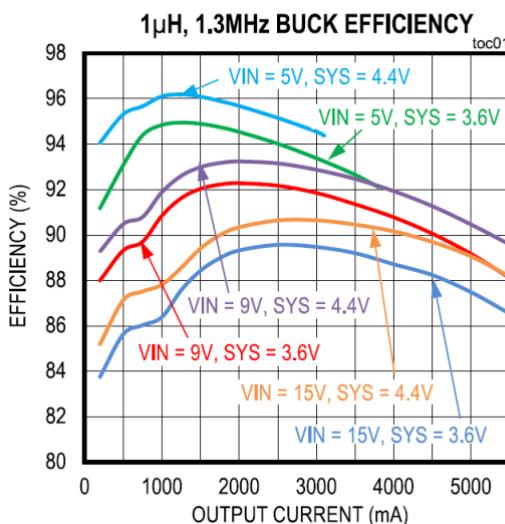


Ilustración 6.27: Eficiencia de la fuente Buck con $f_s=1.3\text{MHz}$

Dada la eficiencia, la potencia disipada por la fuente es de:

$$P_{dis} = P_{cons} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = 2.26W$$

Luego, la resistencia térmica admisible depende de qué aumente la temperatura del circuito integrado. El MAX77976 tiene un sistema de regulación de temperatura llamado “*Thermal Foldback*”, de funcionamiento análogo a una protección *foldback* en reguladores de tensión, que se dispara cuando la temperatura de juntura alcanza un valor $T_{j\max}$ configurable entre 85°C y 130°C. Cuanto mayor sea $T_{j\max}$, menos restrictiva será la resistencia térmica θ .

Se calculan los límites, para $T_a = 25^\circ C$:

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{T_{j\max} - T_a}{P_{dis}} \\ \theta_{min} &= \frac{85^\circ C - 25^\circ C}{2.26W} = 26.55^\circ C/W \\ \theta_{\max} &= \frac{130^\circ C - 25^\circ C}{2.26W} = 46.46^\circ C/W\end{aligned}$$

Como para el MAX77976 $\theta_{JA} = 28.3^\circ C/W$, permite que la temperatura alcance los 90°C y se podrá cumplir con la resistencia térmica requerida, con lo que se espera que para las condiciones dadas no haya problemas de sobrecalentamiento.

Cabe aclarar que el caso analizado no es el peor, al utilizarlo mientras se carga con una $V_{SYS} < 3.6V$, es decir, con la batería más descargada, aumenta la disipación de la fuente *Buck*. Sin embargo, dado que el resultado indica que para $V_{SYS} < 3.6V$ hay un margen de 40°C para el aumento de $T_{j\max}$, se espera que no haya problemas incluso para casos de peores condiciones. Además, el fabricante indica que la activación del *Thermal Foldback* no es una situación anormal, y no se considera que el proceso carga deje de ser válido, simplemente se limita la corriente de carga para controlar la temperatura. Por último, si se llegara a un caso en el que para una tensión muy baja el consumo lleva a un sobrecalentamiento excesivo no tolerado por el cargador, el *firmware* puede limitar la operación del dispositivo hasta que la batería alcance un porcentaje de carga o una tensión determinados.

6.1.6.5. Llave accionable por software

Especificaciones

Este módulo es necesario para cumplir la especificación FUN-GEN-01 que requiere que el dispositivo pueda apagar la alimentación, y a su vez provee un pulsador para el normal encendido y apagado el dispositivo. Para ello, debe cumplir las especificaciones de la Tabla 6.17.

ID	Especificación
E-PSS-SPS-01	Se debe activar la alimentación cuando se presiona una vez el pulsador de encendido.
E-PSS-SPS-02	Una vez encendida la alimentación del sistema, para forzar un apagado, el pulsador de encendido se debe presionar por, al menos, 3 segundos.
E-PSS-SPS-03	Cuando la alimentación del sistema está activada, debe existir una señal denominada PWR_SENSE, que permita detectar si se presiona el pulsador de encendido. Cuando se presiona el pulsador, PWR_SENSE debe poseer un nivel de tensión menor o igual a 0,825V. Cuando no se lo presiona, la señal debe poseer un nivel de tensión mayor o igual a 2,45V. Estos son los umbrales lógicos del módulo ESP32.
E-PSS-SPS-04	Debe poseer una señal de entrada que permita forzar un apagado cuando se envía un estado lógico alto de, al menos, 3 segundos. Esta señal se denomina PWR_CTRL, su estado lógico alto es de 3,3V.
E-PSS-SPS-05	Debe soportar consumos de hasta 13A.

Tabla 6.17: Especificaciones del circuito del submódulo Soft Power Switch.

Diseño del circuito

En la Ilustración 6.28 se muestra el circuito diseñado y su implementación en esquemáticos en la Ilustración 11.14 del Anexo, su funcionamiento y elección de componentes se explican a continuación.

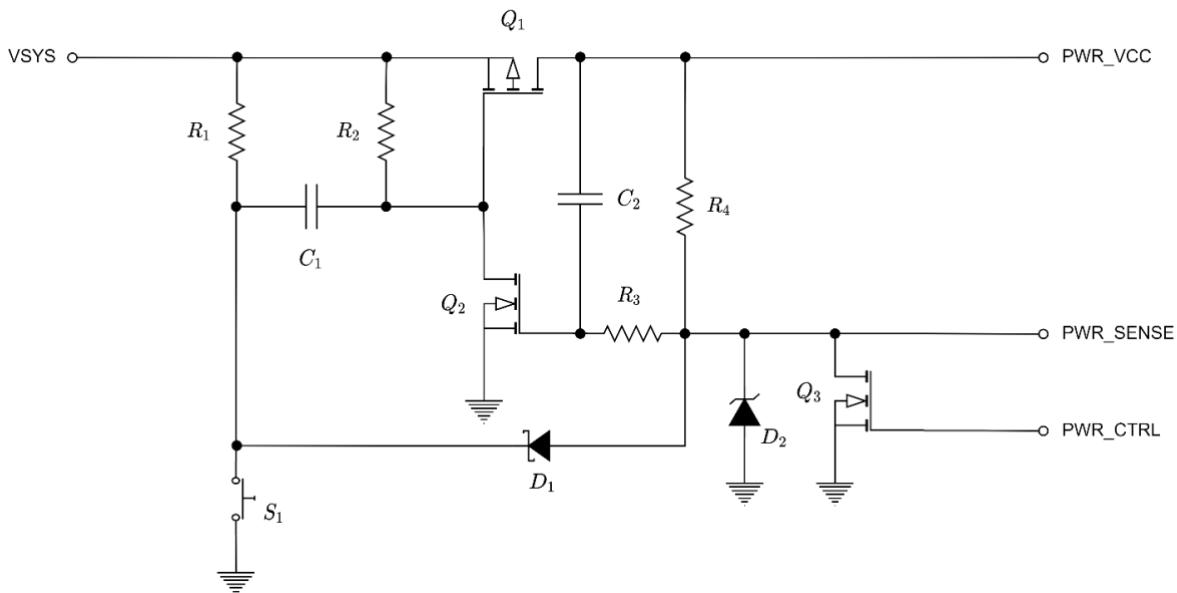


Ilustración 6.28: Circuito Soft Power Switch.

Cuando se presiona el pulsador S_1 , inicialmente el capacitor C_1 se encuentra descargado, y la tensión en $V_{G_1}(0) = 0V$, por ende, el MOSFET de canal P se pone en modo de conducción. Este capacitor permite filtrar los rebotes mecánicos del pulsador, por ende, la señal de disparo sólo está presente por un breve tiempo hasta que la tensión del capacitor se carga por encima del umbral de disparo. Para conseguir este comportamiento, la constante del tiempo del filtro debe ser menor que la duración de los rebotes, por eso se busca,

$$V_{G_1}(t) = V_{SYS} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 \cdot C_1}}\right)$$

$$\tau_1 = R_2 \cdot C_1 = 10ms \Rightarrow C_1 = 100nF \quad R_2 = 100k\Omega$$

La resistencia R_1 se utiliza para crear un camino de descarga del capacitor C_1 , no existen mayores restricciones para su valor, por tanto, se escoge $R_1 = 10k\Omega$.

$$P_{R_1 MAX} \approx \frac{(2 \cdot V_{SYS})^2}{R_1} = 7,056mW$$

$$P_{R_2 MAX} \approx \frac{V_{SYS}^2}{R_2} = 176,4\mu W$$

Cuando se dispara el transistor de canal P, si se suelta el pulsador de encendido en menos de los 3 segundos de apagado, se polariza en inversa el diodo Zener D_2 , y se dispara el transistor Q_2 . Esto permite que se mantenga la condición de conducción, aunque no se siga presionando el pulsador. Durante esta condición de encendido, la señal PWR_SENSE posee un nivel de tensión equivalente al del diodo Zener, que debe ser suficiente para que el microcontrolador lo detecte como un estado lógico alto. Para eso, se decide utilizar un diodo Zener con $V_Z = 2,7V$.

Para el diodo Zener, se utiliza el modelo **BZT52C2V7** de **Diodes Incorporated**, que cuenta con $V_Z = 2,7V$, y una corriente recomendada de polarización en inversa $I_Z = 5mA$. Siendo que la potencia máxima que puede disipar, según el fabricante, es $P_D = 370mW$, es estima que la corriente máxima que puede circular por el diodo es $I_{Z MAX} \approx 137mA$. La resistencia R_4 , se encarga de limitar esta corriente, por ende:

$$R_4 = \frac{V_{SYS} - V_Z}{I_Z}$$

$$\frac{4,2V - 2,7V}{137mA} < R_4 < \frac{3V - 2,7V}{5mA}$$

$$10,95\Omega < R_4 < 60\Omega$$

Por esto, se elige $R_4 = 51\Omega$. Para estimar la máxima corriente de esta resistencia, se sabe que el diodo D_1 deberá ser un diodo de tipo Schottky, con la menor caída de tensión en directa. Considerando un caso límite de $200mV$, se calcula:

$$I_{R_4 \text{MÁX}} = \frac{V_{SYS} - V_{D_1}}{R_4} = \frac{4,2V - 0,2V}{51\Omega} = 78,43mA$$

$$P_{R_4 \text{MÁX}} = 0,314W$$

Cuando la condición de encendido se sostiene, el diodo D_1 permite forzar un estado lógico bajo en la señal PWR_SENSE para que sea detectado por el microcontrolador. Para esto, se debe escoger un diodo Schottky con una tensión en directa menor a $0,825V$. Particularmente, se selecciona el modelo **CUS08F30** de **TOSHIBA**.

En todo momento, el capacitor C_2 se encuentra descargado. Cuando el circuito se encuentra en la condición de encendido, al presionar el pulsador S_1 empieza a circular una corriente a través del capacitor C_2 , la resistencia R_3 y el diodo D_1 . Esto provoca que haya un tiempo de retardo hasta que la tensión V_{G_2} sea inferior al umbral de disparo del transistor Q_2 , lo cual provocaría que se apague. Entonces, determinando la constante de tiempo de este subcircuito, se regula el tiempo necesario para que se apague este cuando se presiona el pulsador. Si bien la constante de tiempo depende únicamente de los componentes y sus valores, según cómo sea la tensión aplicada al circuito, cambiará cuánto toma en apagar el transistor.

$$V_{G_2}(t) = (V_{SYS} - V_{D_1}) \cdot e^{-\frac{t}{R_3 \cdot C_2}} + V_{D_1}$$

Para implementar los transistores Q_2 y Q_3 , se usa el modelo **DMN62D0UW** de **Diodes Incorporated**, ya que posee una tensión de disparo máxima $V_{GS(TH)} < 1,5V$, y es para bajas corrientes. Considerando que el diodo Schottky tiene una tensión $V_{D_1} = 280mV$ a $I_{D_1} = 100mA$:

$$\tau_2 = R_3 \cdot C_2$$

$$\tau_2 = -\frac{t}{\ln\left(\frac{V_{G_2}(t) - V_{D_1}}{V_{SYS} - V_{D_1}}\right)}$$

$$\tau_2 = -\frac{3s}{\ln\left(\frac{1,5V - 280mV}{4,2V - 280mV}\right)} = 2,57s$$

$$\tau_2 = -\frac{3s}{\ln\left(\frac{1,5V - 280mV}{3V - 280mV}\right)} = 3,716s$$

Entonces, se busca que $\tau_2 > 3,716s$. Para eso, $C_2 = 10\mu F$ y $R_3 = 430k\Omega$.

Por último, para el transistor Q_1 , la corriente máxima que debe permitir continuamente es $13A$. Es deseable una resistencia de canal menor a $10m\Omega$ para reducir el calor disipado, y mejorar la eficiencia energética. Además, debe poder disparar con tensiones tan bajas como $2,7V$.

Se selecciona el modelo **DMPH1006UPSQ** de **Diodes Incorporated**:

- Soporta corrientes de hasta $60A$
- La resistencia del canal se puede considerar menor a $6m\Omega$
- En estas condiciones, la potencia máxima disipada sería $P_{Q_1 \text{MÁX}} = (13A)^2 \cdot 6m\Omega = 1,014W$. El fabricante indica que, si se coloca el circuito integrado con un mínimo uso de cobre, este puede disipar hasta $1,8W$. No obstante, con técnicas de manejo térmico se puede alcanzar hasta $3,2W$.

A modo de resumen, en la Tabla 6.18 se muestra la elección de todos los componentes del circuito.

Componentes	Condiciones
-------------	-------------

R_1	$R = 10k\Omega$ $P_{MAX} \approx 7,056mW$
R_2	$R = 100k\Omega$ $P_{MAX} \approx 176,4\mu W$
C_1	$C = 100nF$ $V_{MAX} = 4,2V$
D_2	Se utiliza el modelo BZT52C2V7 de Diodes Incorporated
R_4	$R = 51\Omega$ $P_{MAX} \approx 314mW$
D_1	Se utiliza el modelo CUS08F30 de Toshiba
C_2	$C = 10\mu F$ $V_{MAX} = 4,2V$
R_3	$R = 430k\Omega$ $P_{MAX} \approx 35,73\mu W$
S_1	$V_{MAX} = 4,2V$ $I_{MAX} = \frac{V_{SYS}}{R_1} + \frac{V_{SYS}}{R_2} + \frac{V_{SYS}-V_{D1}}{R_4} = 78,89mA$
Q_3, Q_2	Se utiliza el modelo DMN62D0UW de Diodes Incorporated
Q_3	Se utiliza el modelo DMPH1006UPSQ de Diodes Incorporated

Tabla 6.18: Resumen de componentes del Soft Power Switch.

6.1.6.6. Medición del consumo de corriente

Especificaciones

El circuito de medición de consumo de la corriente total del producto tiene asociada la especificación RAM-SEG-03. Además, el mismo debe cumplir con las especificaciones de la Tabla 6.19.

ID	Especificación
E-PSS-CURR-01	Debe operar en un rango de tensiones [2,7V; 4,2V]
E-PSS-CURR-02	Debe medir un rango de corrientes de [0, 10A]
E-PSS-CURR-03	Su salida debe ser una señal analógica con un ancho de banda máximo de $\Delta f = 1kHz$.
E-PSS-CURR-04	Su salida debe ser una señal analógica cuyo rango de medición debe estar en [0; 2,4V]
E-PSS-CURR-05	Su salida analógica no deberá superar la tensión máxima 3,3V.

Tabla 6.19: Especificaciones del circuito de medición del consumo de corriente.

Diseño del circuito

Para cumplir con dichas especificaciones se utiliza el circuito integrado **INA180A4** por tener la mayor disponibilidad en el mercado al momento del diseño. Además, tiene una ganancia de tensión de $200\frac{V}{V}$, mayor a la de otras opciones. De esta forma, la resistencia de medición de corriente podrá ser de un valor más pequeño, afectando menos en la línea de alimentación.

La Ilustración 6.29 muestra el circuito utilizado para la medición del consumo de corriente, que consiste en la resistencia por la que fluye la corriente del sistema conectada al amplificador diferencial seguido de un filtro pasa-bajos anti-alias.

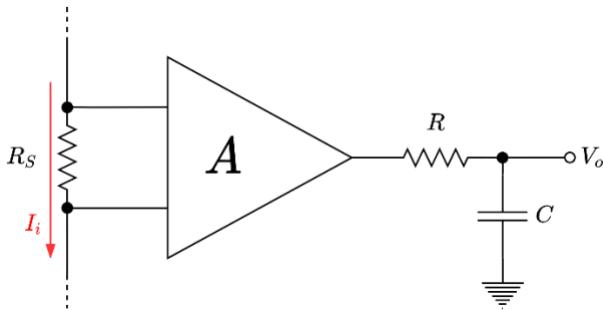


Ilustración 6.29: Circuito de medición del consumo de corriente.

A continuación, se detallan los cálculos necesarios para la selección de los componentes.

Dentro del ancho de banda esperado, la relación entrada a salida del circuito está dada por,

$$V_o = I_i \cdot R_S \cdot A \Rightarrow R_S = \frac{V_{o\text{MÁX}}}{I_{i\text{MÁX}} \cdot A} = \frac{2,4V}{10A \cdot 200 \frac{V}{V}} = 1,2m\Omega \Rightarrow R_S = 1m\Omega$$

$$P_{R_S\text{MÁX}} = (I_{i\text{MÁX}})^2 \cdot R_S = 100mW$$

Luego, para limitar el ancho de banda de la señal se elige la frecuencia de corte del filtro, minimizando el ruido y evitando que ocurra *aliasing* durante el proceso de conversión analógico a digital,

$$f_{\text{MÁX}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \Rightarrow R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1kHz \cdot C} \Rightarrow R = 1,5k\Omega \quad C = 100nF$$

Finalmente, siendo que esta señal analógica es muestrada por un conversor analógico a digital, utilizando una determinada cantidad de bits, y con una cierta tensión de referencia, se puede encontrar una expresión para convertir tal medición al valor de corriente,

$$I = \frac{N}{2^L - 1} \cdot \frac{V_{REF}}{0,2\Omega}$$

Esta señal deberá ser medida con una precisión de $L = 12$ bits, y en el SoC (ESP32) la tensión de referencia de los conversores analógicos digitales es $V_{REF} = 3,3V$, aunque su rango lineal es mucho menor y nunca se suele utilizar en su completa extensión.

$$I = \frac{N}{248,182} [A]$$

Los componentes utilizados para el circuito se muestran en la Tabla 6.20 junto con su número de parte y el fabricante. El esquemático con el diseño se muestra en la Ilustración 11.7 del Anexo.

	Número de parte	Fabricante
<i>U₁</i>	INA180A4IDBVT	Texas Instruments
<i>R_S</i>	PA1206FRM670R001L	YAGEO
<i>R</i>	RMCF0603JT1K50	Stackpole Electronics Inc
<i>C</i>	C0603C104M4RAC7411	KEMET

Tabla 6.20: Componentes del circuito de medición del consumo de corriente.

6.1.6.7. Conversores DC-DC 5V y 6V

Especificaciones

Los conversores DC-DC de 5V y 6V deben cumplir con las especificaciones de la Tabla 6.21 y la Tabla 6.22, respectivamente. Si bien los módulos consumen menos de 3A según las estimaciones realizadas en la Sección 6.1.6.1, los conversores se diseñan para una corriente máxima de 3A para tener margen para un eventual consumo superior al esperado.

ID	Especificación
E-PSS-5V-01	La fuente de alimentación debe proveer 5V.
E-PSS-5V-02	El consumo máximo disponible deberá ser 3A.
E-PSS-5V-03	Deberá operar con un rango de tensiones eléctricas de entrada de [3,0V;4,2V].
E-PSS-5V-04	Deberá poseer una eficiencia de conversión mayor o igual al 80%.
E-PSS-5V-05	Se deberá poder deshabilitar la fuente de 5V para que deje de entregar corriente.
E-PSS-5V-06	Deberá tener una variación de la tensión de la salida menor al 1%.
E-PSS-5V-07	Deberá tener protección contra corrientes elevadas (cortocircuitos).

Tabla 6.21: Especificaciones del conversor DC-DC 5V.

ID	Especificación
E-PSS-6V-01	La fuente de alimentación interna debe proveer 6V.
E-PSS-6V-02	El consumo máximo disponible deberá ser 3A.
E-PSS-6V-03	Deberá operar con un rango de tensiones eléctricas de entrada de [3,0V;4,2V].
E-PSS-6V-04	Deberá poseer una eficiencia de conversión mayor o igual al 80%.
E-PSS-6V-05	Se deberá poder deshabilitar la fuente de 6V para que deje de entregar corriente.
E-PSS-6V-06	Deberá tener una variación de la tensión de la salida menor al 1%.
E-PSS-6V-07	Deberá tener protección contra corrientes elevadas (cortocircuitos).

Tabla 6.22: Especificaciones del conversor DC-DC 6V.

Diseño del circuito

Para obtener una tensión eléctrica de $V_o = 5V$ y $V_o = 6V$ considerando que el rango de tensiones de entrada es de $3V < V_i < 4,2V$, se utiliza un convertidor *boost* para elevar la tensión utilizando tecnología de conmutación. Para las corrientes de salida esperadas, sólo es posible utilizar un controlador integrado y un dispositivo de conmutación externo. Considerando esto en conjunto con la disponibilidad del componente y el tipo de características deseadas a partir de las especificaciones, se decide utilizar el **LTC3872**. El circuito diseñado es el mismo para ambos conversores, pero con diferentes valores en los componentes utilizados. Estas diferencias se muestran en los esquemáticos en el Anexo, la Ilustración 11.11 para el conversor de 5V y en la Ilustración 11.13 para el conversor de 6V. A continuación, se realizan los cálculos de los componentes para ambos conversores.

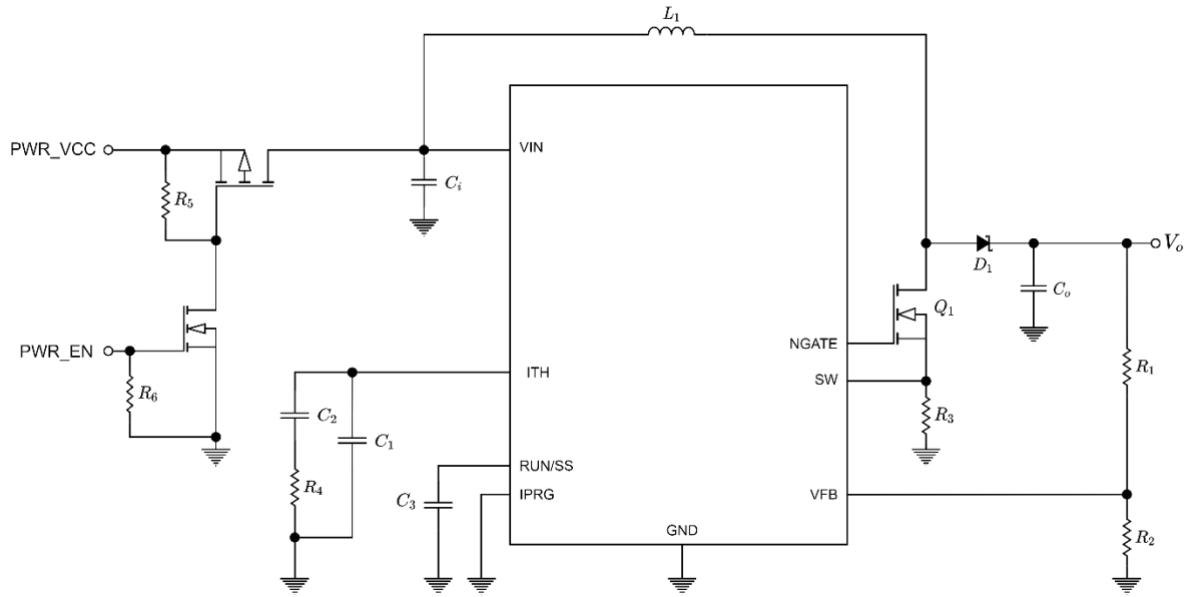


Ilustración 6.30: Circuito de los conversores DC-DC 5V y 6V.

Para las resistencias R_1 y R_2 se utiliza que la tensión de salida V_0 es:

$$V_0 = 1,2V \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \Rightarrow \left(\frac{V_0}{1,2V} - 1\right) \cdot R_2 = R_1$$

Por lo tanto, se seleccionan los siguientes valores cumpliendo con la condición obtenida.

V_o	R_1	R_2
5V	4,75k Ω	1.5k Ω
6V	12k Ω	3k Ω

Luego, para el inductor L_1 , asumiendo que el circuito opera en modo de conducción continua, la corriente en el inductor tendrá la forma de onda triangular, cuyo valor medio depende de la corriente de salida. Para calcular esto, el fabricante sugiere considerar condiciones ideales, donde la potencia de entrada es igual a la potencia de salida. No obstante, se opta por considerar una eficiencia mínima del $\eta \geq 80\%$. Entonces,

$$P_I \cdot \eta = P_o$$

$$V_I \cdot I_I \cdot \eta = V_o \cdot I_o$$

$$I_I = \frac{V_o \cdot I_o}{V_I \cdot \eta}$$

Considerando para ambas fuentes que la tensión mínima de entrada es 3V, y la corriente de salida máxima es 3A, se obtiene:

V_o	I_I
5V	6,25A
6V	7,5A

La corriente media de la entrada es también la corriente media de la bobina.

$$\overline{I_{L_1}} = 7,5A$$

Considerando un 30% de valor pico a pico en la corriente del inductor,

$$\Delta I_{L_1} = \overline{I_{L_1}} \cdot 0,3 = 2,25A$$

$$I_{L_1 MAX} = \overline{I_{L_1}} + \frac{\Delta I_{L_1}}{2} = 8,625A$$

El diodo y el transistor tendrán esta misma corriente máxima.

El valor de inductancia modifica la pendiente con que varía la corriente en el mismo, por ende, afecta directamente sobre la variación de corriente en el tiempo, es decir, se debe determinar un valor para asegurar el 30% deseado.

Se calcula el ciclo de trabajo para cada caso, considerando la tensión de entrada mínima $3V$, y asumiendo que la tensión en directa del diodo será $V_D \approx 0,4V$,

$$D = \frac{V_o + V_D - V_{IN}}{V_o + V_D}$$

V_o	D_{MAX}
5V	44,44%
6V	53,125%

Se calcula el valor de inductancia para cada caso, considerando que el circuito integrado puede operar únicamente a una frecuencia de conmutación $f = 550kHz$,

$$L = \frac{V_{IN_{MIN}}}{\Delta I_L \cdot f} \cdot D_{MAX}$$

V_o	L
5V	$1,07\mu H$
6V	$1,28\mu H$

Para buscar un diseño basado en el mismo inductor, se opta por uno de $L = 1,2\mu H$. De esta forma, las variaciones de corriente suben y bajan según cada diseño, pero no se apartan del rango [20%, 40%] recomendado por el fabricante. La opción utilizada para este inductor es el **0830CDMCCDS-1R2MC** de **Sumida America Components Inc.**.

El transistor Q₁ debe soportar la máxima corriente que circula por el inductor, y particularmente se busca uno cuya especificación tenga, al menos, un margen del 20% para evitar estresar el componente cerca de sus límites. El mismo principio aplica para la tensión máxima del transistor.

$$I_{DS_{MAX}} = 10,35A$$

$$V_{DS_{MAX}} = 8V$$

$$R_{DS(ON)} \leq V_{SENSE(MAX)} \cdot \frac{1 - D_{MAX}}{\left(1 + \frac{x}{2}\right) \cdot I_{O(MAX)} \cdot \rho_T}$$

V_o	$R_{DS(ON)}$
5V	$80,57m\Omega$
6V	$66,66m\Omega$

Además, es necesario tener en cuenta que el transistor MOS de canal N debe poder disparar con las tensiones de entrada que provienen de la batería de litio-ion. El transistor utilizado es el **BSC052N03LSATMA1** de **Infineon Technologies**.

Para el diodo se busca uno de tipo Schottky, ya que la juntura metal-semiconductor no tiene acumulación de portadores y su tiempo de respuesta es bajo, permitiendo un apagado rápido. Se puede utilizar el **PDS1040L-13** de **Diodes Incorporated**.

Finalmente, para los capacitores del circuito se busca,

$$ESR \leq \frac{0,01 \cdot V_o}{I_{IN_{MAX}}} = 5,8m\Omega$$

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{O_{MAX}}}{0,01 \cdot V_o \cdot f} = 120\mu F$$

$$I_{RMS} \approx I_{O_{MAX}} \cdot \sqrt{\frac{V_o - V_{I_{MIN}}}{V_{I_{MIN}}}} = 3A$$

$$10\mu F \leq C_I \leq 100\mu F$$

V_o	C_{out}	C_I
5V	136nF	10uF
6V	136nF	10uF

6.1.6.8. Conversor DC-DC 3,3V

Especificaciones

Las especificaciones para el conversor de 3,3V se listan en la Tabla 6.23

ID	Especificación
E-PSS-3V3-01	La fuente de alimentación interna debe proveer 3,3V.
E-PSS-3V3-02	El consumo máximo disponible deberá ser 1A.
E-PSS-3V3-03	Debe operar con un rango de tensiones de entrada [2,7V; 4,2V]. Este es el rango en que puede variar la tensión eléctrica de la batería.
E-PSS-3V3-04	Deberá poseer una eficiencia de conversión mayor o igual al 80%.

Tabla 6.23: Especificaciones de la fuente de 3,3V.

Diseño del circuito

Dado que la tensión de entrada puede ser tanto superior como inferior a la tensión de salida, se debe utilizar un conversor de topología *Buck-Boost*. Se utiliza el LTC3113EDHD#TRPBF de **Analog Devices Inc.**, que admite una corriente de salida de hasta 1,5A para $V_o = 3,3V$. Se sigue el diseño de referencia para $V_o = 3,3V$ de la Ilustración 6.31, obtenido de la hoja de datos [10]. La implementación se muestra en la Ilustración 11.10 del Anexo.

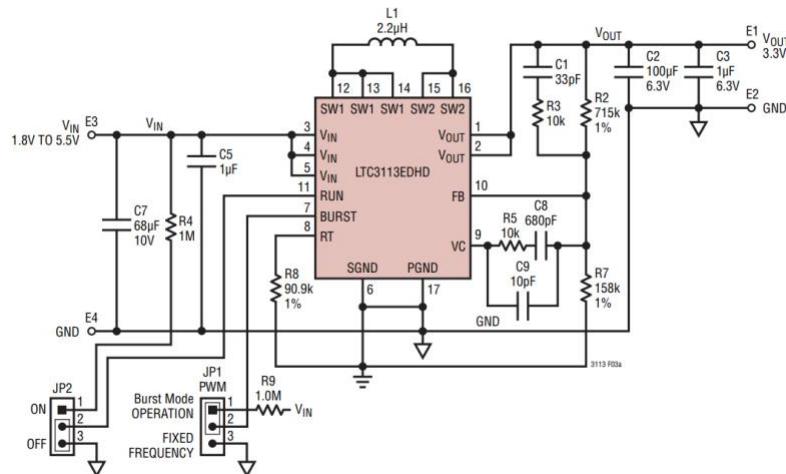


Ilustración 6.31: Circuito del LTC3113EDHD para 3,3V.

6.1.6.9. Fuente de referencia de 2,5V

Especificaciones

En la Tabla 6.24 se presentan las especificaciones de diseño de la fuente de referencia de 2,5V.

ID	Especificación

E-PSS-2V4-01	La fuente de alimentación interna debe proveer 2,5V.
E-PSS-2V4-02	El consumo máximo disponible deberá ser 5mA.
E-PSS-2V4-03	Debe operar con una tensión de entrada de 3,3V.

Tabla 6.24: Especificaciones de la fuente de 2,5V.

Descripción general

La fuente de alimentación de 2,5V es empleada como tensión eléctrica de referencia para circuitos de acondicionamiento de los sensores. Para utilizar una referencia de tensión de poco ruido, se busca emplear un regulador lineal, que pueda trabajar con pequeñas caídas de tensión, es decir un LDO (*Low Dropout Voltage*). Se encontró el modelo **LM4125IM5-2.5/NOPB** de **Texas Instruments** que tiene un encapsulado SOT-23-5 con muchas variantes pin a pin compatibles en caso de falta de stock y una buena disponibilidad.

Se siguen las recomendaciones del fabricante para los valores de los capacitores de entrada y salida, el circuito se muestra en la Ilustración 11.12 del Anexo.

6.1.6.10. Protección

Especificaciones

Este submódulo cumple la función de proteger al producto ante diferentes situaciones que podrían comprometer su correcto funcionamiento. Las protecciones son aplicables a todo el producto, y no únicamente a la entrada de alimentación externa. Según las especificaciones INT-PWR-03, INT-PWR-05, INT-PWR-06 y RAM-SEG-03, se precisan las funciones de protección:

- **Protección contra cortocircuitos:** En el caso de que se produzca algún cortocircuito, cada uno de los conversores DC-DC o reguladores lineales cuenta con protección contra cortocircuitos, es decir, se apagan para limitar el consumo de corriente y evitar fallas. Por ende, este punto está cubierto tanto a los efectos de la batería como de la alimentación externa.
- **Protección contra sobrecarga:** En el caso de que haya un consumo prolongado de corrientes excesivas, por encima de los especificados, el controlador de carga que actúa de puente eléctrico entre la alimentación externa, la batería y la alimentación del sistema, se encargará de limitar el consumo.
- **Protección contra sobretensiones:** Es necesario diseñar una protección para este aspecto.
- **Protección contra polaridad negativa:** Es necesario diseñar una protección para este aspecto.

Se listan entonces las especificaciones para el circuito a diseñar en la Tabla 6.25.

ID	Especificación
E-PSS-PRO-01	Debe operar, en condiciones normales, con corrientes de hasta 4A
E-PSS-PRO-02	Debe operar con una tensión nominal de 9V
E-PSS-PRO-03	Debe operar con una tensión máxima, en condiciones normales, de 12V
E-PSS-PRO-04	Debe proteger frente a sobretensiones, con un rango de protección de [-30V, 30V]
E-PSS-PRO-05	Debe proteger frente a conexiones con polaridad invertida

Tabla 6.25: Especificaciones del submódulo de protección.

Descripción general

En la Ilustración 6.32 se muestra el circuito diseñado, y su implementación en la Ilustración 11.15 del Anexo.

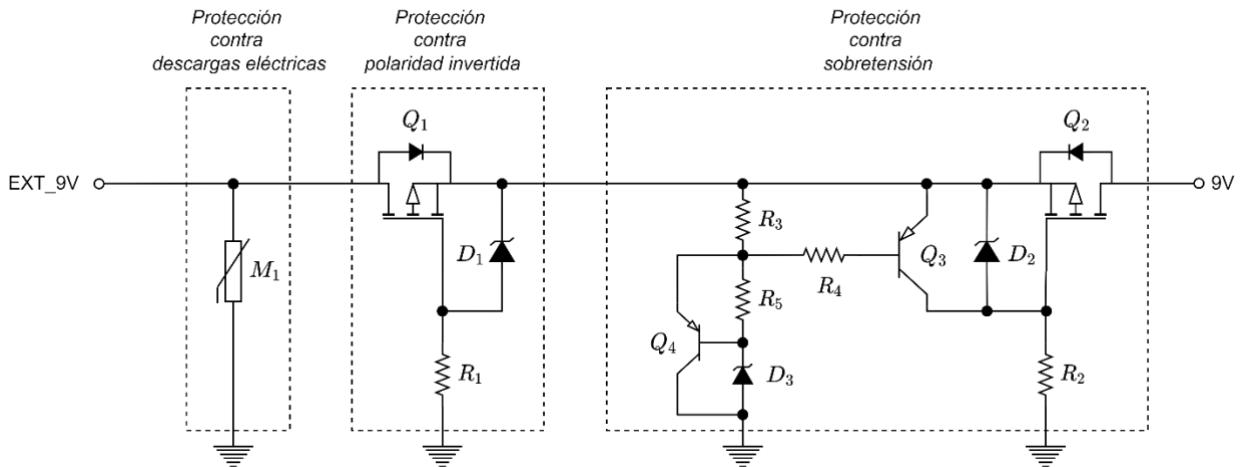


Ilustración 6.32: Circuito de protección.

Protección contra descargas eléctricas

En primer lugar, se utiliza un varistor M_1 que cumple la función de proteger el producto frente a sobretensiones provenientes de la alimentación externa, principalmente transitorias. El producto está especificado para operar con alimentación externa de 9V, pero se busca diseñar extendiendo el rango de entrada a 12V, para tener mayor flexibilidad a futuro. Considerando un margen de seguridad del 20%, la máxima tensión de operación en corriente continua para el varistor debe ser,

$$V_{W(DC)} > 14,4V$$

Protección contra polaridad invertida

Para seleccionar el transistor MOS de canal P, primero se considera que la máxima corriente que está especificado que puede entregar la alimentación externa, es de 4A. Se buscará un transistor que soporte hasta 4,8A. Luego, es deseable limitar la disipación de potencia de estos transistores buscando una resistencia de canal relativamente baja. Así, limitando a $P_D < 1W \approx (4A)^2 \cdot R_{DS(ON)} \Rightarrow R_{DS(ON)} = 62,5m\Omega$. Por otro lado, una condición no tan restrictiva es que $V_{GS(TH)} > -8V$. Por lo general, los transistores suelen estar ensayados a tensiones de entrada particulares (estandarizadas). Por ello, se diseña el circuito para buscar disparar el transistor con una tensión convencional, y se fija en $V_{GS} = -4,5V$.

El transistor se dispara estabilizando la tensión con un diodo Zener. Se usa el modelo MMSZ5231B de Diodes Incorporated, que posee una $V_Z = 5,1V$, se busca polarizarlo con una $I_Z = 2mA$. Teniendo en cuenta que su corriente máxima es $I_{Z_{MAX}} \approx \frac{370mW}{5,1V} = 72,55mA$. Se calcula la resistencia de polarización,

$$R_1 = \frac{9V - 5,1V}{2mA} = 1950\Omega$$

Se escoge $R_1 = 2200\Omega$, y en condiciones normales disipa una potencia $P_{R_1} = 6,91mW$. Para el caso límite de sobretensión,

$$P_{R_{1MAX}} = \frac{(30V - 5,1V)^2}{2,2k\Omega} = 281,82mW$$

Protección contra sobretensión

En primer lugar, para R_2 , Q_2 y D_2 se reutilizan las selecciones de R_1 , Q_1 y D_1 . Particularmente, R_2 puede disipar más potencia porque cuando se activa la protección de sobretensión debe circular la corriente del transistor Q_3 que posee una caída de tensión menor que la del diodo Zener. Asumiendo una tensión de saturación típica, bajo la condición límite de sobretensión,

$$P_{R_{2MAX}} = \frac{(30V - 0,2V)^2}{2,2k\Omega} = 0,41W$$

Por esto, sería conveniente que ambas resistencias fueran de una potencia nominal de 1W.

Para el circuito de protección contra sobretensión, si bien es deseable que el circuito pueda proteger al producto frente a tensiones tan grandes como 30V, se busca que el circuito opere hasta tensiones de 14,4V. Por esto, se selecciona un diodo Zener modelo BZX84C15 de Diodes Incorporated. Este posee una $V_Z = 15V$, se busca polarizarlo con una corriente de $I_Z = 2mA$, y puede disipar hasta $P_D = 300mW$. Por ende, se puede estimar que su máxima corriente es $I_{Z_{MÁX}} \approx \frac{300mW}{15V} = 20mA$. Esto permite que cuando la tensión de la alimentación externa sea aproximadamente $15V + 0,7V + 0,7V = 16,4V$, se dispare completamente la protección. Es posible que se dispare previamente, no obstante, hay suficiente margen para garantizar la región de operación.

El transistor Q_4 , y la resistencia R_5 fueron colocados de esta forma para limitar la corriente que circula por el diodo Zener, ya que cuando se activa la protección, si sube la tensión hasta el caso el límite, es posible que supere la potencia disipada máxima con pequeñas corrientes a razón de la alta tensión de Zener. Para ello, se calcula,

$$R_5 = \frac{V_{EBON}}{I_Z} = \frac{0,7V}{2mA} = 350\Omega \Rightarrow R_5 = 330\Omega$$

$$P_{R_5 MÁX} = \frac{(V_{EBON})^2}{R_5} = 1,48mW$$

La resistencia R_3 se encuentra únicamente para fijar un nivel de tensión en la base del transistor cuando no se alcanza la condición de sobretensión, es decir, es un pull-up. Por ende, se busca un valor alto para evitar corrientes innecesarias. Se escoge $R_3 = 100k\Omega$, sin mayores restricciones de potencia.

La resistencia R_4 cumple dos funciones, por un lado, regula la corriente de polarización del transistor Q_3 , para garantizar que se encuentre en la región de saturación, y, por otro lado, regula la corriente mínima a la cual opera el diodo Zener D_3 . Dado que los transistores BJT de tipo PNP modernos suelen poseer ganancias de base a colector relativamente grandes, se asume que una corriente del orden de $10^{-3}A$ será suficiente para saturarlo. Partiendo de esto, lo único que dimensiona a esta resistencia será la polarización del diodo Zener. Se busca polarizarlo con una corriente de $I_Z = 2mA$ a partir de una tensión de 20V. Busca un disparo más abrupto no es un requerimiento, y puede provocar mayores consumos que reducen el grado de funcionamiento de la protección.

$$R_4 = \frac{20V - 0,7V - 0,7V - 15V}{2mA} = 1,8k\Omega$$

$$P_{R_4 MÁX} \approx \frac{(30V - 0,7V - 0,7V - 15V)^2}{1,8k\Omega} = 102,75mW$$

Para seleccionar los transistores Q_3 y Q_4 , principalmente se analiza la corriente y la potencia máximas de los mismos,

$$I_{Q_3 MÁX} \approx \frac{30V - 0,2V}{2,2k\Omega} = 13,54mA$$

$$P_{Q_3 MÁX} \approx 0,2V \cdot 18,09mA = 2,71mW$$

$$I_{Q_4 MÁX} = \left(\frac{30V - 0,7V - 15V}{100k\Omega} + \frac{30V - 0,7V - 0,7V - 15V}{1,8k\Omega} \right) - 2mA = 5,70mA$$

$$P_{Q_4 MÁX} \approx 15,7V \cdot 11,35mA = 178,195mW$$

Para satisfacer esto, se selecciona el modelo de transistor BC857 de onsemi. Finalmente, se comprueba que estos transistores poseen una ganancia mínima, en el peor de los casos, de 90. Para ese valor, el transistor siempre satura con la corriente de base dimensionada.

En la Tabla 6.26 se lista la elección de todos los componentes del circuito, incluyendo una columna con modelos compatibles para algunos componentes, en pos de minimizar los inconvenientes ocasionados por la falta de semiconductores a nivel mundial al momento de redactar este documento.

Componente	Especificaciones	Modelos compatibles
M_1	• $V_{W(DC)} > 14,4V$	• B72500D0150A060 de EPCOS - TDK Electronics

Q_1, Q_2	<ul style="list-style-type: none"> $I_{DS_{MÁX}} = 4,8A$ $P_{D_{MÁX}} > 1W$ $R_{DS(ON)} _{V_{GS}=4,5V} < 62,5m\Omega$ $V_{DS_{MÁX}} = 40V$ 	<ul style="list-style-type: none"> DMP4025LSS-13 de Diodes Incorporated AO4485 de Alpha & Omega Semiconductor Inc. RS3L110ATTB1 de Rohm Semiconductor
D_1, D_2	<ul style="list-style-type: none"> $V_Z = 5,1V$ Debe polarizar aceptablemente con $I_Z = 2mA$ $P_{D_{MÁX}} > 370mW$ 	<ul style="list-style-type: none"> MMSZ5231B de Diodes Incorporated
R_1, R_2	<ul style="list-style-type: none"> $R = 2,2k\Omega$ $P_{MÁX} = 1W$ 	<ul style="list-style-type: none"> RMCF2512JT2K20 de Stackpole Electronics Inc
D_3	<ul style="list-style-type: none"> $V_Z = 15V$ Debe polarizar aceptablemente con $I_Z = 2mA$ $P_{D_{MÁX}} > 300mW$ 	<ul style="list-style-type: none"> BZX84C15 de Diodes Incorporated
R_5	<ul style="list-style-type: none"> $R = 330\Omega$ $P = 100mW$ 	<ul style="list-style-type: none"> RMCF0603JT330R de Stackpole Electronics Inc
R_3	<ul style="list-style-type: none"> $R = 100k\Omega$ $P = 100mW$ 	<ul style="list-style-type: none"> RMCF0603JT100K de Stackpole Electronics Inc
R_4	<ul style="list-style-type: none"> $R = 1,8k\Omega$ $P = 0,5W$ 	<ul style="list-style-type: none"> CRM1206-FX-1801ELF de Bourns Inc.
Q_3, Q_4	<ul style="list-style-type: none"> $h_{FE_{MÍN}} > 90$ $I_{C_{MÁX}} > 100mA$ $P_{D_{MÁX}} > 250mW$ 	<ul style="list-style-type: none"> BC857 de onsemi

Tabla 6.26: Resumen de componentes de la protección.

6.2. Software

Existen dos grandes componentes que hacen al software del presente proyecto, identificados primordialmente por el hardware en el que corren. De aquí en más, estas dos partes serán referidas como GraVR SDK y Firmware, siendo la primera aquella que corre en la plataforma de realidad virtual (Meta Quest 2), y la segunda en el microcontrolador ESP32.

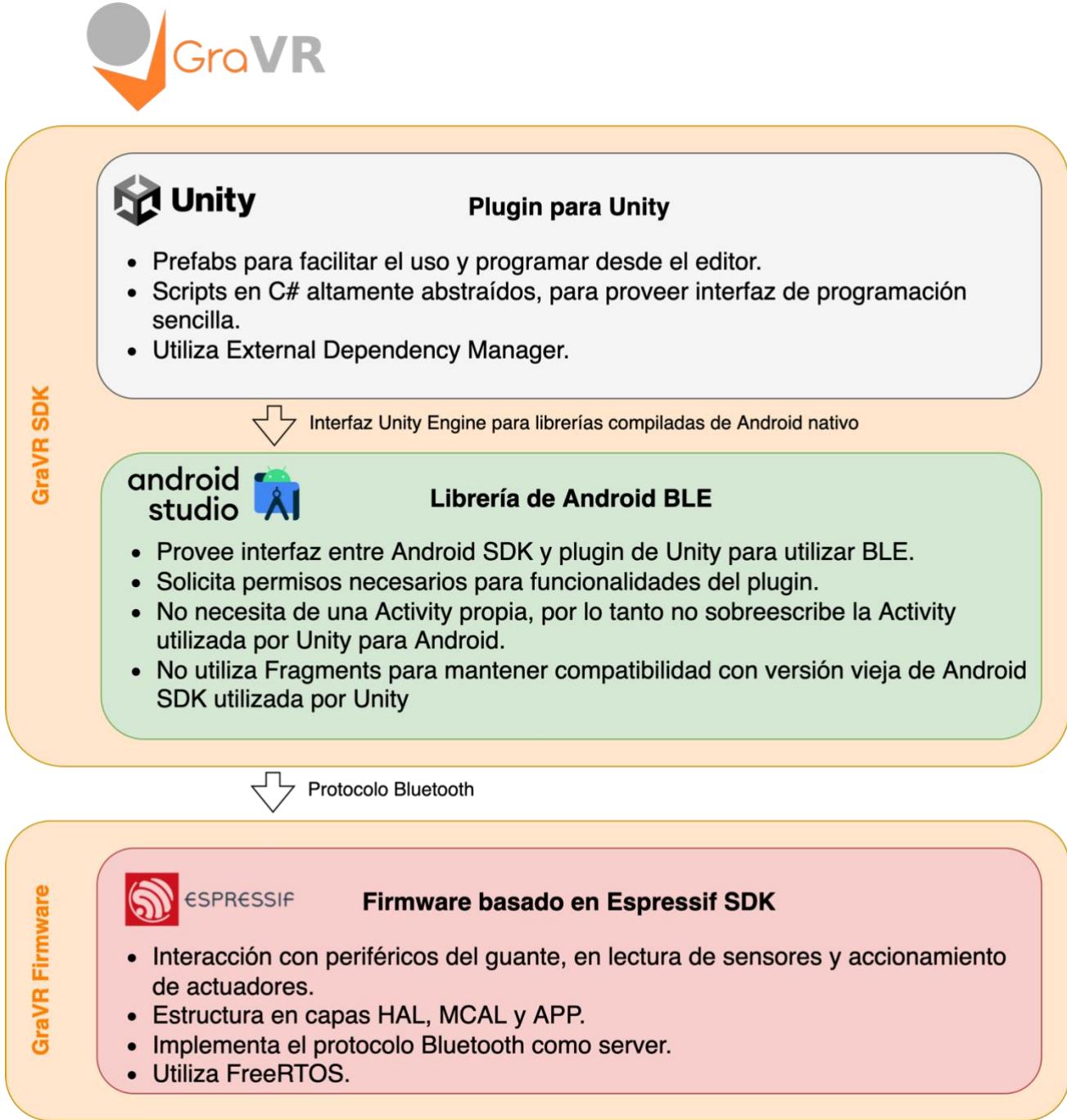


Ilustración 6.33: Diagrama macro de componentes de software de GraVR.

La Ilustración 6.33: Diagrama macro de componentes de software de GraVR. provee una visión general de los módulos que componen todo el software de GraVR, así como algunas de sus características y funciones fundamentales, que serán más extensamente explicadas en las secciones por venir.

6.2.1. GraVR SDK

En este documento se denomina GraVR SDK a todo aquel software que es ejecutado en el Meta Quest 2, y cuyo principal objetivo, es el de proveer herramientas de desarrollo a los programadores que estén interesados en incorporar la tecnología de GraVR a sus juegos o aplicaciones de realidad virtual. A la fecha, la herramienta standard para la programación de aplicaciones para el Quest 2, es *Unity Engine*: un motor de videojuegos (aunque también muy utilizado para aplicaciones con otros propósitos) multiplataforma, con una amplia gama de herramientas disponibles para el desarrollo XR.

La Ilustración 6.34: Interfaz de Unity Engine versión 2021. ejemplifica un *layout* usual de la interfaz de *Unity*; en ella se pueden distinguir cuatro sectores fundamentales: la escena, el árbol de componentes de la escena, el inspector del componente seleccionado actualmente, y el navegador de los recursos del proyecto. El primero muestra de forma gráfica que componentes se ven en la escena que se está creando, de una manera cercana a cómo se verá luego en la app/juego. El árbol de componentes organiza y jerarquiza los componentes de la escena, y facilita su selección para edición en el inspector. Y finalmente desde el navegador, se tiene acceso a todos los recursos (*prefabs* y *scripts*) del proyecto, para poder incorporarlos a la escena. Se entiende por “*prefab*” a un componente complejo, con una funcionalidad específica, listo para ser incorporado a una escena como un “paquete funcional”; usualmente, los *prefabs* tienen un cuerpo 3D visible en la escena. Por el contrario, los *scripts* no tienen esta característica, y son más simples; también poseen una funcionalidad específica, pero esta funcionalidad suele ser más sencilla, o con menos valor agregado que el de un *prefab*. Usualmente, los *scripts* se incorporan a un *prefab* (o cualquier otro componente de la escena) para dar o modificar algún comportamiento particular.

La razón fundamental de existencia del GraVR SDK es la de proveer un *plugin* para *Unity*, que contenga, esencialmente, *scripts* y *prefabs* que faciliten la incorporación del guante GraVR, a las interacciones de la app/juego.



Ilustración 6.34: Interfaz de Unity Engine versión 2021.

Para poder facilitar un *plugin* para *Unity*, el GraVR SDK debe ser subdividido en dos módulos: el *plugin* propiamente dicho, y una librería de Android cuya función principal sea la de implementar el protocolo Bluetooth Low Energy para el cliente, corriendo en el Meta Quest 2. Este segundo componente se hace necesario debido a que el Quest 2 funciona bajo una versión del sistema operativo Android, y este expone el manejo del Bluetooth a través del Android SDK, disponible

únicamente en el lenguaje Java o Kotlin. Por su parte, el *plugin* de *Unity* debe exponer una interfaz en C#, lenguaje utilizado en todo el ecosistema de *Unity*.

6.2.1.1. GraVR Unity Plugin

A la hora de agregar componentes o funcionalidades en el ecosistema de *Unity*, es una práctica muy común la de hacerlo a través de *plugins*. Esta sección explorará las características fundamentales del *plugin* implementado para que desarrolladores incorporen GraVR a sus proyectos, enfocándose en la interfaz proporcionada, y la arquitectura con la que fue diseñado.

Interfaz

A continuación se presenta una serie de tablas con el listado de los componentes fundamentales del *GraVR Unity Plugin*, que conforman la interfaz con la que el programador podrá interactuar.

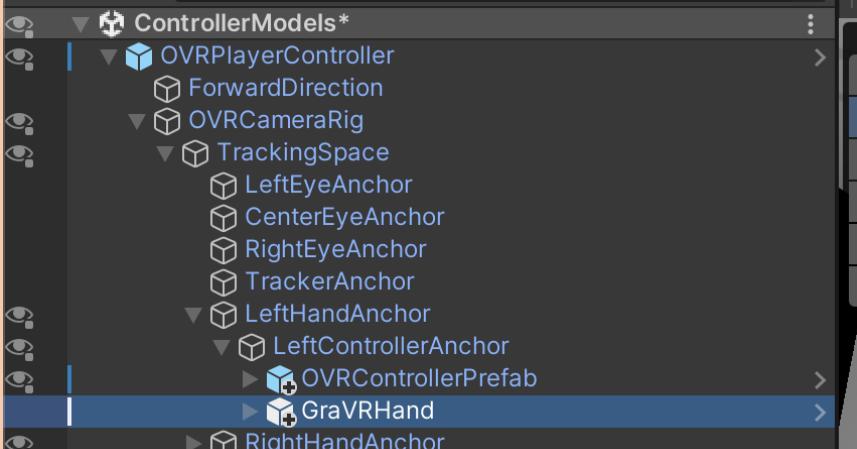
GraVR Prefabs	
GraVR Hand Prefab	<p>Viene en variantes L (izquierda) y R (derecha) modificable desde el Inspector. Es la pieza fundamental de la interfaz del <i>plugin</i>, destinada a incorporarse a la jerarquía de prefabs provistos por el Oculus Plugin. Para su correcto funcionamiento, debe ser colocada dentro de “LeftControllerAnchor” o “RightControllerAnchor”, según corresponda.</p>  <p>Además de proporcionar un objeto 3D en forma de mano virtual para tener feedback visual de los movimientos dentro del juego, incorpora los <i>scripts</i> necesarios para automáticamente conectarse y comunicarse vía BLE con el guante GraVR, y modificar la posición de los dedos virtuales conforme a la información de los sensores. Será posible modificar la apariencia visual de la mano mediante distintos materiales, y ofrecerá <i>callbacks</i> para interactuar con <i>Force</i>, <i>Pressure</i> y <i>Vibration Feedback</i>.</p>

Tabla 6.27: Prefabs ofrecidos por GraVR Unity Plugin.

Vinculados al *prefab*, se incluyen una serie precargada de posiciones de la mano y dedos automáticamente detectadas, que se exponen en forma de eventos.

GraVR Hand Pose Events	
PinchEvent 	Condición: juntar dedos pulgar e índice, manteniendo el resto de los dedos apreciablemente separados. Gesto muy utilizado en el software de Meta Quest 2 para “clickear” un elemento seleccionado.
PointEvent 	Condición: dedo índice extendido, mayor, anular y meñique flexionados. De uso frecuente para seleccionar o apuntar a algo en el entorno virtual.

AllGoodEvent	Condición: pulgar extendido y abducido respecto del índice, y luego resto de los dedos flexionados completamente. Utilizado como indicador de "Todo en orden", "OK".
RockNRollEvent	Condición: pulgar extendido y abducido respecto del índice, índice y meñique extendidos, mayor y anular flexionados completamente. De usos varios, mayormente recreativos.

Tabla 6.28: Poses de la mano que el plugin detecta por defecto, y ofrece eventos para que el programador provea acciones como consecuencia del evento.

De forma análoga, se ofrecen accionamientos combinados de *Force*, *Pressure* y *Vibration Feedback* para facilitarle al programador la interacción con algunos objetos y formas comúnmente usados. Estas interacciones se ofrecerán en forma de funciones que pueden ser llamadas por el programador, o configuradas como callbacks ante eventos.

GraVR Simple Interactions		
Interacción	Descripción	Feedback involucrado
GrabCylinder	Recibe como parámetro el diámetro del cilindro a agarrar. Frena los dedos para que no puedan cerrarse más allá del diámetro del cilindro, acciona presión en todos los dedos, y vibración en la palma. Útil para interacciones de tipo agarre de instrumento con empuñadura (espadas, por ejemplo), manubrios, palancas, etc.	Force, Pressure, Vibration
GrabSphere	Recibe como parámetro el diámetro de la esfera a agarrar. Frena los dedos para que no puedan cerrarse más allá del diámetro de la esfera, acciona presión en todos los dedos, y vibración en la palma. Útil en interacción con elementos esféricos o similar, como pelotas.	Force, Pressure, Vibration
Wield	Pensado para la empuñadura de armas de tiro. Recibe como parámetro el diámetro del "cilindro" a agarrar. Frena los dedos para que no puedan cerrarse más allá del diámetro del cilindro, acciona presión en todos los dedos, y vibración en la palma. La diferencia fundamental con GrabCylinder es que a un diámetro mayor al del cilindro ejerce una vibración fuerte sobre el dedo índice, indicando que se está apretando el gatillo. Útil para multiplicidad de juegos que requieren uso de armas de tiro.	Force, Pressure, Vibration
Pinch	Recibe como parámetro la distancia entre pulgar e índice a la cual frenar estos dedos. Frena los dedos pulgar e índice, y ejerce presión sobre estos dos dedos. Útil para interacción con pequeños objetos.	Force, Pressure

Tabla 6.29: Interacciones de uso común pre-empaquetadas para facilidad del programador.

Para interacciones más complejas, detallistas o exigentes, se provee una interfaz de más bajo nivel, donde se permite elegir el tipo de acción específica y por separado, de *Force*, *Pressure* y *Vibration Feedback*. A continuación se detallan los métodos a emplear para tal fin.

GraVR Complex Interactions	
setForce(diameters[])	Recibe un arreglo de 5 diámetros (uno por dedo) a los cuales el <i>Force Feedback</i> debe frenar cada dedo de flexionarse.
setSingleForce(diameter, finger)	Frena el dedo `finger` (de 0 a 4) de flexionarse más allá de un diámetro `diameter`.
releaseForce()	Libera el movimiento de todos los dedos, en lo que respecta a <i>Force Feedback</i> .

setPressure(pressure[])	Recibe un arreglo de 5 valores de presión (uno por dedo) los cuales el <i>Pressure Feedback</i> debe aplicar a cada dedo.
setSinglePressure(pressure, finger)	Aplica una presión `pressure` el dedo `finger` (de 0 a 4).
releasePressure()	Deja de realizar presión sobre todos los dedos, en lo que respecta a <i>Pressure Feedback</i> .
vibrate(vibrator, intensity, duration)	Pone al vibrador `vibrator` a vibrar a una intensidad `intensity` por un tiempo `duration`.
vibrate(vibrator, waveformID)	Ordena al vibrador `vibrator` realizar la vibración con forma de onda dada por `waveformID`.
vibrate(vibrator, waveformIDs[])	Ordena al vibrador `vibrator` realizar las vibraciones dadas por el arreglo `waveformIDs[]` de forma concatenada. Se permiten hasta 8 formas de onda concatenadas.
vibrateAll(intensity, duration)	Hace a todos los vibradores vibrar con una intensidad `intensity` por un tiempo `duration`.
vibrateAll(waveformID)	Ordena a todos los vibradores realizar la vibración con forma de onda dada por `waveformID`.
vibrateAll(waveformIDs[])	Ordena a todos los vibradores realizar las vibraciones dadas por el arreglo `waveformIDs[]` de forma concatenada. Se permiten hasta 8 formas de onda concatenadas.
vibrateFingers(intensity, duration)	Hace a todos los vibradores de los dedos vibrar con una intensidad `intensity` por un tiempo `duration`.
vibrateFingers(waveformID)	Ordena a todos los vibradores de los dedos realizar la vibración con forma de onda dada por `waveformID`.
vibrateFingers(waveformIDs[])	Ordena a todos los vibradores de los dedos realizar las vibraciones dadas por el arreglo `waveformIDs[]` de forma concatenada. Se permiten hasta 8 formas de onda concatenadas.
vibratePalm(intensity, duration)	Hace a todos los vibradores de la palma vibrar con una intensidad `intensity` por un tiempo `duration`.
vibratePalm(waveformID)	Ordena a todos los vibradores de la palma realizar la vibración con forma de onda dada por `waveformID`.
vibratePalm(waveformIDs[])	Ordena a todos los vibradores de la palma realizar las vibraciones dadas por el arreglo `waveformIDs[]` de forma concatenada. Se permiten hasta 8 formas de onda concatenadas.

Tabla 6.30: Interacciones complejas para aplicaciones con necesidad de comportamientos específicos.

Arquitectura

La Ilustración 6.35: Estructura de directorios de GraVR Plugin. grafica la estructura de directorios elegida para el GraVR Plugin, y esta no es casual ni arbitraria. Se tienen en cuenta las prácticas más comúnmente usadas en la organización de *plugins* para Android, separando en *Scripts* y *Prefabs* primordialmente. En el primer nivel de profundidad, además de los dos directorios mencionados, se encuentran los archivos *AndroidManifest.xml* y *gravrblelibrary.aar*, cuyas funciones son

las de declarar permisos requeridos por este *plugin* al sistema operativo Android, y empaquetar la *GraVR BLE Android Library* escrita en Kotlin, ya compilada, respectivamente. Por último, se tiene el directorio *Editor*, que junto con el archivo *GraVRDependencies.xml*, siguen las indicaciones del *plugin External Dependency Manager* para la resolución automática de dependencias de Android.

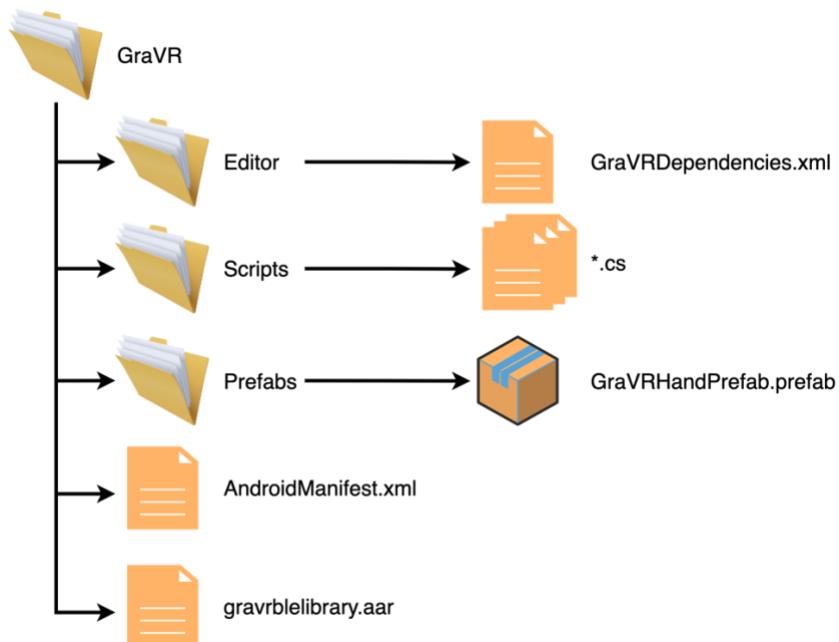


Ilustración 6.35: Estructura de directorios de GraVR Plugin.

El uso de External Dependency Manager es una parte importante de este *plugin*. Desarrollado por Google, ofrece la funcionalidad de autogestionar las dependencias de librerías tanto para Android como iOS, en proyectos de Unity que hacen uso de uno o más *plugins*. Al integrarlo en el GraVR Plugin, se permite a los programadores hacer uso del External Dependency Manager en sus proyectos, para evitar conflictos de dependencias entre nuestro *plugin* y otro que estén usando en sus proyectos.

Finalmente, cabe remarcar la función de uno de los archivos incluidos dentro de la carpeta *Scripts*: *BLEHelper.cs*. Este *script* en particular, utilizado por *GraVRHandPrefab*, proporciona el puente entre la librería compilada *gravrblelibrary.aar* y el resto de los *scripts* en C#. Mediante objetos provistos por *Unity Engine*, y prácticas que permiten la interoperabilidad entre código en Kotlin/Java y C#, empaqueta los métodos de la librería compilada de Android, y los expone de forma sencilla para el resto del entorno de Unity. Dado que la principal función de la librería de Android es la de implementar el protocolo Bluetooth, *BLEHelper.cs* tiene como razón de ser, intercambiar los datos recibidos vía el protocolo, y distribuirlos al resto de los *scripts* que gobiernan el comportamiento del prefab.

6.2.1.2. GraVR BLE Android Library

Como fue descripto en secciones anteriores, la razón de ser de esta librería para Android es la de implementar el lado del *client* del protocolo Bluetooth. En los siguientes párrafos se detallará su interfaz, así como la arquitectura con la que fue diseñado.

Interfaz

La interfaz de esta librería recae fundamentalmente en la clase *BLEHelper*, definida en el archivo *BLEHelper.kt*, y que sigue el patrón de diseño “Singleton”, es decir, una clase que solo puede ser instanciada una vez en todo el proyecto. A continuación se presenta una tabla con los métodos públicos de esta clase, que son relevantes para las capas superiores que hacen uso de ella.

GraVR BLE Android Library

getHelper(activity)	Devuelve la única instancia de BLEHelper existente, y en caso de no existir una todavía, crea tal instancia. Recibe una Activity ⁶ , la cual utiliza para iniciar procesos concurrentes, administrar permisos y escuchar eventos.
initHelper(isQuest)	Verifica que estén aprobados los permisos ACCESS_FINE_LOCATION y BLUETOOTH_CONNECT del sistema operativo Android, y que esté habilitado el Bluetooth; de no cumplirse alguno de los casos, espera a que el usuario otorgue los permisos y habilite el Bluetooth. Funciona de forma no bloqueante mediante una Kotlin Coroutine ⁷ . El parámetro “isQuest” existe para mantener la generalidad de funcionamiento de la librería para cualquier dispositivo Android, pero para el uso específico de este proyecto, será siempre verdadero. Su existencia se debe a la particular versión de Android que corre en el Meta Quest 2, la cual tiene siempre habilitado el Bluetooth, y no permite al usuario modificarlo.
connectToGraVR()	Inicia la búsqueda de un GraVR BLE Server (versión del protocolo BLE corriendo en el ESP32) para conectarse. Funciona de forma no bloqueante mediante una Kotlin Coroutine ⁷ . La búsqueda se considera exitosa cuando se cumplen dos criterios: Se encuentra un <i>BLE server</i> con el <i>custom UUID</i> generado por GraVR de manera aleatoria, y el nombre del servicio es “GraVR”. Un <i>custom UUID</i> está copuesto por 16 bytes, y se estima que la probabilidad de encontrar 2 iguales en el rango de búsqueda de un dispositivo Bluetooth, es de 1 en mil millones. Si a esto se le suma que el nombre del servicio debe ser “GraVR”, la certeza de estar conectándose a un dispositivo apropiado es muy alta. Una vez realizada la conexión, se lee y se valida la información proporcionada por el guante (como versiones de protocolo, software y hardware), y se procede a buscar las <i>BLE characteristics</i> que representan los distintos canales de comunicación entre el guante y la plataforma de realidad virtual (ver Protocolo Bluetooth para más información).
sendForcePkg(pkg)	Envía un paquete de información sobre los valores de <i>Force Feedback</i> que se deben aplicar en el guante, a través de la <i>BLE characteristic</i> correspondiente. Funciona de forma no bloqueante mediante una Kotlin Coroutine ⁷ .
sendPressurePkg(pkg)	Envía un paquete de información sobre los valores de <i>Pressure Feedback</i> que se deben aplicar en el guante, a través de la <i>BLE characteristic</i> correspondiente. Funciona de forma no bloqueante mediante una Kotlin Coroutine ⁷ .
sendVibrationPkg(pkg)	Envía un paquete de información sobre los valores de <i>Vibration Feedback</i> que se deben aplicar en el guante, a través de la <i>BLE characteristic</i> correspondiente. Funciona de forma no bloqueante mediante una Kotlin Coroutine ⁷ .
readFingerSensor(fingerSensor)	Lee los últimos valores guardados de la lectura de los sensores de <i>Finger Tracking</i> . Estos valores fueron actualizados por una Kotlin Coroutine ⁷ aparte, cuando los mismos fueron enviados por el guante GraVR de forma periódica.

⁶ Componente fundamental de una aplicación de Android. Representa una “pantalla” de la aplicación, con capacidad de escuchar eventos e iniciar la ejecución de tareas concurrentes.

⁷ Tarea que corre de forma concurrente en Android. Es una implementación del lenguaje Kotlin, más eficiente en recursos y más rápida que las tradicionales *threads*.

readBattery()

Lee el último valor guardado del estado de la batería. Este valor fue actualizado por una Kotlin Coroutine⁷ aparte, cuando los mismos fueron enviados por el guante GraVR de forma periódica.

Tabla 6.31: Interfaz de GraVR BLE Android Library.

Arquitectura

Además de la clase *BLEHelper*, a la librería la completan las clases *EnableBtActivity*, *RequestBluetoothConnectActivity* y *RequestFineLocationAccessActivity*, ubicadas cada una en archivos homónimos, y escritas en Kotlin. Su función está descripta en su nombre, y es altamente específica: estas son Activities⁶ cuyo ciclo de vida es muy corto, y deben ser creadas y destruidas una vez cumplido su propósito. Estos propósitos son los de habilitar el Bluetooth, solicitar el permiso BLUETOOTH_CONNECT, y solicitar el permiso ACCESS_FINE_LOCATION, respectivamente. La razón detrás de la decisión de diseño de tener estas Activities requiere contextualización sobre el funcionamiento de las aplicaciones para Android desarrolladas en Unity.

Todas las aplicaciones desarrolladas mediante *Unity Engine* y compiladas para Android, funcionan mediante una única Activity⁶ propia de Unity. Esta Activity, además de contener el diseño gráfico e interfaz gráfica, se encarga de manejar los eventos e interacciones necesarias para el funcionamiento de la aplicación, es decir, si se sale de esta Activity, deja de funcionar todo lo desarrollado a través de Unity. En condiciones normales, esto no representa un problema, pero se convierte en uno cuando un *plugin* para Unity, desarrollado en código nativo de Android (como el de este proyecto), necesita también reaccionar ante eventos. Para el caso de GraVR, eso se da al solicitar permisos y la activación del Bluetooth, ya que la forma en la que esto se maneja en Android SDK, es mediante la suscripción a eventos del sistema.

A la fecha de este informe, las versiones más modernas de Android SDK ofrecen mecanismos alternativos para suscribirse a esos eventos, sin la necesidad de crear una nueva Activity, y esto es a través de Fragments, que pueden ser interpretados como subcomponentes de una Activity, con buena parte de sus funcionalidades. Sin embargo, la creación de estos Fragments solo es posible desde una *FragmentActivity*. Las aplicaciones de Android modernas están basadas en Activities cuya clase es *AppCompatActivity*, la cual hereda de *FragmentActivity*, pero la Activity que utiliza *Unity Engine*, y que hereda para el manejo de todo su funcionamiento en Android, es de tipo Activity a secas, algunos niveles por debajo en cadena de herencias respecto de *FragmentActivity*. En conclusión, crear Fragments desde la Activity de Unity, no es una opción.

Para este tipo de situaciones donde un *plugin* requiere acceder a eventos, Unity ofrece un mecanismo que sortea este problema, y se basa en configurar internamente el proyecto en Unity para heredar la *UnityPlayerActivity* (la clase de la Activity que usa Unity, y que hereda de Activity), y que esta Activity heredada sea el punto de entrada de la aplicación. El principal problema de esta solución, es que esto solo puede realizarlo un *plugin* por vez, o en todo caso, que los *plugins* vayan heredando uno a otro esta Activity. Esto implicaría que el programador que quiere incorporar GraVR a su aplicación de realidad virtual, esté limitado a no usar otros *plugins* que requieran heredar *UnityPlayerActivity*, o en todo caso, modificar el código de alguno de los dos *plugins* para ensamblarlos en uno solo, y por lo tanto en una sola Activity.

Ambas situaciones previamente descriptas no ofrecen el grado de abstracción deseado por este proyecto, para con el programador/cliente, y es por eso que en la búsqueda de soluciones alternativas, se llegó a la arquitectura propuesta para la librería, en la cual todas las funcionalidades que requieren la atención a eventos se atomizan en Activities separadas. Efectivamente esto resulta en que mientras estas Activities estén activas, todas las funcionalidades ofrecidas por la Activity de Unity quedan inactivas, pero mientras estas funciones sean todas con resultados en el corto plazo (como pedir permisos al usuario), el compromiso es tolerable.

La arquitectura de esta librería queda completa con el archivo *build.gradle* correspondiente a este módulo. Este es un tipo de archivo que describe al compilador de Android las dependencias del mismo, sus versiones, las versiones de Android soportadas, entre otros.

6.2.2. Protocolo Bluetooth

El protocolo Bluetooth es el canal de comunicación entre GraVR SDK y el firmware siendo ejecutado en el guante GraVR, es el nexo entre las dos partes que conforman el software de este proyecto. Está basado en el *standard* de comunicación Bluetooth Low Energy, versión de Bluetooth pensada principalmente para aplicaciones de IoT. Este *standard* funciona mediante la interacción entre *servers* que publican servicios, y *clients* que los buscan y se conectan a ellos. Los servicios son identificados por un UUID (*Universally Unique Identifier*) de 16 bytes, y cada servicio puede tener varias

características, también identificadas con un UUID de 16 bytes. Existen algunos servicios y características, que, por su uso masivo, el *standard* les asigna UUIDs específicos de menor tamaño, que pueden ser de 2 o 4 bytes (16 o 32 bits), o también varios de estos UUIDs reducidos son comprados por empresas para su uso exclusivo. Un ejemplo de un UUID de 2 bytes asignado por su uso frecuente es el de la característica *Heart Rate Measurement*, cuyo valor es 0x2A37 (en hexadecimal)⁸.

Debido a que el servicio que ofrece el guante de GraVR no recae en alguno de los ya fijados, debe recurrirse al uso de *custom* UUIDs. Está estimado que la probabilidad de encontrar 2 iguales en el rango de búsqueda de un dispositivo Bluetooth, es de 1 en mil millones, y estos UUIDs pueden ser generados⁹ de forma aleatoria mediante servicios gratuitos online.

A su vez, cada característica BLE puede poseer varias propiedades, que definen su tipo de acceso. Las propiedades relevantes a este proyecto son de escritura (el *client* puede escribir un valor al *server* de manera asíncrona), lectura (el *client* puede leer un valor que publica el *server* de manera asíncrona), y notificación (el *client* recibe de forma sincrónica y periódica, valores escritos por el *server*).

⁸ Se pueden ver todas las características y servicios de 2 y 4 bytes asignados en este [link](#).

⁹ Un ejemplo de un generador online, y el utilizado para este proyecto, puede ser encontrado [aqui](#).

6.2.2.1. Características BLE

La Ilustración 6.36: Características del Protocolo Bluetooth GraVR. presenta la lista de características que ofrece el servicio BLE de GraVR, junto con una breve descripción de sus paquetes.

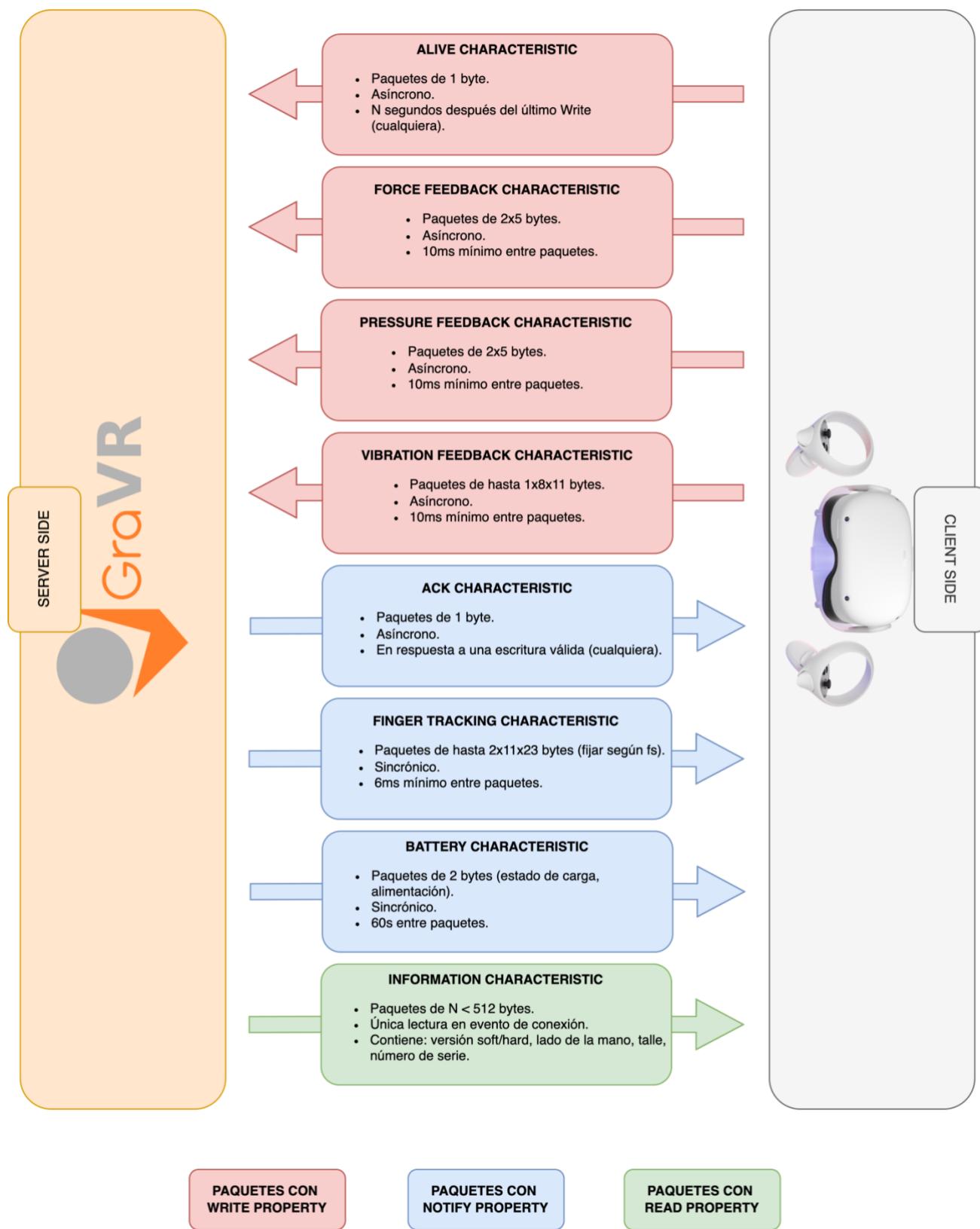


Ilustración 6.36: Características del Protocolo Bluetooth GraVR.

Las características en rojo poseen propiedad de escritura, en azul aquellas con propiedad de notificación, y en verde con propiedad de lectura. La principales características de todas las mencionadas, son las de *Force Feedback*, *Pressure Feedback*, *Vibration Feedback*, *Finger Tracking* y *Battery*, ya que son las que aseguran el funcionamiento del sistema. Como sus nombres lo describen, su función es la de transmitir información de actuación para los sistemas de *Force Feedback*, *Pressure Feedback* y *Vibration Feedback*, y mantener al Quest 2 informado periódicamente de cambios en los valores leídos de los sensores para *Finger Tracking*, y del estado de la batería.

La lista de características la completan *Alive* (mantiene la conexión ante ausencia de escrituras en un determinado tiempo), *ACK* (informa al *client* que su escritura fue recibida correctamente), e *Information*. Esta última es leída por el *client* en el primer momento de conexión para obtener información relevante del dispositivo GraVR con el que se está conectando; da detalles de versión del protocolo, software y hardware (para validar compatibilidades), el lado de la mano al que corresponde el guante (izquierda o derecha), el tamaño del guante y número de serie del dispositivo.

6.2.2.2. Detalles de cada paquete

En esta sección se hará referencia a los detalles constitutivos de los paquetes enviados por cada característica BLE, los cuales se muestran en la Ilustración 6.37: Detalle de paquetes del protocolo BLE.. En la figura, se explica para cada característica la composición de los paquetes, tanto en contenido como en tamaño en bits.

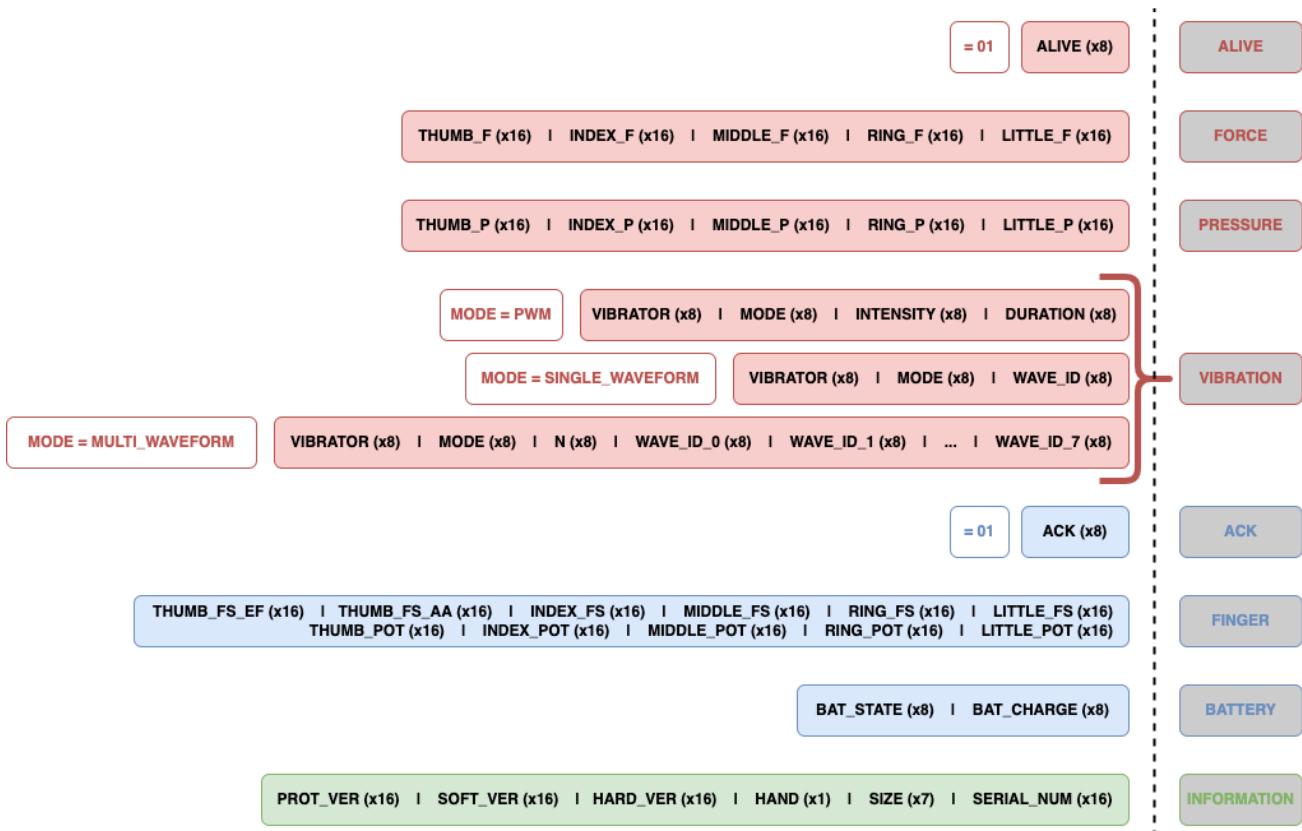


Ilustración 6.37: Detalle de paquetes del protocolo BLE.

- ALIVE CHARACTERISTIC: Su valor es siempre 1.
- FORCE FEEDBACK CHARACTERISTIC: Contiene valores entre 0 y 65535 para cada dedo.
- PRESSURE FEEDBACK CHARACTERISTIC: Contiene valores entre 0 y 65535 para cada dedo.
- VIBRATION FEEDBACK CHARACTERISTIC: Su composición varía según el valor del byte MODE, que puede tomar los valores PWM=00, SINGLE_WAVEFORM=01 o MULTI_WAVEFORM=02 (valores fijados por *defines* en el SDK, para conveniencia del programador). El byte VIBRATOR hace referencia a cuál de los vibradores se está queriendo manejar, y WAVE_ID podrá tomar valores prefijados dentro de una lista, que hacen referencia a diferentes formas de onda que el vibrador puede reproducir. INTENSITY y DURATION pueden tomar valores entre 0 y 255. **Importante:** ante dos escrituras consecutivas en el modo SINGLE_WAVEFORM, la última sobreescribe e interrumpe a la primera.

- ACK CHARACTERISTIC: Su valor es siempre 1.
- FINGER TRACKING CHARACTERISTIC: Contiene los valores de lectura de todos los *flex sensors* y potenciómetros, en un lote de 23 valores por sensor. Cada valor puede ir de 0 y 65535.
- BATTERY CHARACTERISTIC: Contiene un valor booleano para indicar conexión o no a la fuente de alimentación, y un valor de 0 a 255 para indicar el estado de carga de la batería.
- INFORMATION CHARACTERISTIC: La versión del protocolo es siempre el primer valor, para asegurar que a su lectura, el *client* sepa que va a poder leer el resto de la información enviada.

6.2.3. Firmware

En este documento se denomina *Firmware* a todo el software que es ejecutado en el microcontrolador ESP32. El lenguaje de programación que se utiliza es el lenguaje C++, que es orientado a objetos y de nivel medio, es decir, que provee las estructuras típicas de un lenguaje de alto nivel, pero a su vez permite tener un control de bajo nivel sobre la aplicación.

El objetivo principal del *Firmware* es realizar la interacción con los periféricos del guante, acceder a la lectura de los sensores y el acondicionamiento de los actuadores. La arquitectura del *Firmware* es de vital importancia ya que el microcontrolador debe correr muchas tareas en paralelo, y a la hora de encontrarse limitado con los recursos que posee, debe tener bien definidas las prioridades para saber cómo actuar.

6.2.3.1. Arquitectura en capas

El *Firmware* está dividido en tres capas bien distinguidas como se puede ver en la Ilustración 6.38. Por un lado, la capa MCAL (*Microcontroller Abstraction Layer*), es el nivel más bajo de la estructura, son los *drivers* que se comunican directamente con los periféricos del microcontrolador, y es la capa encargada de hacer que las capas siguientes se puedan abstraer del microcontrolador.

Luego la capa HAL (*Hardware Abstraction Layer*) que por una cuestión de las funciones que cumplen los módulos, se la separa en HAL I y HAL II. La primera contiene los 3 módulos encargados de suplir la falta de pines del ESP32 para el funcionamiento deseado, y además un módulo llamado “I²C Handler”, que se ubica como parte de la capa HAL y la MCAL, ya que no es *Hardware* externo, pero se encarga de definir las prioridades y de delegar el uso de la comunicación I²C para todos los bloques que lo requieran. Luego, la capa HAL II provee a la aplicación todas las funciones necesarias para utilizar el dispositivo de la forma deseada. Los módulos de dicha capa cumplen las siguientes funciones:

- *Current sensing*: Permite a la aplicación obtener la información de la corriente total requerida por el producto.
- *Pressure Feedback*: Permite elegir cuanta presión a aplicarle a un determinado dedo.
- *Finger Tracking*: Permite obtener la información sobre la posición de los 5 dedos en ese preciso momento.
- *Led*: Permite cambiar el color y el modo de la luz led para informarle al usuario los diferentes escenarios.
- *Button*: Avisa a la aplicación cuando el botón de prendido y apagado es presionado.
- *Battery*: Informa los estados del proceso de carga.
- *Force Feedback*: Permite enviarle la orden a un determinado motor para que frene al dedo en un determinado ángulo.
- *Vibration Feedback*: Permite seleccionar que motor/es y en qué modo hacerlo/s vibrar.
- *Fuel Gauge*: Informa a la aplicación el estado de carga de la batería con un margen de seguridad, y mide la tensión de la batería.

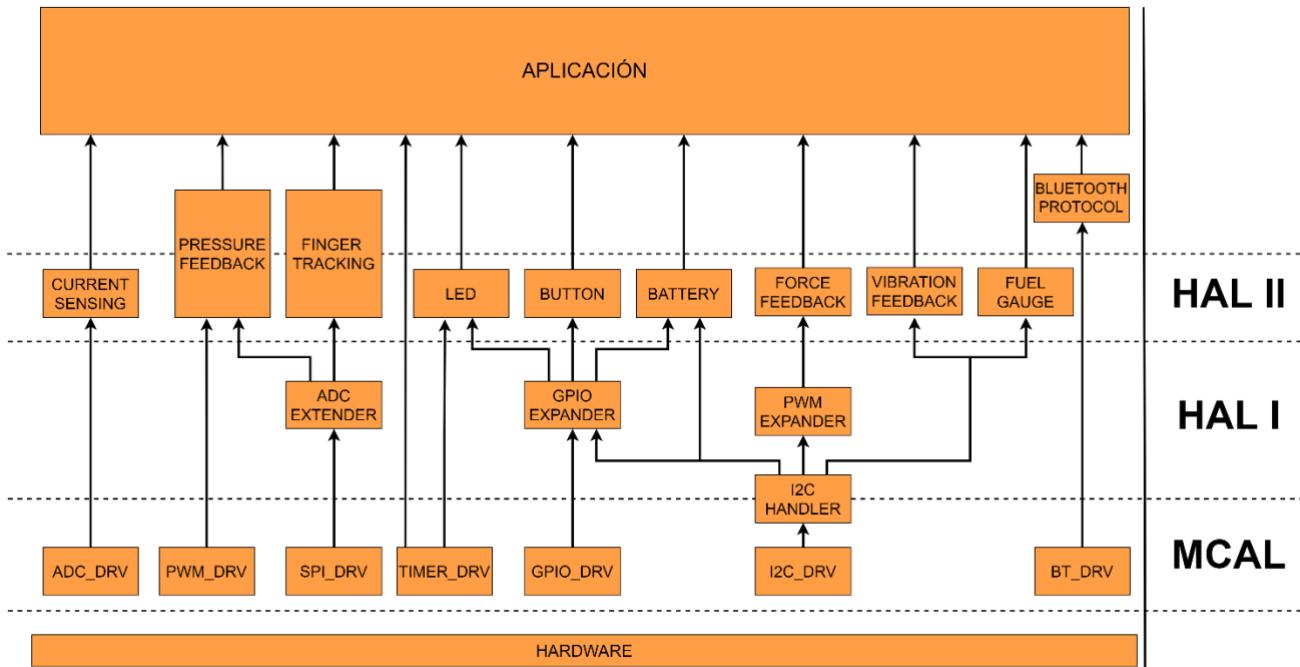


Ilustración 6.38: Diagrama en capas del Firmware.

6.2.3.2. Diagrama de estados

La Ilustración 6.39 muestra el diagrama de estados general que representa el funcionamiento del guante. Inicialmente, cuando el guante está apagado, el microcontrolador se encuentra en estado de apagado. Cuando le llega la señal de que se mantuvo apretado el botón de encendido, "SW_HELD", se entra al estado "GLOVE ON" en donde el MCU está continuamente publicando su servicio BLE para que una plataforma de realidad virtual pueda conectarse, lo cual es indicado por la luz led con un parpadeo de color azul, hasta que se conecta. Luego comienza el funcionamiento normal del guante y la luz led se mantiene prendida de color azul. Si se presiona el botón de apagado se entra al estado "SWITCH PRESSED", y si se mantiene presionado por 3 segundos se apaga el MCU. De no ser así vuelve al estado de funcionamiento normal. En cualquiera de los estados mencionados, si el dispositivo se queda sin batería, se entra al estado "NO BATTERY", indicado por la luz led con un destello de color rojo, para que el microcontrolador finalice los procesos que estaban siendo ejecutados y, una vez realizado esto, apagarse.

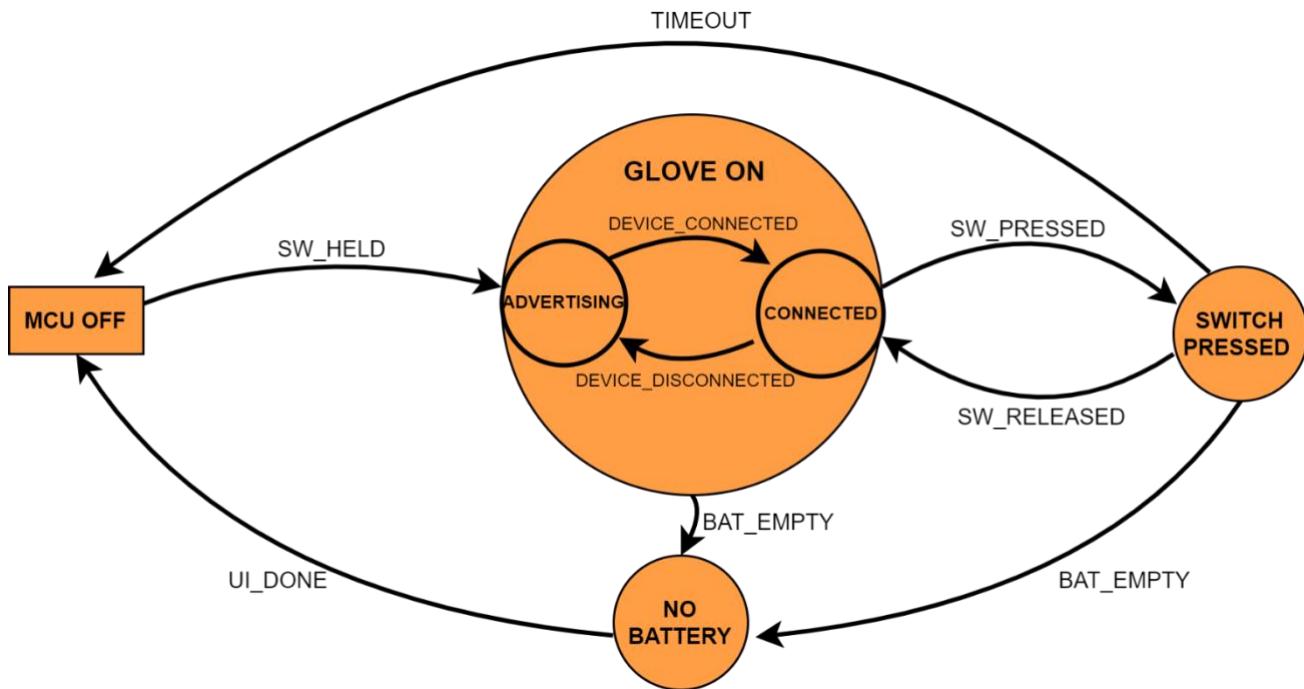


Ilustración 6.39: Diagrama de estados del Firmware.

6.2.3.3. Tareas del microcontrolador

Cuando el microcontrolador se encuentra en el estado “CONNECTED” de la Ilustración 6.39, está en condiciones de comenzar el funcionamiento normal del guante. Como el MCU es el encargado de controlar todas las funcionalidades del guante a la vez, se utiliza como sistema operativo FreeRTOS, para aprovechar los beneficios que tiene frente a situaciones de ejecución concurrente con el uso de *threads*, semáforos y *mutex*.

A continuación, se enlistan las tareas que el MCU realiza constantemente para el funcionamiento del guante:

- Medición de la corriente que está utilizando el guante.
- Medición de la presión que se está aplicando.
- Actualización de la posición de los dedos con los *flex sensors*.
- Actualización de la posición de los dedos con los potenciómetros.
- Medición de la carga de la batería.
- Control del estado de carga de la batería.
- Hacer actuar los motores de vibración.
- Hacer actuar los motores de presión.
- Hacer actuar los servomotores para *Force Feedback*.
- Enviar mensajes de información, error, depuración y advertencia mediante la comunicación serial externa.
- Controlar los estados de la luz LED.
- Implementar el Protocolo Bluetooth por el lado del *server*.

7. Construcción del prototipo

7.1. Definición de los módulos

Puede utilizarse la Ilustración 7.1, un diagrama ya empleado en este informe, para marcar los módulos que conforman al prototipo, ya que cada uno de estos módulos es funcional al producto. Lo que diferencia al prototipo del diseño final yace en submódulos particulares de cada una de estas funciones fundamentales, o en el grado de integración logrado.

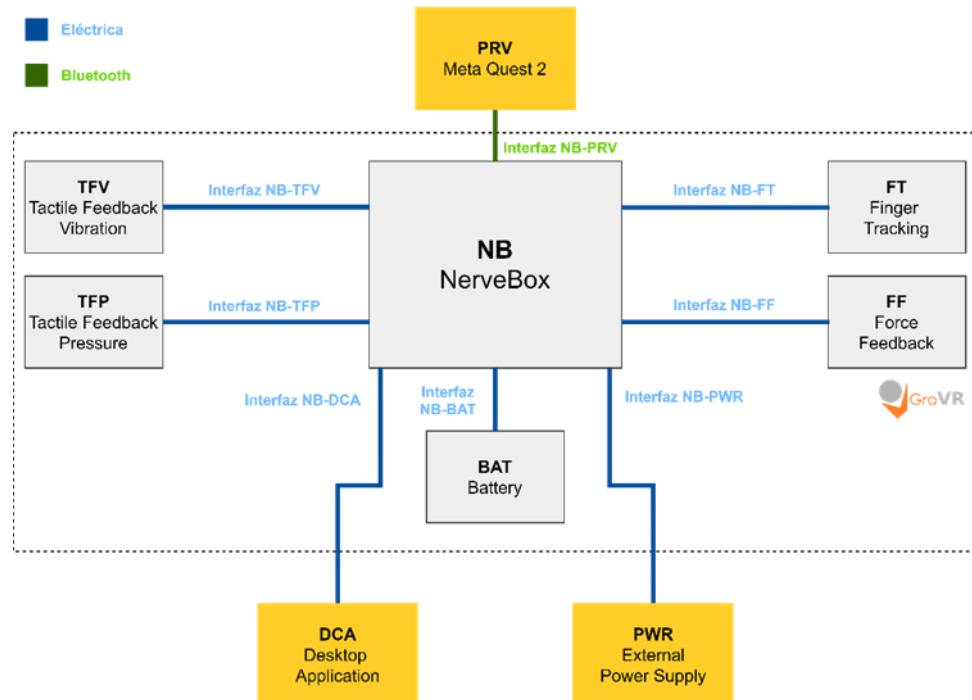


Ilustración 7.1: Módulos del prototipo.

A continuación se listan los cambios o simplificaciones que el prototipo tiene, respecto de lo diseñado. En todo aquello no mencionado en esta sección, debe asumirse que lo dicho en la sección de diseño (6) se mantiene.

- **Fuel gauge:** este submódulo que pertenece al circuito de carga, cuya función es la de medir con un buen grado de precisión el estado de carga de la batería, no fue incluido en el circuito del prototipo. Para suplir esta función de forma simplificada se utiliza una medición de la tensión otorgada por la batería.
- **Protección de sobretensión:** esta protección está pensada para un usuario final sin conocimientos de electrónica, que pueda no tener las precauciones suficientes al conectar el dispositivo. Para el prototipo, que es utilizado por quienes lo diseñan, se tomó la decisión de simplificar la implementación al no incluir este submódulo del circuito de alimentación.
- **Vibradores juntos en palma:** uno de los mayores desafíos del prototipo resultó ser la administración de todas las interfaces eléctricas que el diseño conlleva. Siendo el prototipo parte de una etapa sin un grado final de integración, para simplificar el manejo de estas interfaces, se decidió unificar el manejo de los vibradores en la palma de la mano. En las especificaciones de diseño se habla de 8 puntos de vibración: los 5 dedos y 3 en la palma. La cantidad se mantiene en el prototipo, con la modificación de que los 3 vibradores de la palma pierden su independencia, pudiendo ser comandados en conjunto únicamente.
- **Presión en tres dedos:** bajo el mismo concepto de simplificación de interfaces del punto anterior, se optó por reducir la cantidad de puntos de presión del módulo de Pressure Feedback. En lugar de contar con un punto de presión en cada una de las yemas de los cinco dedos, se colocan tres dispositivos de presión, en los dedos pulgar, índice y mayor, considerados los de mayor uso.

- **NerveBox:** el hecho de que el grado de integración del producto no sea el final, implica que el circuito electrónico sobre el que funciona el módulo NerveBox, sea de un mayor tamaño al idóneo. Consecuentemente, para comodidad del usuario de este prototipo, se coloca el circuito impreso y la batería que conforman al módulo, en el antebrazo del usuario, en lugar de estar integrado en el guante. Una serie de cableados conectan los módulos del guante con su controlador en el antebrazo.

7.2. Diseño de los circuitos impresos

El circuito impreso que contiene la lógica de funcionamiento del producto resultó el módulo de mayor complejidad, por su cantidad de componentes e interfaces, y la complejidad de integrar el control de todos los módulos sin comprometer su funcionamiento.

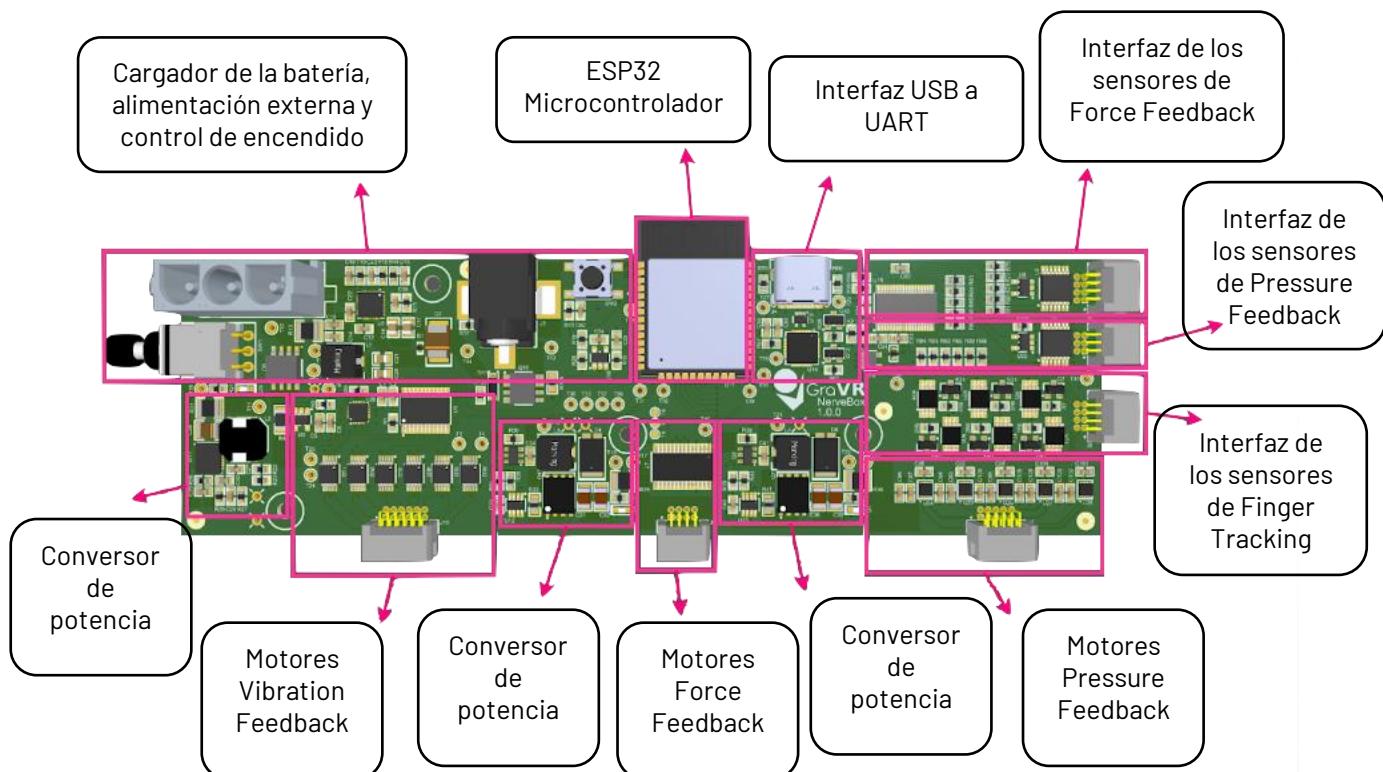


Ilustración 7.2: Circuito impreso con delimitación de módulos.



Ilustración 7.3: Foto del PCB para el prototipo



Para referencia del lector, se muestra en la Ilustración 7.2 el circuito impreso diseñado para el prototipo, así como una distinción de los módulos que lo componen. El circuito está conformado por cuatro capas, dos de componentes en sus caras inferior y superior, a las que se le interponen capas de alimentación y referencia a tierra.

Las Ilustraciones Ilustración 7.3 y Ilustración 7.3 muestran los resultados finales de la fabricación del PCB que conforma el módulo de la NerveBox.

Ilustración 7.4: Foto del PCB para el prototipo.

7.3. Diseño mecánico

En el diseño mecánico del prototipo se identifican dos componentes fundamentales: la NerveBox y el guante, separados mecánicamente entre sí. El primero puede observárselo en la Ilustración 7.5, de la forma en la que se lo ve desde el exterior, así como transparentado para poder observar la posición del PCB en su interior. Este módulo toma una disposición alargada para ofrecer mayor comodidad al usuario, ya que será colocado en su antebrazo.

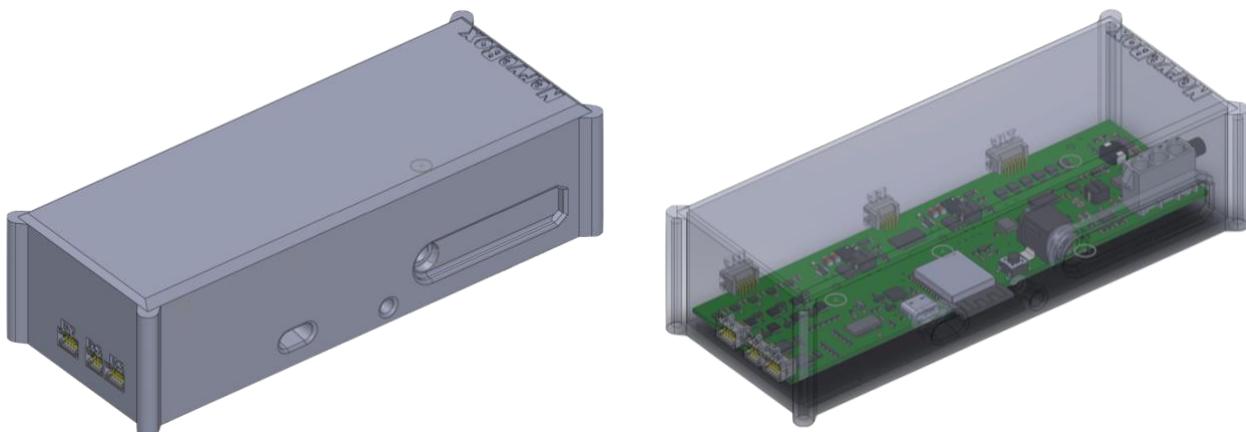


Ilustración 7.5: Render de la NerveBox.

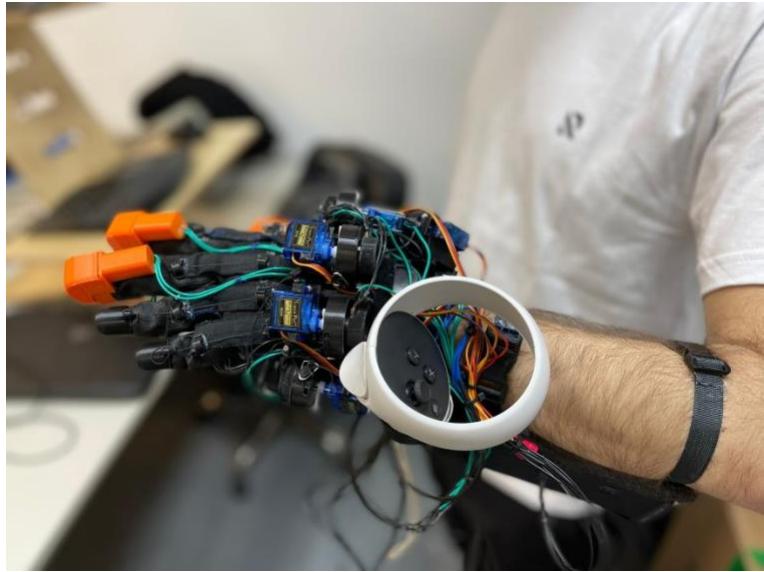


Ilustración 7.6:Guante completamente ensamblado

El guante cuenta cuatro módulos fundamentales conectándose a la NerveBox a través de interfaces cableadas: *Finger Tracking*, *Force Feedback*, *Pressure Feedback* y *Vibration Feedback*. El primero de ellos, *Finger Tracking*, lo componen los seis *flex sensors* cableados en azul. Cinco de ellos, los asignados a movimientos de extensión y flexión, están protegidos por tela elástica, mientras que aquel que obtiene información de aducción/abducción del dedo pulgar, se mantiene descubierto.

Los componentes del módulo de *Pressure Feedback* pueden reconocerse por el color naranja en sus piezas, en la punta de los dedos pulgar, índice y mayor, y están, a su vez, cableados en color verde.

Al módulo de *Force Feedback* lo componen los carretes e hilos de color negro, colocados en la base de la mano, y conectados a la punta de cada dedo sobre el que ejercen una fuerza. Incorporado a este módulo se encuentran los potenciómetros que agregan un grado de libertad de extensión/flexión a cada dedo, para el *Finger Tracking*.

Finalmente, del lado interior de la mano pueden identificarse los actuadores de vibración, uno en cada dedo, y tres en la palma. Su cableado en negro y tamaño pequeño aportan a un diseño más homogéneo del guante.

7.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje

La complejidad mecánica de este producto conllevó una serie de decisiones que hicieran factible la integración de todos los módulos que lo componen. Muchas de estas decisiones son parte del diseño y ya fueron discutidas en secciones anteriores. En particular, en lo que respecta al prototipo, una de las consideraciones constructivas que debe tenerse tiene que ver con el cableado. Se puede observar de la Ilustración 7.6 que ha de tenerse especial cuidado con el manejo de estas conexiones, y en particular, en lo mecánico, debe procurarse no someterlos a tensiones que puedan prevenir el funcionamiento correcto del dispositivo. Con este fin, se dejó holgura en el largo de estos cables, y para su fijación al guante, se optó por coserlos. Esta es una de las diferencias a marcar respecto del producto final, que llevará otro tipo de sujeción de estas conexiones.

El módulo de *Finger Tracking* fue otro en el que debió tenerse un especial cuidado mecánico, debido a la fragilidad de los *flex sensors* que utiliza. A fin de protegerlos, se los cubrió con una tela elástica, teniendo previamente el cuidado de ubicarlos mecánicamente donde mejor se transmitiera el movimiento de los dedos, a deformación del sensor. En el caso de los de extensión/flexión, esto es en la dirección de los huesos de las falanges, y con la mitad longitudinal del sensor a la altura del nudillo. Finalmente, el sensor de aducción/abducción del pulgar se ubica en la dirección del movimiento, con mitad del sensor en el pulgar, y mitad en el índice.

Para la protección de los sensores de fuerza utilizados en el módulo *Pressure Feedback*, así como los *flex sensors* de *Finger Tracking*, se diseñaron piezas plásticas que soportaran la tensión mecánica que los cables de conexión pudieran estar efectuando sobre ellos.

7.5. Bill of Materials (BOM)

Manufacturer Part Number	Descripción	Designador	Paquete	N	Sheet	Módulo
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C1	0603	1	2	Vibration Module
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C2	0603	1	2	Vibration Module
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R1	0603	1	2	Vibration Module
TCA9548APWR	IC BUS SWITCH 1 X 8:1 24TSSOP	U1	TSSOP-24	1	2	Vibration Module
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	1C3, 1C4	0603	2	3.1	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	1U2	VSSOP10	1	3.1	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	1R2, 1R3	0603	2	3.1	Vibrator Interface
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	2C3, 2C4	0603	2	3.2	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	2U2	VSSOP10	1	3.2	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	2R2, 2R3	0603	2	3.2	Vibrator Interface
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	3C3, 3C4	0603	2	3.3	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	3U2	VSSOP10	1	3.3	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	3R2, 3R3	0603	2	3.3	Vibrator Interface
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	4C3, 4C4	0603	2	3.4	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	4U2	VSSOP10	1	3.4	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	4R2, 4R3	0603	2	3.4	Vibrator Interface
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	5C3, 5C4	0603	2	3.5	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	5U2	VSSOP10	1	3.5	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	5R2, 5R3	0603	2	3.5	Vibrator Interface
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	6C3, 6C4	0603	2	3.6	Vibrator Interface
DRV2605LDGST	IC MOTOR DRIVER 2V-5.5V 10VSSOP	6U2	VSSOP10	1	3.6	Vibrator Interface
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	6R2, 6R3	0603	2	3.6	Vibrator Interface

CL10B104K08 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C5, C6	0603	2	4	
INA180A4IDB VT	IC CURR SENSE 1 CIRCUIT SOT23-5	U3	SOT-23-5	1	4	
PA1206FRM67 OR001L	RES 0.001 OHM 1% 0.25W 1206	R4	1206	1	4	
RMCF0603JT1 K50	RES 1.5K OHM 5% 1/10W 0603	R5	0603	1	4	
350690-3	CONN PIN 18-24AWG CRIMP TIN	M6, M7, M8		3	5	Power Subsystem
350766-1	CONN PLUG 3POS 94V-0 UNI-MATE	J2		1	5	Power Subsystem
1969803-1	CONN HEADER VERT 3POS 6.35MM	J1	Nonstand ard	1	5	Power Subsystem
CL10B104K08 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C24, C25	0603	2	5	Power Subsystem
IMR21700	BATTERY IMR 5000MAH	B2	21700	1	5	Power Subsystem
LMV651MFX/ NOPB	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT SOT23-5	U10	SOT-23-5	1	5	Power Subsystem
PJ-036AH-SMT-TR	CONN PWR JACK 2X5.5MM SOLDER	J3	Nonstand ard	1	5	Power Subsystem
RMCF0603FG1 50K	RES 150K OHM 1% 1/10W 0603	R18, R20	0603	2	5	Power Subsystem
RMCF0603FT1 OKO	RES 10K OHM 1% 1/10W 0603	R19	0603	1	5	Power Subsystem
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R17	0603	1	5	Power Subsystem
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C62	0603	1	6	ESP32 Central Processing
CL10A226MP8 NUNE	CAP CER 22UF 10V X5R 0603	C60	0603	1	6	ESP32 Central Processing
CL10B104K08 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C61	0603	1	6	ESP32 Central Processing
ERJ-3EKF1201V	RES SMD 1.2K OHM 1% 1/10W 0603	R68, R69, R71, R72	0603	4	6	ESP32 Central Processing
ESP32-WROOM-32E-N16	SMD MODULE PCB ANTENNA 105C	U17	38-SMD Module	1	6	ESP32 Central Processing
PTS645SK50S MTR92LFS	SWITCH TACTILE SPST-NO 0.05A 12V	SW2	Non- Standard	1	6	ESP32 Central Processing
RMCF0603FT1 OKO	RES 10K OHM 1% 1/10W 0603	R73	0603	1	6	ESP32 Central Processing

RMCF0603JT100K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R66, R67, R70	0603	3	6	ESP32 Central Processing
AC0603FR-1027KL	RESISTOR SMD	1R6	0603	1	7.1	Finger Tracking EF Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	1Q1	SOT-23	1	7.1	Finger Tracking EF Interface
CL10B104KO8NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	1C7	0603	1	7.1	Finger Tracking EF Interface
LMV652MMX/NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	1U4	8-VSSOP	1	7.1	Finger Tracking EF Interface
AC0603FR-1027KL	RESISTOR SMD	2R6	0603	1	7.2	Finger Tracking EF Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	2Q1	SOT-23	1	7.2	Finger Tracking EF Interface
CL10B104KO8NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	2C7	0603	1	7.2	Finger Tracking EF Interface
LMV652MMX/NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	2U4	8-VSSOP	1	7.2	Finger Tracking EF Interface
AC0603FR-1027KL	RESISTOR SMD	3R6	0603	1	7.3	Finger Tracking EF Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	3Q1	SOT-23	1	7.3	Finger Tracking EF Interface
CL10B104KO8NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	3C7	0603	1	7.3	Finger Tracking EF Interface
LMV652MMX/NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	3U4	8-VSSOP	1	7.3	Finger Tracking EF Interface
AC0603FR-1027KL	RESISTOR SMD	4R6	0603	1	7.4	Finger Tracking EF Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	4Q1	SOT-23	1	7.4	Finger Tracking EF Interface
CL10B104KO8NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	4C7	0603	1	7.4	Finger Tracking EF Interface

LMV652MMX /NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	4U4	8-VSSOP	1	7.4	Finger Tracking EF Interface
AC0603FR-1027KL	RESISTOR SMD	5R6	0603	1	7.5	Finger Tracking EF Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	5Q1	SOT-23	1	7.5	Finger Tracking EF Interface
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	5C7	0603	1	7.5	Finger Tracking EF Interface
LMV652MMX /NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	5U4	8-VSSOP	1	7.5	Finger Tracking EF Interface
AC0603JR-0747KL	RES SMD 47K OHM 5% 1/10W 0603	R7	0603	1	8	Finger Tracking AA Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	Q2	SOT-23	1	8	Finger Tracking AA Interface
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C8	0603	1	8	Finger Tracking AA Interface
LMV652MMX /NOPB	IC OPAMP GP 2 CIRCUIT 8VSSOP	U5	8-VSSOP	1	8	Finger Tracking AA Interface
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C9, C10, C11	0603	3	9	Force Feedback Module
LMV651MFX/NOPB	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT SOT23-5	U8	SOT-23-5	1	9	Force Feedback Module
LMV654MTX/NOPB	IC OPAMP GP 4 CIRCUIT 14TSSOP	U6	14-TSSOP	1	9	Force Feedback Module
PCA9685PW,18	IC LED DRVR LIN DIM 25MA 28TSSOP	U7	28-TSSOP	1	9	Force Feedback Module
RMCF0603JT3 30R	RES 330 OHM 5% 1/10W 0603	R8, R9, R10, R11, R12	0603	5	9	Force Feedback Module
0603ZD106KA T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C19	0603	1	10	Battery Charger
744316100	FIXED IND 1UH 11.5A 4.75MOHM SMD	L1		1	10	Battery Charger

C0603C912J3G AC7867	CAP CER 9100PF 25V COG/NPO 0603	C15	0603	1	10	Battery Charger
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C22, C23	0603	2	10	Battery Charger
CL10A226MP8 NUNE	CAP CER 22UF 10V X5R 0603	C13, C14	0603	2	10	Battery Charger
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C12, C18	0603	2	10	Battery Charger
CL21A106KOQ NNNE	CAP CER 10UF 16V X5R 0805	C16, C17, C20, C21	0805	4	10	Battery Charger
CRCW1210000 OZ0EA	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/2W 1210	R13	1210	1	10	Battery Charger
ESD9X3.3ST5G	TVS DIODE 3.3VWM 10.4VC SOD923	D1	SOD-923	1	10	Battery Charger
MAX77976EF D+	IC BATT CHG LI-ION 1CEL 32FC2QFN	U9	32- FC2QFN	1	10	Battery Charger
NTCG163JF10 3FT1	THERMISTOR NTC 10KOHM 3380K 0603	T10	0603	1	10	Battery Charger
RMCF0603FG1 50K	RES 150K OHM 1% 1/10W 0603	R15	0603	1	10	Battery Charger
RMCF0603FT1 0K5	RES 10.5K OHM 1% 1/10W 0603	R14	0603	1	10	Battery Charger
RMCF0603ZT0 R00	RES 0 OHM JUMPER 1/10W 0603	R16	0603	1	10	Battery Charger
SD2114S040S 8R0	DIODE SCHOTTKY 40V 8A SMB	D2		1	10	Battery Charger
0603N120J500 CT	CAP CER 12PF 50V COG/NPO 0603	C30	0603	1	11	Power Supply
0603N470J500 CT	CAP CER 47PF 50V COG/NPO 0603	C27	0603	1	11	Power Supply
APT1608SGC	LED GREEN CLEAR CHIP SMD	D3	0603	1	11	Power Supply
CL32A107MP VNNNE	CAP CER 100UF 10V X5R 1210	C28	1210	1	11	Power Supply
CRCW1210000 OZ0EA	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/2W 1210	R21	1210	1	11	Power Supply
GRM188R60J4 76ME15D	CAP CER 47UF 6.3V X5R 0603	C26	0603	1	11	Power Supply
LTC3113EDHD #TRPBF	IC REG BCK BST ADJ 3A 16DFN	U11	16- WFDFN	1	11	Power Supply
RC0603FR- 07182KL	RES 182K OHM 1% 1/10W 0603	R27	0603	1	11	Power Supply
RMCF0603FG4 9K9	RES 49.9K OHM 1% 1/10W 0603	R25	0603	1	11	Power Supply
RMCF0603FT6 K49	RES 6.49K OHM 1% 1/10W 0603	R22	0603	1	11	Power Supply
RMCF0603FT9 0K9	RES 90.9K OHM 1% 1/10W 0603	R26	0603	1	11	Power Supply
RMCF0603FT8 25K	RES 825K OHM 1% 1/10W 0603	R23	0603	1	11	Power Supply

RT0603FRE13 2K2L	CHIP RESISTOR THIN FLIM HIGH PRE	R24	0603	1	11	Power Supply
SPM6530T- 2R2M	FIXED IND 2.2UH 8.2A 19 MOHM SMD	L2	Non Standard	1	11	Power Supply
VJ0603Y681K XACW1BC	CAP CER 680PF 50V X7R 0603	C29	0603	1	11	Power Supply
0603N470J500 CT	CAP CER 47PF 50V COG/NPO 0603	C36	0603	1	12	5V DC-DC Converter
0603ZD106KA T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C33, C34	0603	2	12	5V DC-DC Converter
06035C182JAT 2A	CAP CER 1800PF 50V X7R 0603	C37	0603	1	12	5V DC-DC Converter
744316100	FIXED IND 1UH 11.5A 4.75MOHM SMD	L3		1	12	5V DC-DC Converter
APT1608SGC	LED GREEN CLEAR CHIP SMD	D5	0603	1	12	5V DC-DC Converter
BSC052N03LS ATMA1	MOSFET N-CH 30V 17A/57A TDSON	Q4	PG-TDSON-8	1	12	5V DC-DC Converter
C3216X5R1A6 86M160AC	CAP CER 68UF 10V X5R 1206	C31, C32	1206	2	12	5V DC-DC Converter
CL10B102KB8 WPJC	CAP CER 1NF 50V X7R 0603	C35	0603	1	12	5V DC-DC Converter
CRCW06034K 75FKEAC	RES 4.75K OHM 1% 1/10W 0603	R31	0603	1	12	5V DC-DC Converter
CRCW1210000 0Z0EA	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/2W 1210	R28	1210	1	12	5V DC-DC Converter
DMN62D0UW -7	MOSFET N-CH 60V 340MA SOT323	Q5	SOT-323	1	12	5V DC-DC Converter
ERJ- 6CWFR010V	RES 0.01 OHM 1% 1/2W 0805	R33	0805	1	12	5V DC-DC Converter
LTC3872ETS8# TRPBF	IC REG CTRLR BOOST TSOT23-8	U12	TSOT-23-8	1	12	5V DC-DC Converter
PDS1040L-13	DIODE SCHOTTKY 40V 10A POWERDI5	D4	PowerDI5	1	12	5V DC-DC Converter
RMCF0603FT1 7K4	RES 17.4K OHM 1% 1/10W 0603	R32	0603	1	12	5V DC-DC Converter
RMCF0603JT1 K50	RES 1.5K OHM 5% 1/10W 0603	R35	0603	1	12	5V DC-DC Converter
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R30, R34	0603	2	12	5V DC-DC Converter
RT0603FRE13 2K2L	CHIP RESISTOR THIN FLIM HIGH PRE	R29	0603	1	12	5V DC-DC Converter
SI3477DV-T1- GE3	MOSFET P-CH 12V 8A 6TSOP	Q3	6-TSOP	1	12	5V DC-DC Converter
CC0603JR7X7R 9BB473	CAP CER 0.047UF 50V X7R 0603	C63, C64	0603	2	13	2,4V Regulator
LM4125IM5- 2.5/NOPB	IC VREF SERIES 0.5% SOT23-5	U18	SOT-23-5	1	13	2,4V Regulator
0603N470J500 CT	CAP CER 47PF 50V COG/NPO 0603	C43	0603	1	14	6V DC-DC Converter

0603ZD106KA T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C40, C41	0603	2	14	6V DC-DC Converter
06035C182JAT 2A	CAP CER 1800PF 50V X7R 0603	C44	0603	1	14	6V DC-DC Converter
744316100	FIXED IND 1UH 11.5A 4.75MOHM SMD	L4		1	14	6V DC-DC Converter
APT1608SGC	LED GREEN CLEAR CHIP SMD	D7	0603	1	14	6V DC-DC Converter
BSC052N03LS ATMA1	MOSFET N-CH 30V 17A/57A TDSON	Q7	PG-TDSON-8	1	14	6V DC-DC Converter
C3216X5R1A6 86M160AC	CAP CER 68UF 10V X5R 1206	C38, C39	1206	2	14	6V DC-DC Converter
CL10B102KB8 WPJC	CAP CER 1NF 50V X7R 0603	C42	0603	1	14	6V DC-DC Converter
CRCW06033K 00FKEAC	RES 3K OHM 1% 1/10W 0603	R43	0603	1	14	6V DC-DC Converter
CRCW1210000 0Z0EA	RES SMD 0 OHM JUMPER 1/2W 1210	R36	1210	1	14	6V DC-DC Converter
DMN62D0UW -7	MOSFET N-CH 60V 340MA SOT323	Q8	SOT-323	1	14	6V DC-DC Converter
ERJ- 6CWFR010V	RES 0.01 OHM 1% 1/2W 0805	R41	0805	1	14	6V DC-DC Converter
LTC3872ETS8# TRPBF	IC REG CTRLR BOOST TSOT23-8	U13	TSOT-23-8	1	14	6V DC-DC Converter
PDS1040L-13	DIODE SCHOTTKY 40V 10A POWERDI5	D6	PowerDI5	1	14	6V DC-DC Converter
RMCF0603FT1 2K0	RES 12K OHM 1% 1/10W 0603	R39	0603	1	14	6V DC-DC Converter
RMCF0603FT1 7K4	RES 17.4K OHM 1% 1/10W 0603	R40	0603	1	14	6V DC-DC Converter
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R38, R42	0603	2	14	6V DC-DC Converter
RT0603FRE13 2K2L	CHIP RESISTOR THIN FLIM HIGH PRE	R37	0603	1	14	6V DC-DC Converter
SI3477DV-T1- GE3	MOSFET P-CH 12V 8A 6TSOP	Q6	6-TSOP	1	14	6V DC-DC Converter
0603ZD106KA T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C45	0603	1	15	Soft Power Switch
BB15AH-FA	SWITCH PUSH SPDT 0.4VA 28V	SW1	Nonstand ard	1	15	Soft Power Switch
BZT52C2V7- 13-F	DIODE ZENER 2.7V 500MW SOD123	D9	SOD-123	1	15	Soft Power Switch
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C46	0603	1	15	Soft Power Switch
CUS08F30,H3F	DIODE SCHOTTKY 30V 800MA USC	D8	USC	1	15	Soft Power Switch
DMN62D0UW -7	MOSFET N-CH 60V 340MA SOT323	Q10, Q11	SOT-323	2	15	Soft Power Switch
ERJ-P06J510V	RES SMD 51 OHM 5% 1/2W 0805	R46	0805	1	15	Soft Power Switch

RMCF0603FT1 OKO	RES 10K OHM 1% 1/10W 0603	R44	0603	1	15	Soft Power Switch
RMCF0603FT4 30K	RES 430K OHM 1% 1/10W 0603	R47	0603	1	15	Soft Power Switch
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R45, R48	0603	2	15	Soft Power Switch
SI4477DY-T1- GE3	MOSFET P-CH 20V 26.6A 8SO	Q9	8-SOIC	1	15	Soft Power Switch
AC0603FR- 071KL	RES SMD 1K OHM 1% 1/10W 0603	R55, R56, R57	0603	3	16	USB to UART bridge
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C55	0603	1	16	USB to UART bridge
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C56, C59	0603	2	16	USB to UART bridge
CP2102N-A02- GQFN28	IC USB TO UART BRIDGE QFN28	U16	28-WFQFN Exposed Pad	1	16	USB to UART bridge
ERJ- 3EKF5101V	RES SMD 5.1K OHM 1% 1/10W 0603	R59, R60	0603	2	16	USB to UART bridge
MMSS8050-H- TP	TRANS NPN 25V 1.5A SOT23	Q12, Q13	SOT-23-3	2	16	USB to UART bridge
RMCF0603FT1 OKO	RES 10K OHM 1% 1/10W 0603	R58, R61	0603	2	16	USB to UART bridge
SP3003-02JTG	TVS DIODE 6VWM 15VC SC70-5	U15	SC-70 Littelfuse	1	16	USB to UART bridge
USB4105-GF-A	CONN RCP USB2.0 TYP C 24P SMD RA	J4	USB-C	1	16	USB to UART bridge
AC0603FR- 071KL	RES SMD 1K OHM 1% 1/10W 0603	R63	0603	1	17	User Interface
BC857BLT3G	TRANS PNP 45V 100MA SOT23-3	Q14	SOT-23	1	17	User Interface
MUN5233DW 1T1G	TRANS PREBIAS 2NPN 50V SC88	Q15	SOT-363	1	17	User Interface
QLBP615- RGB-3053	LED RGB DIFFUSED 1206 SMD R/A	D10	1206	1	17	User Interface
RMCF0603JT1 00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R62	0603	1	17	User Interface
RMCF0603JT3 30R	RES 330 OHM 5% 1/10W 0603	R65	0603	1	17	User Interface
RNCP0603FTD 100R	RES 100 OHM 1% 1/8W 0603	R64	0603	1	17	User Interface

0603ZD106KA-T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C84	0603	1	18	ADC 16-Channels
885012206047	CAP CER 0.15UF 16V X7R 0603	C65, C66, C67, C68, C69, C70, C71, C72, C73, C74, C75, C76, C77, C78, C79, C80	0603	16	18	ADC 16-Channels
AC0603FR-071KL	RES SMD 1K OHM 1% 1/10W 0603	R75, R77, R78, R80, R81, R83, R84, R85, R86, R87, R88, R89, R90, R92, R93, R94	0603	16	18	ADC 16-Channels
ADS7953SDBT	IC ADC 12BIT SAR 38TSSOP	U19	38-TSSOP	1	18	ADC 16-Channels
CL10A105KQ8_NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C81, C82, C83	0603	3	18	ADC 16-Channels
CRGCQ0603J2_2R	RES 22 OHM 5% 1/10W 0603	R74, R76, R79, R82	0603	4	18	ADC 16-Channels
MPZ1608R391_ATA00	FERRITE BEAD 390 OHM 0603 1LN	L5	0603	1	18	ADC 16-Channels
RMCF0603JT1_00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R91, R95, R96, R97	0603	4	18	ADC 16-Channels
CL10B104K08_NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C85, C86, C87	0603	3	19	GPIO Expander
RMCF0603FT1_0K0	RES 10K OHM 1% 1/10W 0603	R99	0603	1	19	GPIO Expander
RMCF0603JT1_00K	RES 100K OHM 5% 1/10W 0603	R98	0603	1	19	GPIO Expander
SX1502I087TR-T	IC GPIO EXPANDER I2C 8CH 20QFN	U20	QFN-20	1	19	GPIO Expander
CL10A105KQ8_NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C88	0603	1	20	Finger Tracking Module
SFSD-03-28-G-18.00-S	.050 SOCKET DISCRETE CABLE ASSEM	M9	Nonstand ard	1	21	Connectors
SFSD-04-28-F-08.00-S	.050 SOCKET DISCRETE CABLE ASSEM	M10, M12, M13	Nonstand ard	3	21	Connectors
SFSD-05-28-H-03.00-S	.050 SOCKET DISCRETE CABLE ASSEM	M11	Nonstand ard	1	21	Connectors
SFSD-06-28-G-08.00-S	.050 SOCKET DISCRETE CABLE ASSEM	M14	Nonstand ard	1	21	Connectors
TFC-106-01-F-D-RA	.050 X .050 TERMINAL STRIP	J10	Nonstand ard	1	21	Connectors

TFM-103-01-L-D-RA	CONN HEADER R/A 6POS 1.27MM	J5	Nonstand ard	1	21	Connectors
TFM-104-01-L-D-RA	CONN HEADER R/A 8POS 1.27MM	J6, J8, J9	Nonstand ard	3	21	Connectors
TFM-105-01-L-D-RA	CONN HEADER R/A 10POS 1.27MM	J7	Nonstand ard	1	21	Connectors
CL10A105KQ8 NNNC	CAP CER 1UF 6.3V X5R 0603	C89	0603	1	22	Pressure Sensing Interface
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C90, C91	0603	2	22	Pressure Sensing Interface
LMV651MFx/NOPB	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT SOT23-5	U22	SOT-23-5	1	22	Pressure Sensing Interface
LMV654MTx/NOPB	IC OPAMP GP 4 CIRCUIT 14TSSOP	U21	14-TSSOP	1	22	Pressure Sensing Interface
RMCF0603FT1 2K0	RES 12K OHM 1% 1/10W 0603	R100, R101, R102, R103, R104	0603	5	22	Pressure Sensing Interface
0603ZD106KA T2A	CAP CER 10UF 10V X5R 0603	C94, C97, C100, C103, C106	0603	5	23	Pressure Actuator Interface
CL10B104KO8 NFNC	CAP CER 0.1UF 16V X7R 0603	C92, C93, C95, C96, C98, C99, C101, C102, C104, C105	0603	10	23	Pressure Actuator Interface
DRV8837CDSG R	IC HALF-BRIDGE DRVR PWM 8WSON	U23, U24, U25, U26, U27	8-WSON	5	23	Pressure Actuator Interface
B72500D0150 A060	VARISTOR 22V 30A 0603	R105	0603	1	24	Polarity Protection
CWDM3011P TR13 PBFREE	MOSFET P-CH 30V 11A 8SOIC	Q16	8-SOIC	1	24	Polarity Protection
MMSZ5231B-7-F	DIODE ZENER 5.1V 500MW SOD123	D11	SOD-123	1	24	Polarity Protection
RT0603FRE13 2K2L	CHIP RESISTOR THIN FLIM HIGH PRE	R106	0603	1	24	Polarity Protection

8. Validación del prototipo

8.1. Estudios de confiabilidad

La presente sección analiza la confiabilidad de las componentes de hardware y software del prototipo realizado. En cada una de las secciones correspondientes se expone el método utilizado, así como los datos sobre los que se basa el cálculo.

8.1.1. Hardware

Para este estudio de la confiabilidad de hardware se hace uso de la norma MIL-HDBK-217F, que estima la cantidad de fallas en unidad de tiempo para diferentes tipos de componentes electrónicos, teniendo en cuenta factores como las condiciones de uso, temperatura y trayectoria del fabricante. Previo a aplicar esta norma a cada componente del prototipo, se propone el diagrama de confiabilidad que dictamina cómo los valores de cada componente se integran para obtener un valor final de confiabilidad del producto completo.

Basándose en la Ilustración 6.2 se seleccionan los módulos considerados críticos para garantizar las funcionalidades fundamentales del producto. Estos son los incluidos en la Ilustración 8.1, los cuales se colocan en serie ante la ausencia de redundancias entre ellos. En otras palabras, la falla en cualquiera de estos módulos implica una pérdida de las funcionalidades fundamentales del producto.

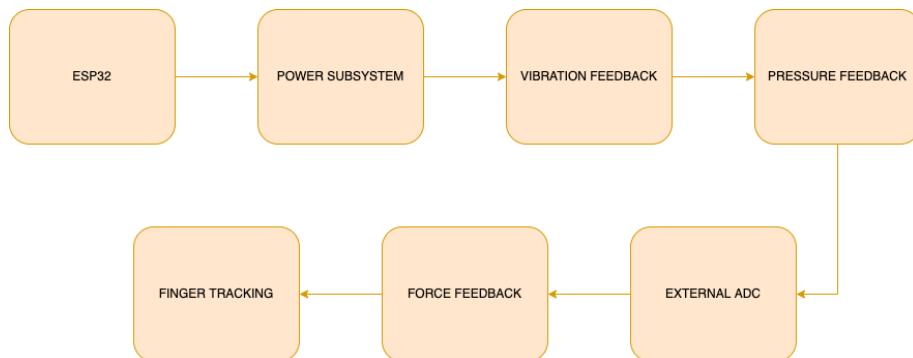


Ilustración 8.1: Diagrama de confiabilidad en módulos.

La estimación se realiza a partir de una serie de factores multiplicativos que condicionan a la confiabilidad base del componente. Estos factores dependen del tipo de componente, por ejemplo, si se está tratando con una resistencia, capacitor, compuerta lógica o circuito integrado. Dentro de cada uno de los módulos, tampoco se cuenta con redundancias, por lo cual el valor de confiabilidad del módulo estará dado por la confiabilidad en serie de cada uno de sus componentes. La Tabla 8.1 especifica las ecuaciones utilizadas para los cálculos de las confiabilidades de cada componente por separado.

Tipo de componente	Ecuación de factores de confiabilidad
Resistencia	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_P \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Capacitor	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_C \cdot \pi_V \cdot \pi_{SR} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Microcontrolador / IC	$\lambda_p = (C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E) \cdot \pi_Q \cdot \pi_L$
Transistor MOSFET	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Transistor BJT	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_A \cdot \pi_R \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$

Diodo	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$
Switch	$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_L \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$

Tabla 8.1: Ecuaciones de confiabilidad para cada tipo de componentes, de acuerdo a la norma MIL-HDBK-217F.

8.1.1.1. ESP32

Componente	Cantidad	λ	λ total
Resistencia	8	0.0255	0.204
Capacitor	3	0.0008	0.0024
Microcontrolador	1	1.08	1.08
Total módulo			1.2864

Tabla 8.2: Confiabilidad ESP32.

8.1.1.2. Power Subsystem

Componente	Cantidad	λ	λ total
Resistencia	37	0.0255	0.9435
Capacitor	39	0.0008	0.0312
Inductor	4	0.00006	0.00024
Diodo	10	0.0007	0.007
Transistor MOSFET	14	0.1776	2.4864
Switch	1	0.13	0.13
Circuito integrado cargador	1	0.51	0.51
Circuito integrado conversor	4	0.51	2.04
Amplificador operacional	1	0.23	0.23
Total módulo			6.3783

Tabla 8.3: Confiabilidad Power Subsystem.

8.1.1.3. Vibration Feedback

Componente	Cantidad	λ	λ total
Circuito integrado para vibradores	6	0.51	0.51
I2C Switch	1	0.623	3.738
Resistencia	13	0.0255	0.312
Capacitor	14	0.0008	0.0112
Total módulo			4.5712

Tabla 8.4: Confiabilidad Vibration Feedback.

8.1.1.4. Pressure Feedback

Componente	Cantidad	λ	λ total
Resistencia	5	0.0255	0.1275
Capacitor	18	0.0008	0.0144
Circuito integrado driver motor	5	0.23	1.15
Total módulo			1.2912

Tabla 8.5: Confiabilidad Pressure Feedback.

8.1.1.5. External ADC

Componente	Cantidad	λ	λ total
Resistencia	8	0.0255	0.204
Capacitor	20	0.0008	0.016
Circuito integrado ADC	1	0.623	0.623
Total módulo			0.843

Tabla 8.6: Confiabilidad External ADC.

8.1.1.6. Force Feedback

Componente	Cantidad	λ	λ_{total}
Resistencia	5	0.0255	0.1275
Capacitor	3	0.0008	0.0024
Amplificador operacional	2	0.23	0.46
Circuito integrado PWM expander	1	0.623	3.738
Total módulo			4.3279

Tabla 8.7: Confiabilidad Force Feedback.

8.1.1.7. Finger Tracking

Componente	Cantidad	λ	λ_{total}
Resistencia	5	0.0255	0.1275
Capacitor	7	0.0008	0.0056
Transistor BJT	6	0.238	1.428
Amplificador operacional	3	0.23	0.69
Total módulo			2.2511

Tabla 8.8: Confiabilidad Finger Tracking.

8.1.1.8. Confiabilidad total de hardware

Los valores de las tablas anteriores se resumen en la Tabla 8.9, y sumados se obtiene el valor de cantidad de fallas por unidad de tiempo para todo el sistema:

$$\lambda_T = \sum \lambda_{modulos} = 20.95 \frac{\text{fallas}}{10^6 \text{hs}}$$

ESP32	Power Subsystem	Vibration Feedback	Pressure Feedback	External ADC	Force Feedback	Finger Tracking	Total
1.2864	6.3783	4.5712	1.2912	0.843	4.3279	2.2511	20.95

Tabla 8.9: Confiabilidad total.

Este valor de λ_T es usado para la expresión de la confiabilidad:

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda_T}{10^6}t}$$

De esta expresión puede obtenerse el tiempo medio a la falla para todo el sistema:

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt = \frac{10^6}{\lambda_T} \approx 47733 \text{ hs} \approx 5.45 \text{ años}$$

En la Tabla 3.1 se muestran los valores que $R(t)$ a cada año, es decir, la probabilidad de que el equipo funcione sin fallas al transcurrir esos años.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0000	0.8323	0.6928	0.5766	0.4799	0.3995	0.3325	0.2767	0.2303	0.1917

Tabla 8.10: Proyección de la confiabilidad en años.

Teniendo en cuenta que los tiempos de vida de las plataformas de realidad virtual está estimada en 3 años, por obsolescencia tecnológica, que el tiempo medio a la falla esté bien por encima de los 5 años, se considera aceptable para este diseño.

8.1.2. Software

Para el cálculo de confiabilidad de software se opta por un método de estimación, el cual modeliza la probabilidad de correcto funcionamiento (ausencia de fallas) a partir de datos relevados en etapas de *testing* del software desarrollado. En particular, en este trabajo se emplea el método de Shooman, cuyo atractivo yace en que modela confiabilidad como una exponencial decreciente (análogo al modelo utilizado para hardware) y que normaliza las fallas según las líneas de código, es decir, se independiza de las líneas de código utilizadas en el proyecto.

El método de Shooman modeliza la confiabilidad de acuerdo con la ecuación:

$$R(t) = e^{-k \cdot (\epsilon_T - \epsilon_C(\zeta)) \cdot t}$$

Donde, si se considera $\lambda = k \cdot (\epsilon_T - \epsilon_C(\zeta))$, se puede relacionar este modelo con el utilizado en hardware. En este caso, ϵ_T representa la tasa de fallas totales en el software durante el período de *testing*, mientras que $\epsilon_C(\zeta)$ determina la tasa de fallas fueron resueltas hasta el tiempo ζ . Para el presente trabajo, el período de *testing* tomó un mes, que comprende desde el 11 de junio de 2022 al 11 de julio de 2022, y se divide en períodos de 5 días.

Día	E_D	E_C	E_{DA}	E_{CA}	E_R	Hs	λ	\widehat{E}_T	\widehat{k}
11/06/22	16	15	16	15	1	120	0.1333		
16/06/22	14	13	30	28	2	240	0.1250	223	7.69
21/06/22	10	10	40	38	2	360	0.1111	118	16.67
26/06/22	5	7	45	45	0	480	0.0938	83	29.76

01/07/22	7	5	52	50	2	600	0.0867	111	17.00
06/07/22	1	2	53	52	1	720	0.0736	63	78.33
11/07/22	2	2	55	54	1	840	0.0655	70	48.81

Tabla 8.11: Relevamiento de fallas detectadas y corregidas del software, durante el período de testing.

La Tabla 8.11 releva el número de fallas detectadas en el software (E_D), y cuántas de ellas fueron corregidas (E_C), tomando períodos de tiempo de a cinco días. Las columnas siguientes, E_{DA} , E_{CA} y E_R contienen los valores acumulados de errores detectados, corregidos, y errores residuales, respectivamente.

El cociente entre los errores corregidos acumulados E_{CA} y el tiempo transcurrido en horas, determina el valor de λ , el cual es luego utilizado para el estimador de E_T (\widehat{E}_T), dada la ecuación:

$$\widehat{E}_{T_i} = \frac{\frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}} \cdot E_{CA_{i-1}} - E_{CA_i}}{\frac{\lambda_i}{\lambda_{i-1}} - 1}$$

Y finalmente, se estima k mediante:

$$\widehat{k}_i = \lambda_i \cdot \frac{I_T}{\widehat{E}_{T_i} - E_{CA_i}}$$

Donde I_T es un parámetro para indicar la cantidad de instrucciones del software.

En el modelo de Shooman, el parámetro λ del sistema completo puede ser estimado con:

$$\lambda = k \cdot \frac{E_R}{I_T} \approx 0.0041$$

Tomando el último valor de E_R de la Tabla 8.11. Y del inverso de este valor se obtiene:

$$MTTF \approx 245.85 \text{ hs}$$

Si bien es un tiempo considerablemente menor a los resultados obtenidos en hardware, cabe recalcar que el software no presenta desgaste, por lo que estas horas son horas netas de uso. Esto significa que, para 3 horas de uso por día, se estima una falla a los 80 días aproximadamente. Además, teniendo en cuenta que el software es actualizable sin mayores costos agregados, se considera este resultado aceptable.

8.2. Resultados

Como fue mencionado anteriormente, para la validación de funcionamiento del prototipo se utilizan únicamente los bancos de prueba 1 y 2. Estos bancos de prueba proponen en particular validaciones de indicación de estado de la conexión, carga y batería restante, sensación de agarre y tacto, verificación de la precisión del movimiento, duración de la batería, funcionamiento cableado y apagado automático. Además, como método para validar la documentación y usabilidad del SDK desarrollado, se provee a un programador ajeno al proyecto con la documentación y se le propone desarrollar una aplicación que utilice las funcionalidades de GraVR. Se presentan a continuación los resultados de dichas validaciones.

8.2.1. Indicación de estado de la conexión

Se alimenta la placa y puede verificarse que, al encenderse el microcontrolador, la luz comienza a parpadear en color azul, mostrando que se encuentra buscando dispositivos bluetooth cercanos para conectarse.

Una vez establecida la conexión, se observa que el LED se mantiene prendida en color azul sin parpadear y vuelve a su estado anterior en el caso de la desconexión.

La validación resulta exitosa.

8.2.2. Indicación de estado de batería

Puede obtenerse información del estado de la batería desde la interfaz con Unity. Para ser mostrada en el visor de realidad virtual.

Además, pudo comprobarse que al bajar del 20% de la carga total de la batería, el LED presente en la placa comienza a parpadear en color rojo, con lo cual indica al usuario que es necesario cargar el producto.

La validación resulta exitosa.

8.2.3. Indicación de estado de la carga

Se verifica que al conectar el cargador, la luz LED de estado comienza a parpadear en color verde en caso de que la batería se encuentre parcial o totalmente descargada. Una vez finalizado el proceso de carga, esta deja de parpadear y vuelve a su estado normal de funcionamiento.

La validación resulta exitosa.

8.2.4. Sensación de agarre

Si bien fue posible reconocer formas básicas, la precisión que se buscaba no fue alcanzada en su totalidad. Sin embargo, se atribuye esto a falta de calibración y a las holguras presentes debido a la construcción mecánica del guante.

Es por ello por lo que, para el prototipo, se considera que la validación resultó exitosa, aunque falte corregir algunos detalles para lograr la calidad esperada en el producto final.

8.2.5. Sensación de tacto

Luego de aplicar la simplificación a los 3 dedos más influyentes de la mano para esta sensación. Fue posible sentir presión sobre los dedos de la mano al interactuar con objetos en el mundo virtual.

La validación resulta exitosa.

8.2.6. Verificación de la precisión del movimiento

Fue posible comprobar una precisión de al menos 5mm tanto en la posición de la mano en el espacio como en el movimiento de los dedos respecto de la mano.

La validación resulta éxito.

8.2.7. Duración de la batería

Durante el proceso de pruebas, el guante se mantuvo alimentado únicamente por su batería. Luego de un tiempo de 1hr 50minutos la batería se agotó completamente y el dispositivo se apagó. Si bien fue la única prueba realizada respecto a la duración de la batería, esta excedió la esperada en más de 20 minutos.

Si bien es necesario conducir más pruebas al respecto, la validación inicial resulta exitosa.



Ilustración 8.2: Resultado del ensayo de duración de batería

8.2.8. Funcionamiento cableado

Conectando el producto al cargador, puede verificarse que puede utilizarse normalmente sin problemas.

La validación resulta exitosa.

8.2.9. Apagado automático

Se pudo verificar que, configurando un tiempo de apagado automático, el dispositivo finaliza todas sus conexiones activas y desactiva su propia alimentación una vez transcurrido dicho tiempo.

La validación resulta exitosa.

8.2.10. Utilización del SDK por programador ajeno a GraVR

Se propuso a un programador ajeno al proyecto, colega de uno de los desarrolladores del proyecto que contaba con conocimientos previos en Unity, programar parte del escenario de prueba utilizado para la validación. El resultado de esta prueba de validación fue positivo, se obtuvo feedback que permitió rediseñar algunas secciones del SDK desarrollado, pero en general el programador se halló cómodo con la interfaz. En específico, comenta que el SDK desarrollado “se encuentra al nivel de otros SDK desarrollados por grandes empresas” .

8.3. Evaluación

8.3.1. Evaluación de resultados técnicos

Luego de realizar las simplificaciones planteadas a lo largo del informe, los resultados técnicos obtenidos en cuanto a inmersividad y simulación de experiencias sensoriales superaron las expectativas. Mas allá de ello, las tecnologías utilizadas en base a nuestra experiencia previa demostraron no ser las soluciones óptimas para el desarrollo del producto, con lo cual se presenta una gran oportunidad para mejoras a futuro.

8.3.2. Evaluación de la planificación

Si bien los procesos no se fueron sucediendo exactamente de la forma planeada, y los tiempos de ejecución distaron de lo planteado originalmente en algunos casos, a grandes rasgos la planificación del proyecto fue exitosa. Esto se debe sencillamente a que se llega a la fecha pautada de finalización con los resultados deseados y con un prototipo funcional del producto diseñado. La metodología planteada de desarrollo e investigación incremental, de módulos más aislados a más integrados, permitió la identificación temprana de problemas que el diseño podría enfrentar en el futuro, como es el caso de Hand Tracking, donde estas pruebas ayudaron a ver que un seguimiento óptico no iba a ser viable por la oclusión generada por los otros módulos, como *Force Feedback*.

Ha de decirse que se contó con estos tiempos para realizar estas pruebas, gracias al cese en el dictado de clases, durante los meses de enero y febrero. Esto permitió un espacio temporal entre los estudios de factibilidad y las tareas de diseño.

Si bien la utilidad de estas pruebas ha de resaltarse, debe decirse también que, de haber tenido la posibilidad de arrancarse antes con estos aspectos técnicos, podría haberse llegado a considerar anticipadamente aspectos de integración de más alto nivel, que habrían preventido retrasos en el diseño mecánico y electrónico del circuito impreso. Estos retrasos debieron ser compensados más adelante sobre el final del proyecto, con un desarrollo más acelerado de la componente de software del producto.

8.3.3. Evaluación de la factibilidad financiera

En lo que respecta a la factibilidad financiera, los resultados son satisfactorios, habiéndose podido respetar, a grandes rasgos, los costos proyectados. Cabe aclarar que, al hablar de estos costos, no se refiere necesariamente a los costos afrontados para el prototipo, en el cual debió enfrentarse, en varios casos, costos de componentes a precios minoristas.

8.4. Consideraciones finales hacia el producto final

Existen aspectos de este prototipo que, naturalmente, deberían ser iterados y mejorados en vistas a un producto final. En esta sección se habla de aquellos aspectos identificados en el desarrollo del prototipo.

En primer lugar, una de las mayores dificultades afrontadas en la construcción del prototipo resultó la reducción de tamaños para permitir la integración de todos los módulos involucrados. Sin embargo, las reducciones logradas no son las suficientes para un producto comercial, y se requieren mejoras en ese aspecto. Afortunadamente, la lógica de una economía de escala que puede ser aplicada para el producto final permite el uso de otras herramientas no disponibles en el desarrollo del prototipo. Entre ellas, la más notable es la posibilidad de integrar algunos módulos de la electrónica en circuitos integrados dedicados, reduciendo considerablemente el tamaño de la NerveBox.

Otra herramienta útil para la reducción de tamaño de la NerveBox es la de circuitos impresos de mayor cantidad de placas. Su producción minorista para un prototipo incrementaba considerablemente los costos, pero una economía de escala permitiría considerarlo como opción, y aliviaría la complejidad de las conexiones en esta placa.

El otro módulo que presentó dificultades a la hora de reducir su tamaño fue el de *Force Feedback*, y la razón son los tamaños de los servomotores y los potenciómetros. En este aspecto, se plantea considerar tecnologías de frenado electromagnético, que permitirían reducir esos tamaños problemáticos.

Finalmente, se tiene el mencionado problema del cableado de los distintos módulos. Una implementación comercial debería incorporar una protección para estas conexiones, potencialmente integrada con un diseño personalizado del guante de soporte.

9. Conclusiones

9.1. Cumplimiento de Objetivos

En retrospectiva a los comienzos de este trabajo, los objetivos logrados resultan altamente satisfactorios. La dificultad de los desafíos afrontados, en varias ocasiones transitando la frontera tecnológica de lo desarrollado hasta el momento, dan valor a las soluciones propuestas. Si bien este diseño no es libre de fallas, y efectivamente hay mejoras por plantear en desarrollos futuros, los méritos de lo alcanzado deben ser remarcados. En resumen, los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente.

9.2. Lecciones aprendidas

La complejidad del trabajo desarrollado deja numerosas enseñanzas para sus participantes. Tal vez la primera está relacionada a la necesidad de conocimientos multidisciplinarios a la hora de innovar. En este diseño en particular, esto se hizo especialmente evidente en los aspectos mecánicos, donde la experiencia previa de la mayoría de los desarrolladores era escasa. Un ejemplo de esta situación puede identificarse en la elección de servomotores para el módulo de *Force Feedback*, los cuales fueron elegidos priorizando la confianza de funcionamiento que se tenía en ellos. Sin embargo, con los resultados finales, esta decisión limita la escalabilidad del producto y su comodidad, debido principalmente a su tamaño.

Otra de las lecciones aprendidas tiene que ver con la manufacturabilidad, sobre todo en productos con una alta integración de módulos. Las pruebas de concepto realizadas en etapas temprana del desarrollo fueron de ayuda en este aspecto.

9.3. Recomendaciones para futuros diseños

La principal recomendación para futuros proyectos de diseño, surgida de esta experiencia, es la inversión de tiempo en pruebas de concepto, sobre todo en productos que desafíen las barreras de la tecnología existente. En este trabajo, estudiar de forma temprana las posibilidades de implementación de los módulos, efectivamente llevándolas a cabo, fue de vital importancia para su éxito. Se aconseja incluso dedicar más tiempo formalmente a este proceso, para llegar a probar también aspectos de la integración de módulos, y desde el grupo de trabajo, se recomienda analizar estas prácticas para estudiantes que arranquen su proyecto final de diseño a principios de año, y no cuenten con el receso de verano entre las dos etapas del proyecto.

10. Bibliografía

- [1] I. O.-G. F. M.-F. M. Caeiro-Rodríguez, A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications., Vigo, Spain: Sensors, 2021.
- [2] C. P. M. M. F. Chinello, «A three revolute-revolute-spherical wearable fingertip cutaneous device for stiffness rendering,» *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, nº 17683518, pp. 39-50, 2017.
- [3] S. F. H. K. N. K. S. T. K. Minamizawa, «Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to present Virtual Mass Sensation,» de *SIGGRAPH*, San Diego California, 2007.
- [4] V. V. H. S. O. H. Ronan Hinchet, «DextrES: Wearable Haptic Feedback for Grasping in VR via a Thin Form-Factor Electrostatic Brake,» 2018.
- [5] H. S. Ronan Hinchet, «High Force Density Textile Electrostatic Clutch,» 2019.
- [6] A. T. E. R. M. P. a. A. F. Anastasia Tkach, Online Generative Model Personalization for Hand Tracking., ACM Trans. Graph, 2017.
- [7] S. W. D. P. O. H. a. O. S.-H. Oliver Glauser, Interactive Hand Pose Estimation using a Stretch-Sensing Soft Glove., ACM Trans. Graph, 2019.
- [8] U.S. Consumer Product Safety Commission Staff (CPSC staff), AGE DETERMINATION GUIDELINES: Relating Consumer Product Characteristics to the Skills, Play Behaviors, and Interests of Children, 2020.
- [9] Texas Instruments, «I2C Bus Pullup Resistor Calculation,» *Application Report SLVA689*.
- [10] DFR Solutions' Insights, «How To Select The Right Battery For Your Application? Part 3: Common Secondary Battery Chemistries».
- [11] Battery University, «BU-409: Charging Lithium-Ion».
- [12] Murata Electronics, «Choosing Inductors for DC/DC Regulators».
- [13] Maxim Integrated, «MAX77976EVKIT: Evaluation Kit for the MAX77976».
- [14] Analog Devices Inc., «LTC3113 3A Low Noise Buck-Boost DC-DC Converter».

11. Anexos Técnicos

11.1. Esquemáticos

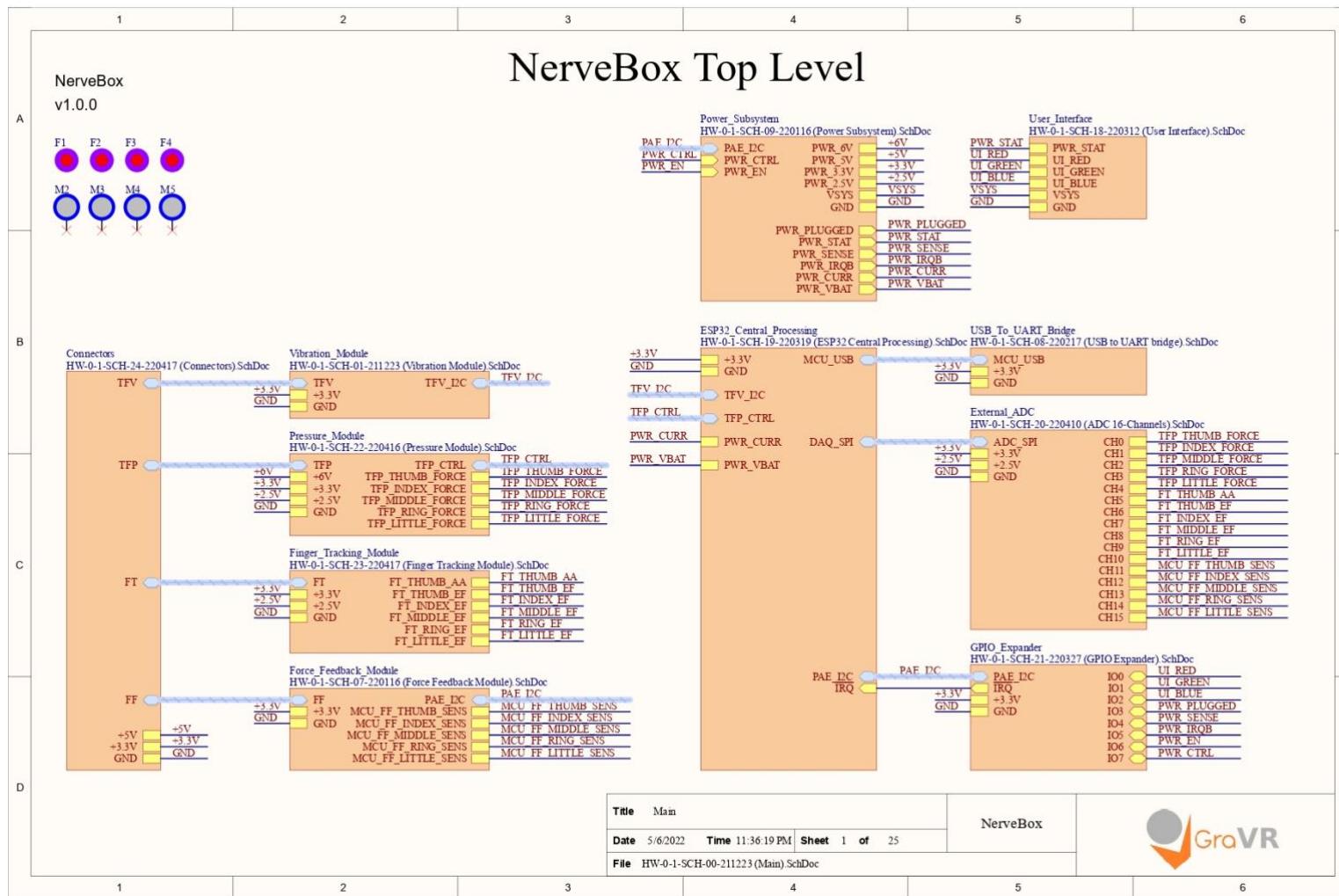
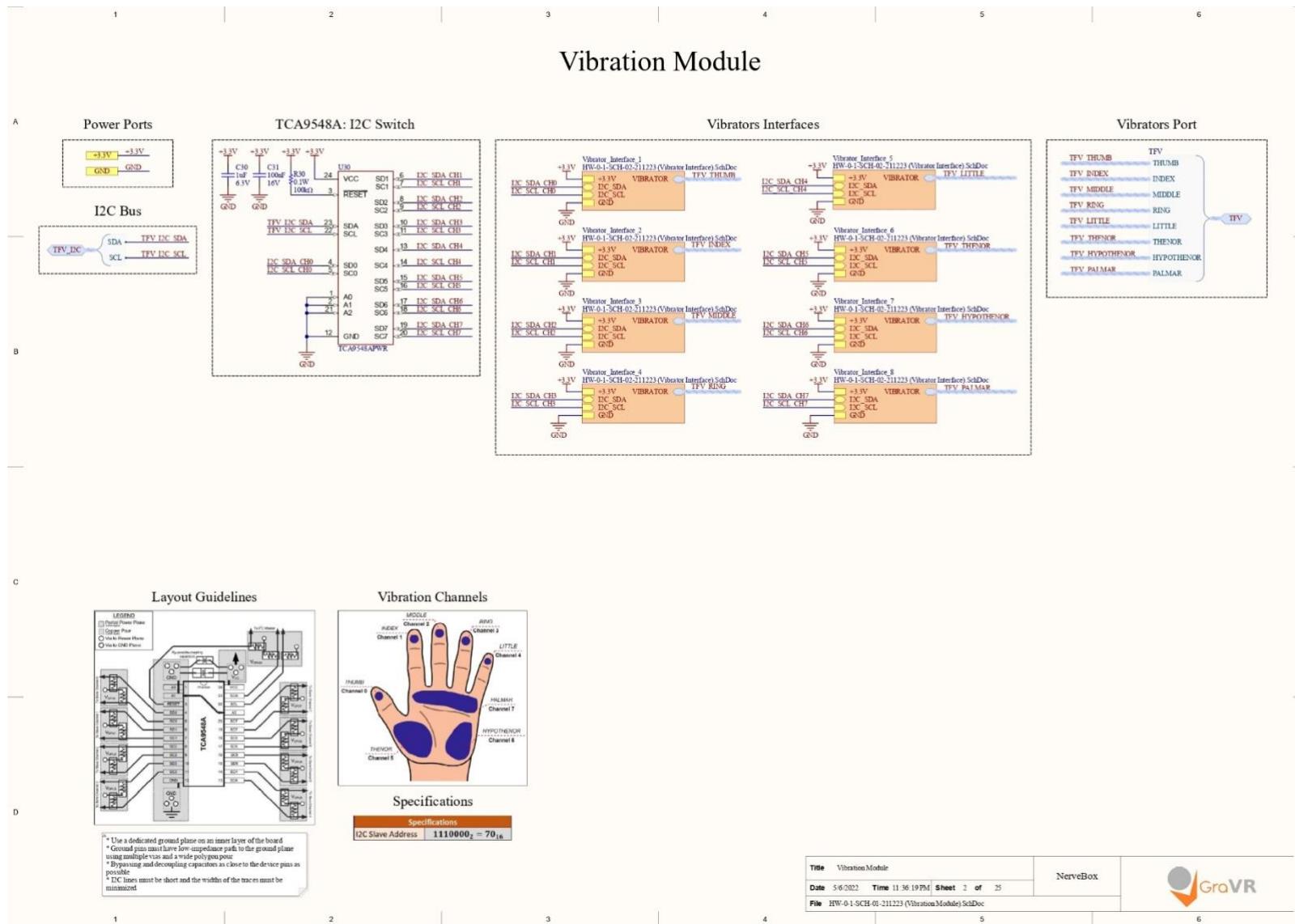


Ilustración 11.1: Esquemático de nivel superior (Sección 6.1.1)

Vibration Module



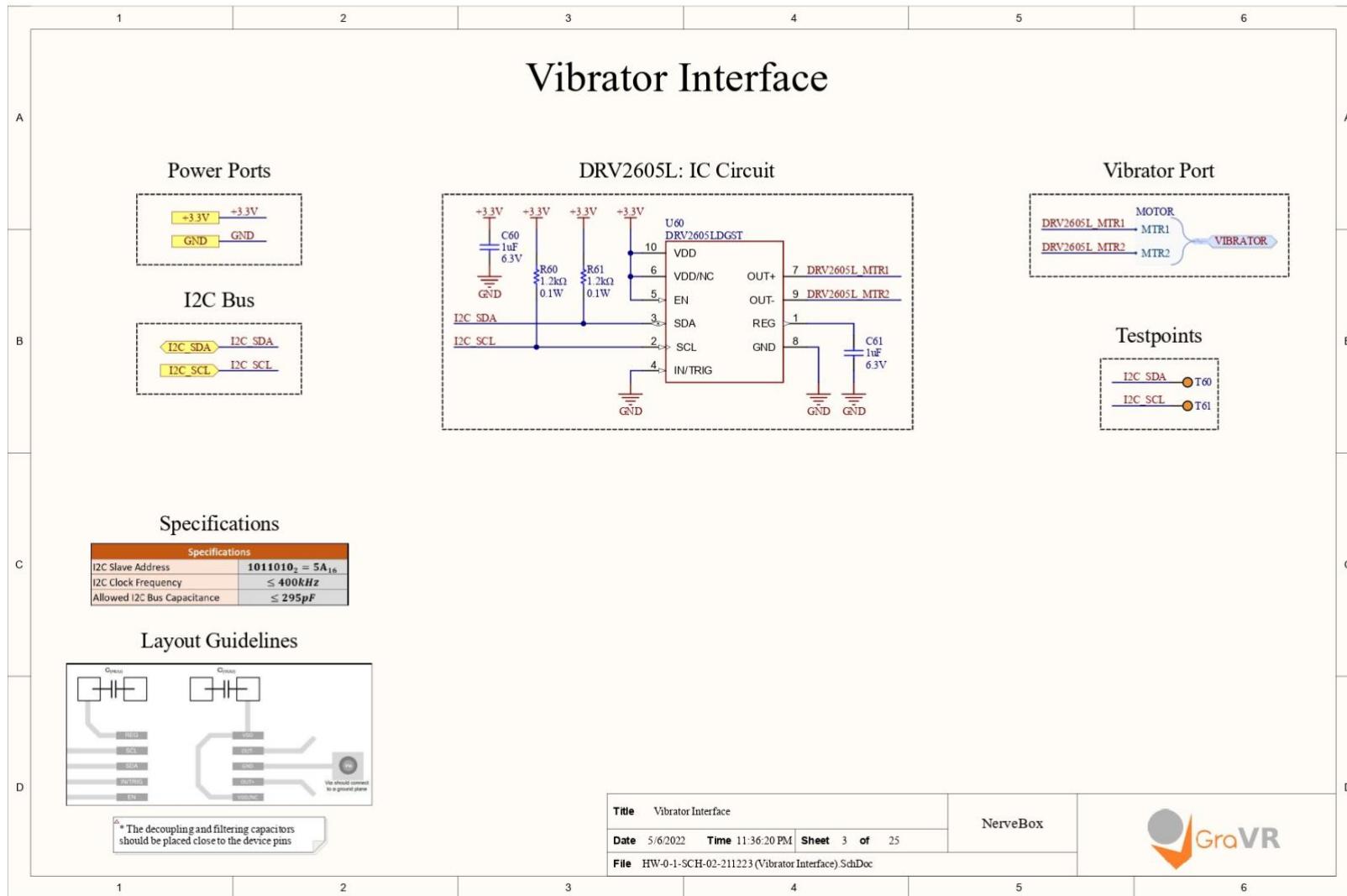


Ilustración 11.3: Esquemático de la interfaz con un vibrador. (Sección 6.1.3.3)

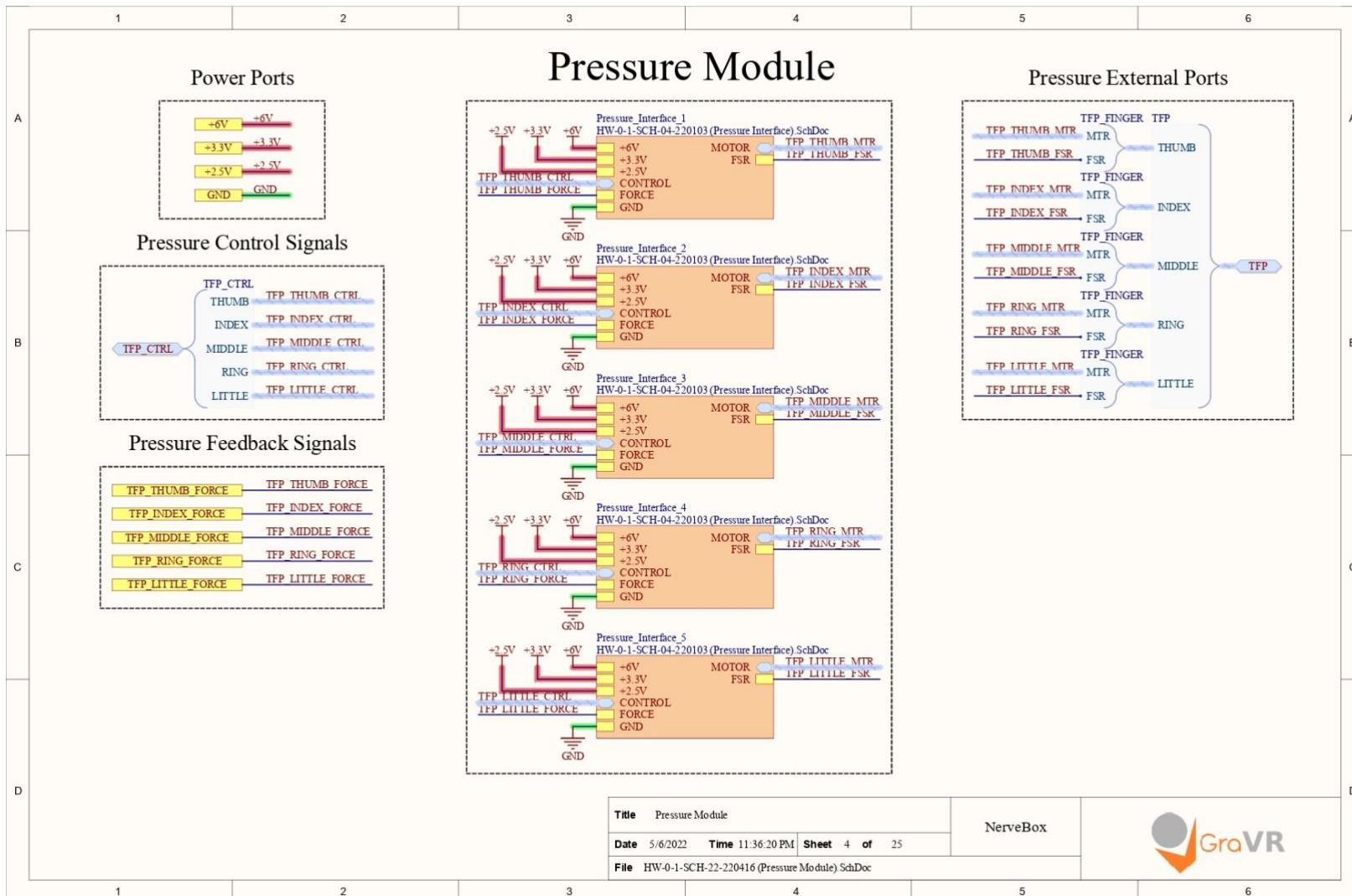


Ilustración 11.4: Esquemático del módulo de presión. (Sección 6.1.2.3)

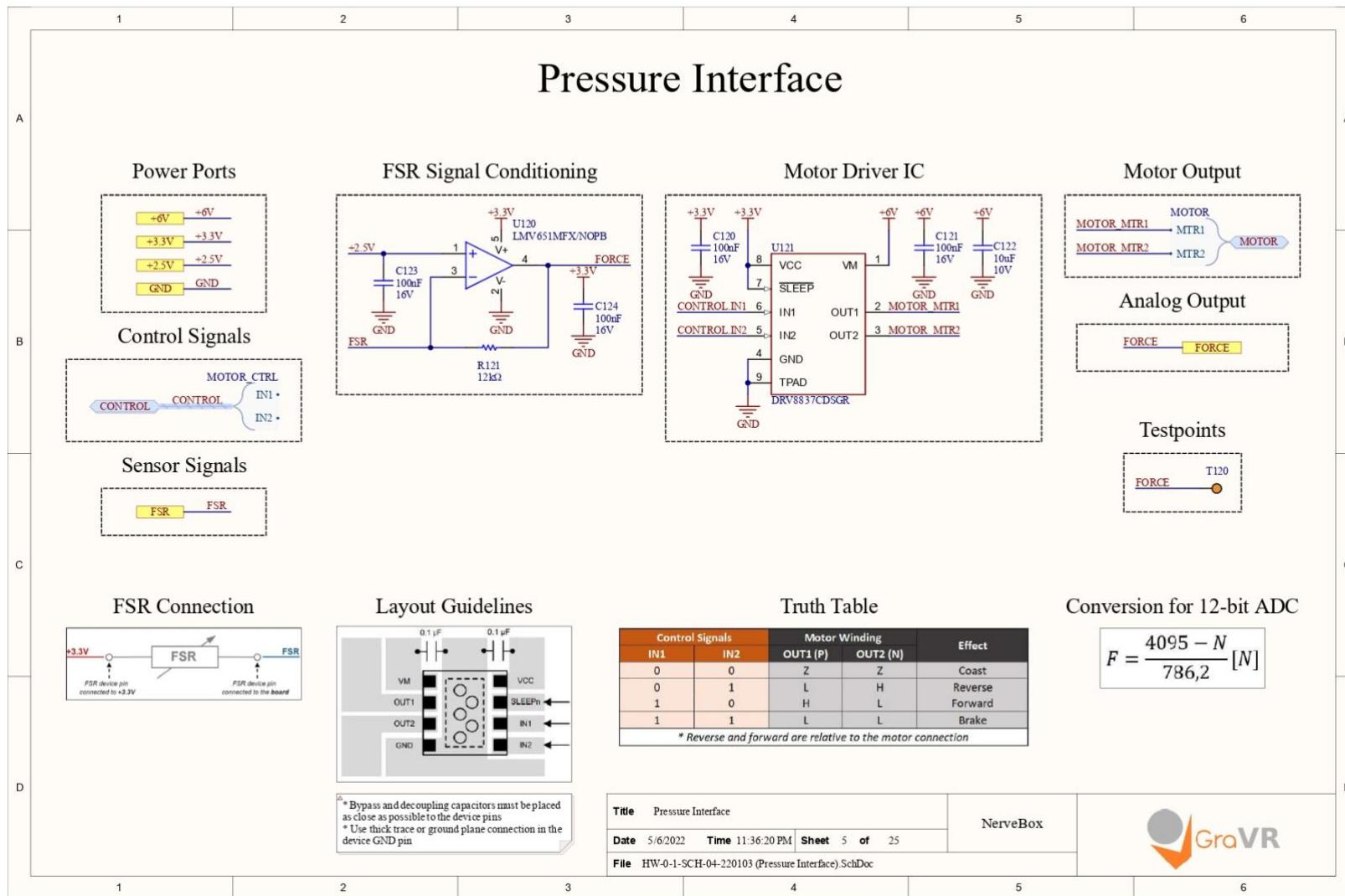


Ilustración 11.5: Esquemático de la interfaz de presión. (Sección 6.1.2.3)

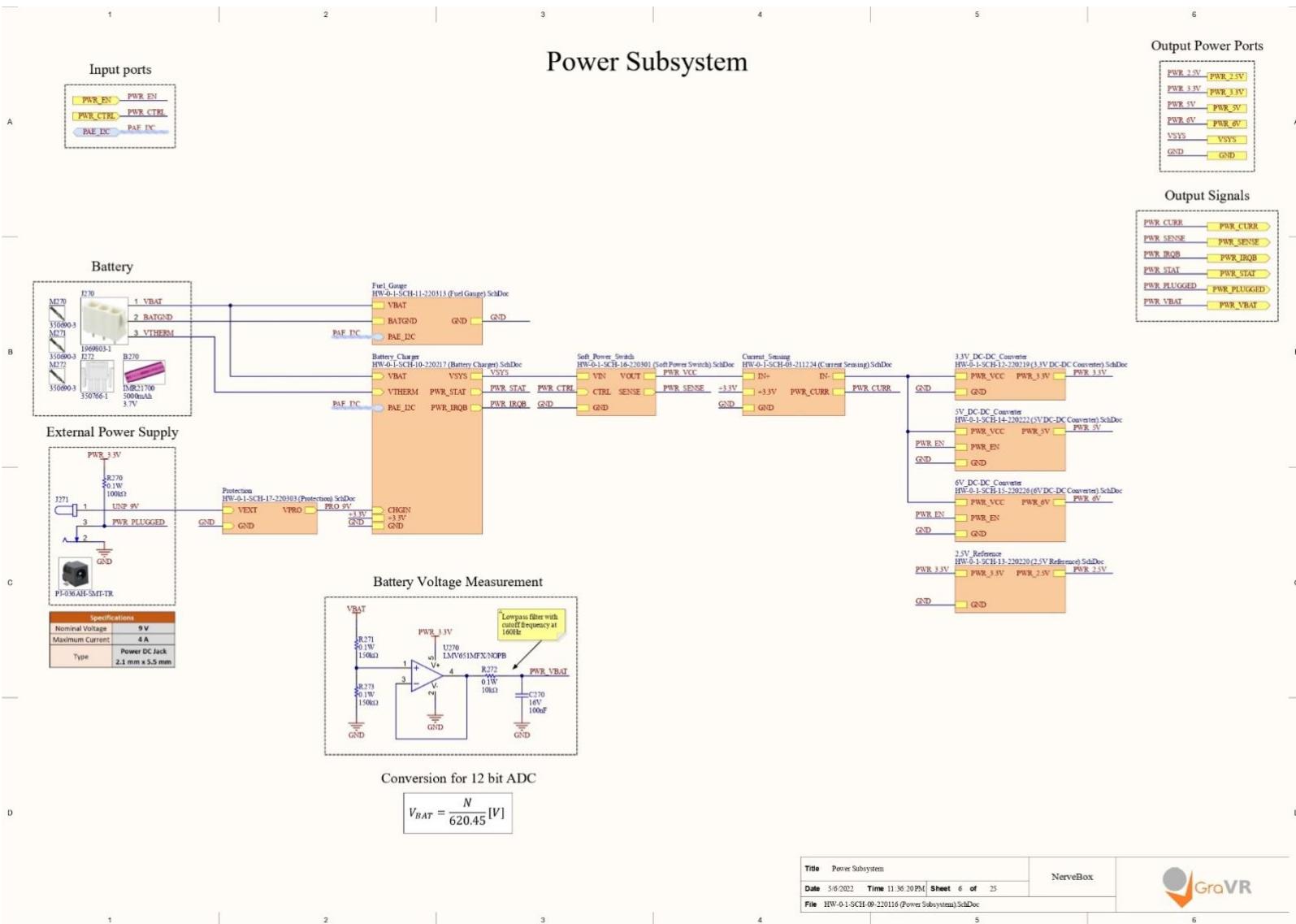


Ilustración 11.6: Esquemático del subsistema de alimentación. (Sección 6.1.6)

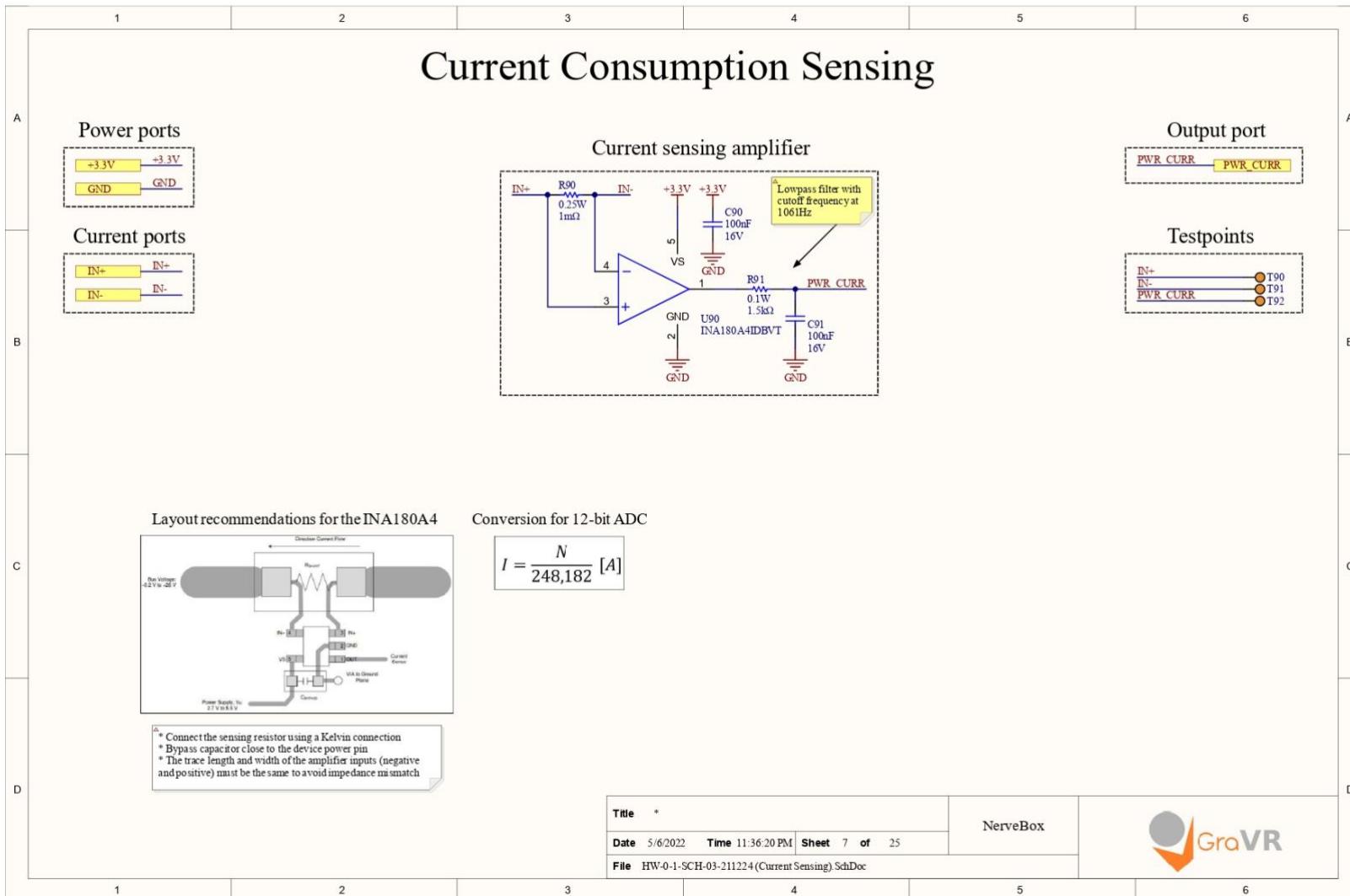


Ilustración 11.7: Esquemático de medición de consumo de corriente. (Sección 6.1.6.6)

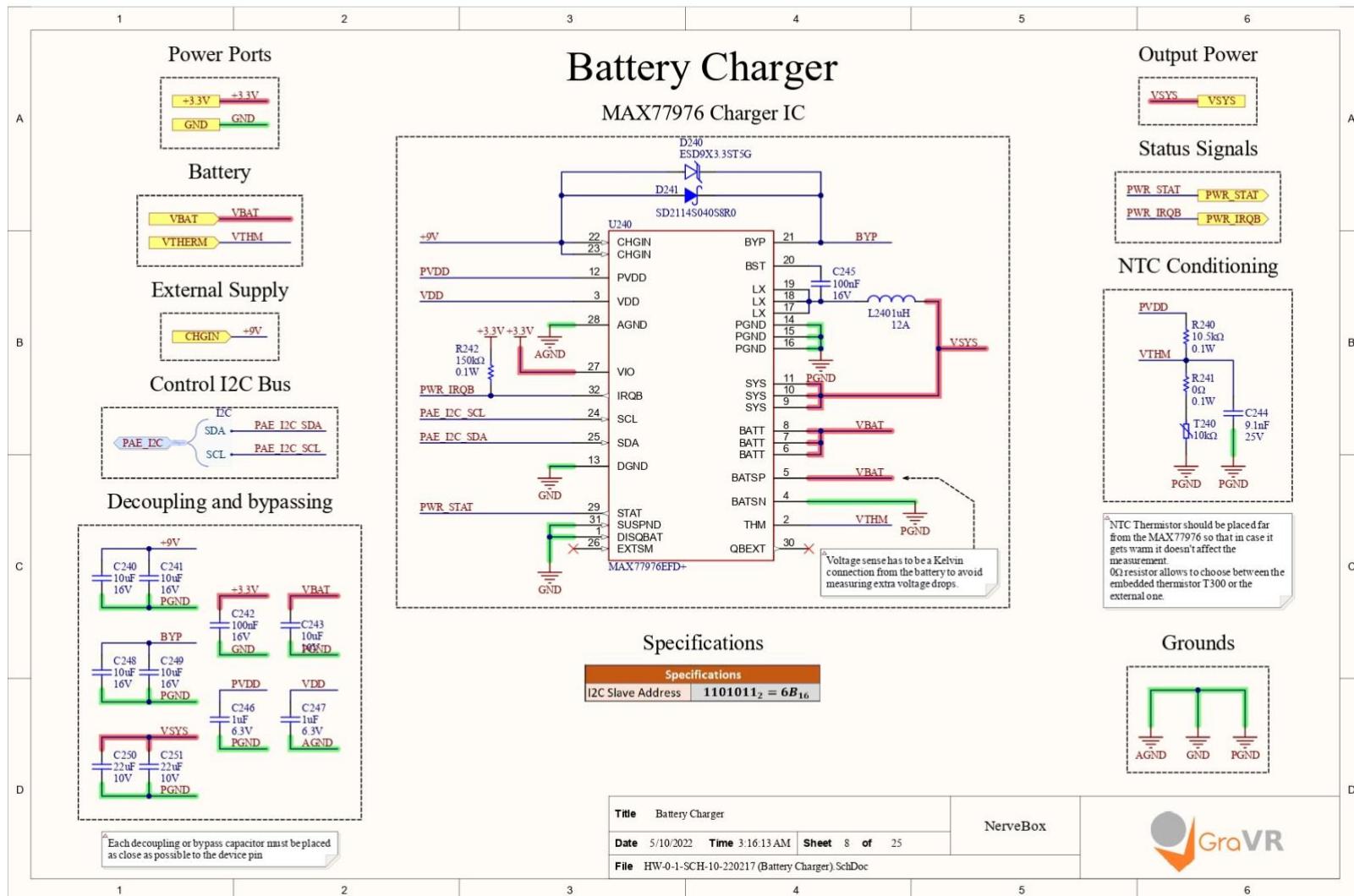


Ilustración 11.8: Esquemático del cargador de batería. (Sección 6.1.6.4)

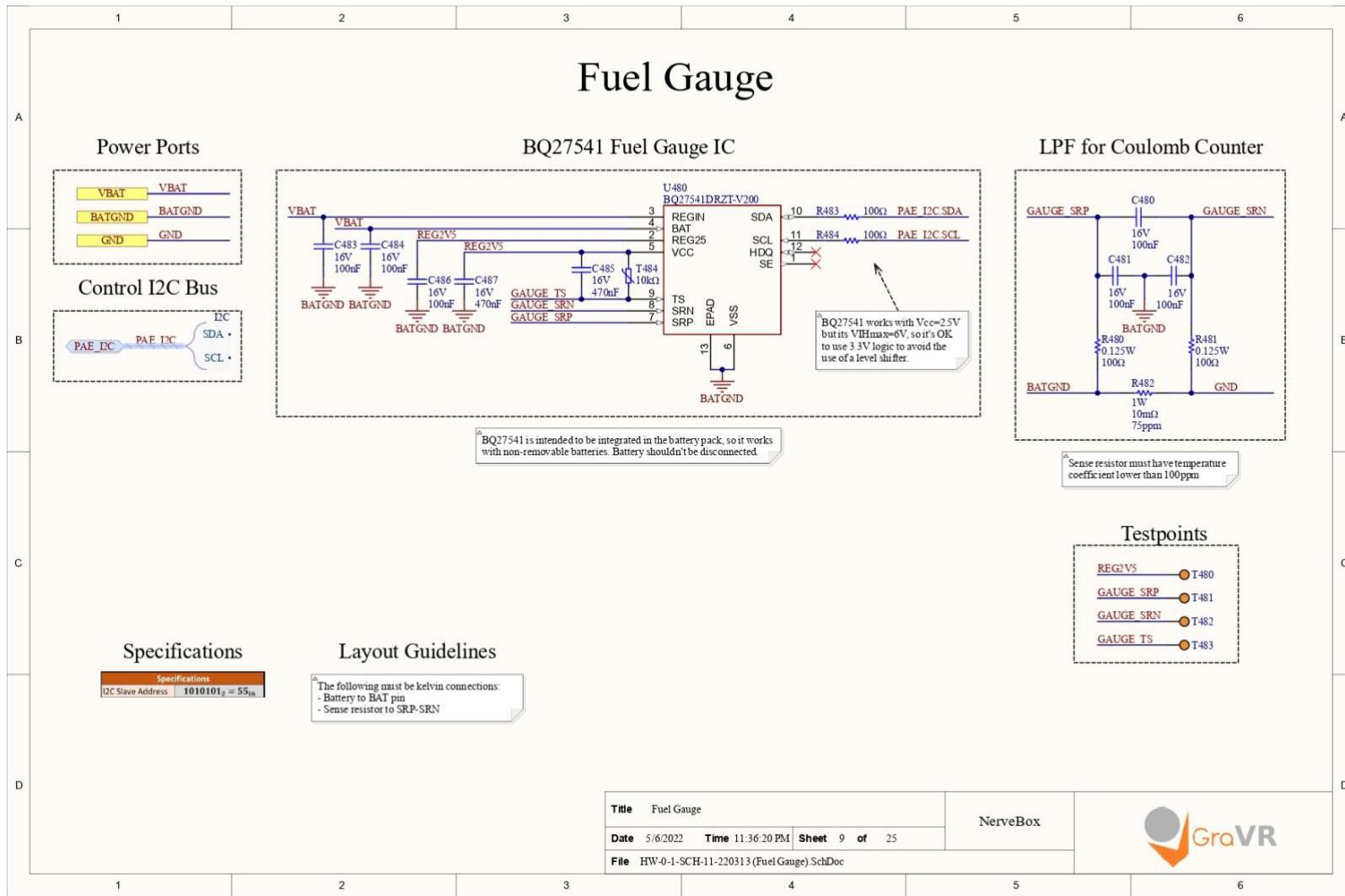


Ilustración 11.9: Esquemático de medición del estado de carga de la batería. (Sección 6.1.6.3)

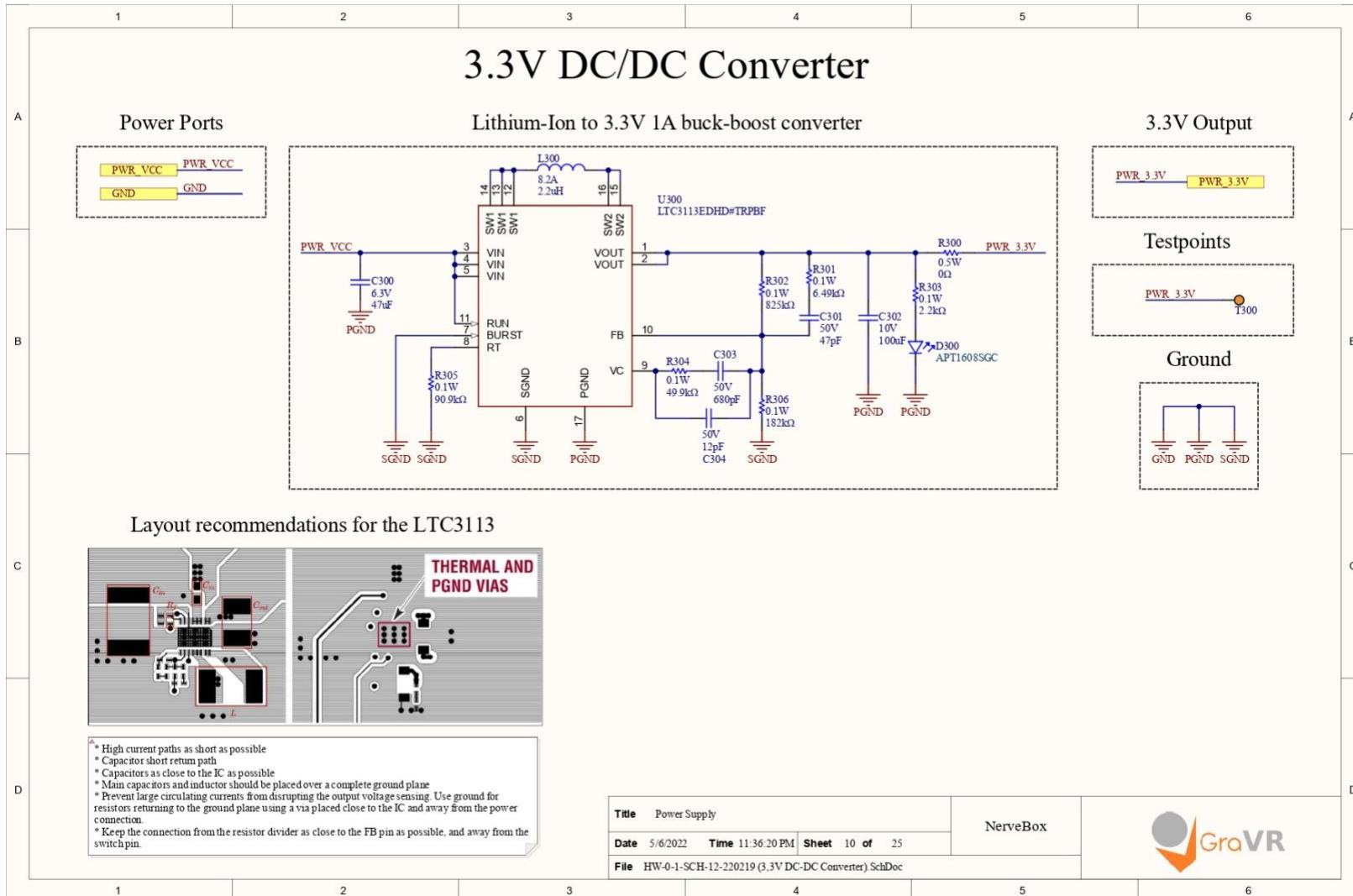


Ilustración 11.10: Esquemático del conversor DC-DC de 3,3V. (Sección 6.1.6.8)

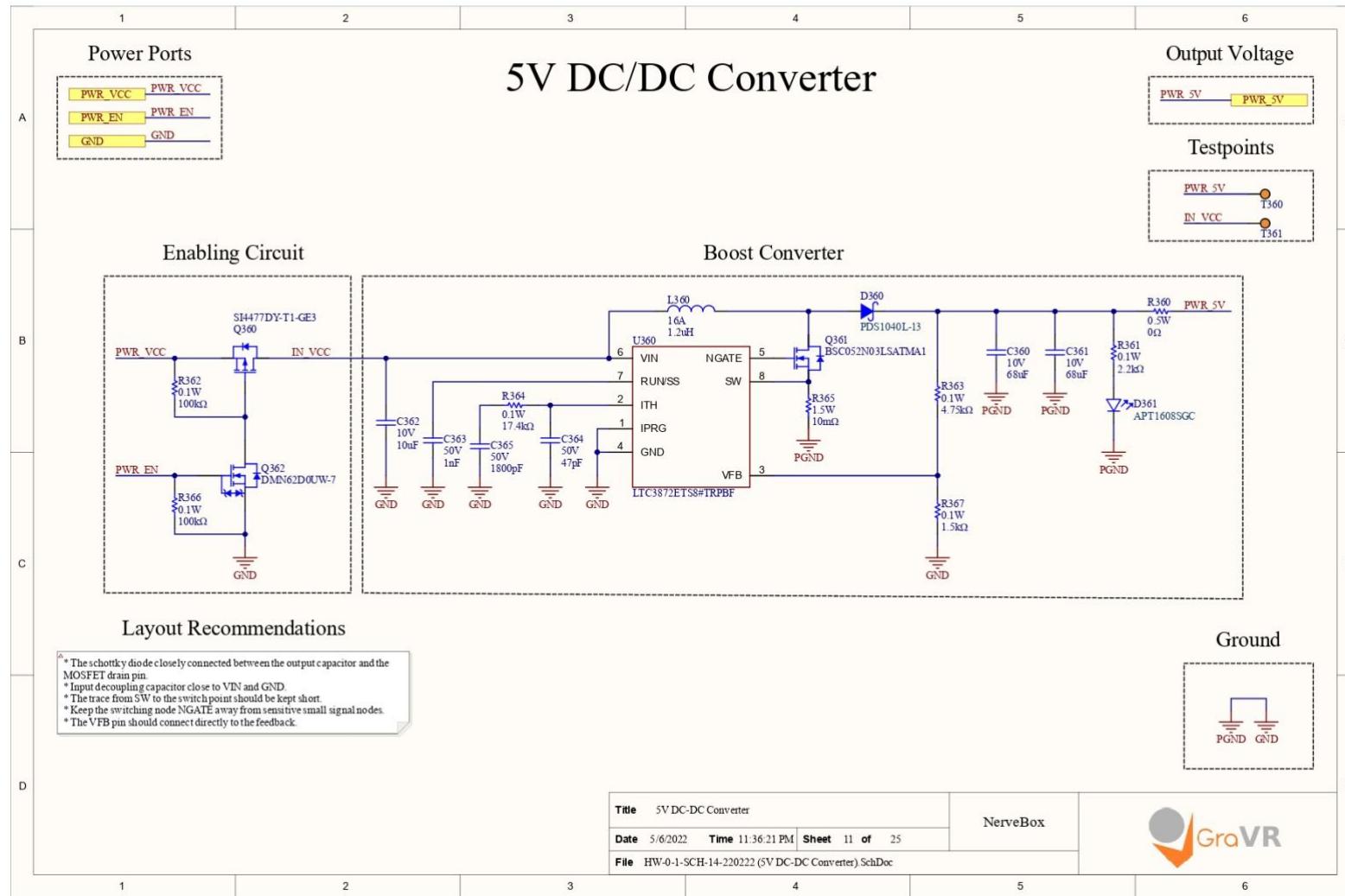


Ilustración 11.11: Esquemático del conversor DC-DC de 5V. (Sección 6.1.6.7)

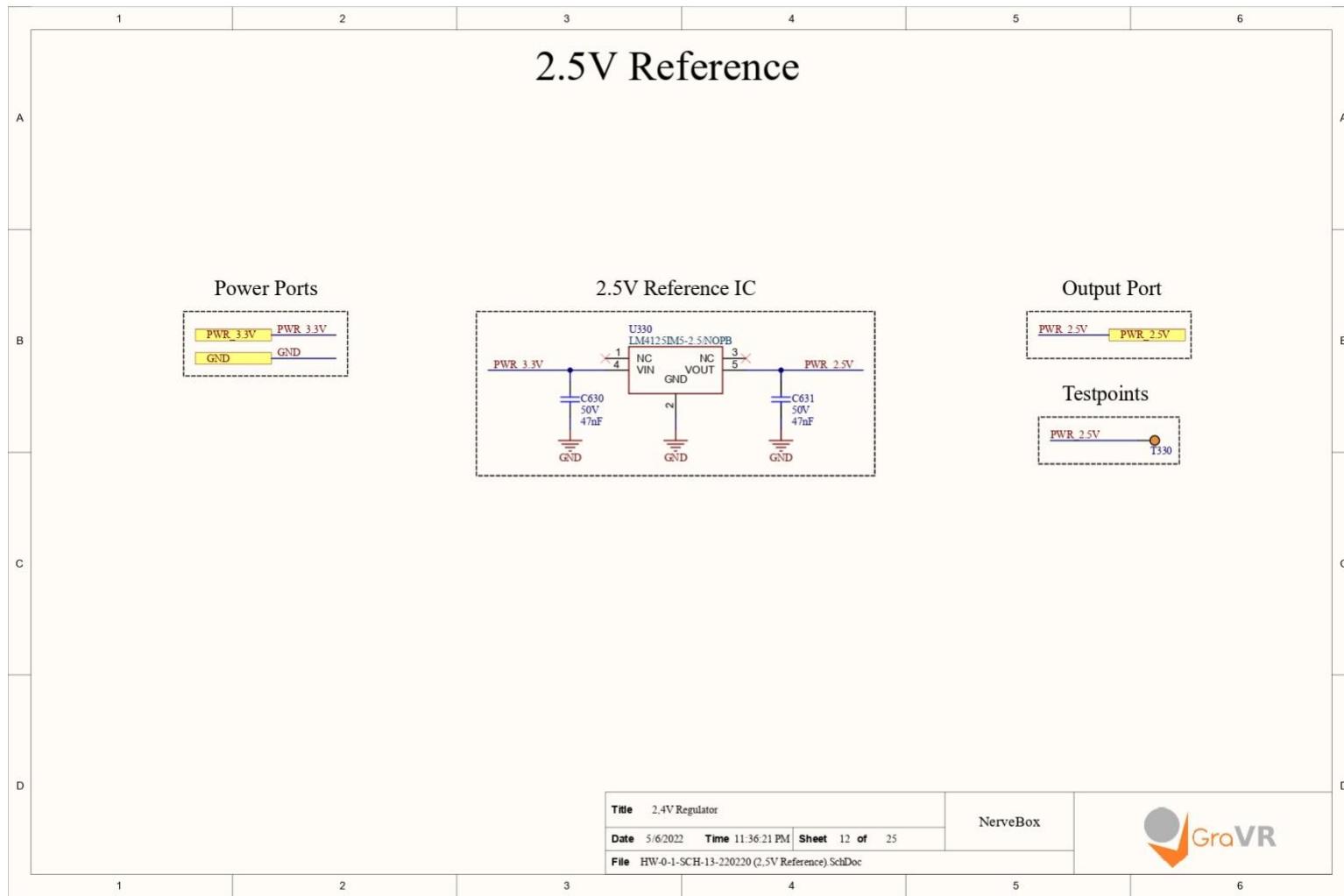


Ilustración 11.12: Esquemático de fuente de referencia de 2.5V. (Sección 6.1.6.9)

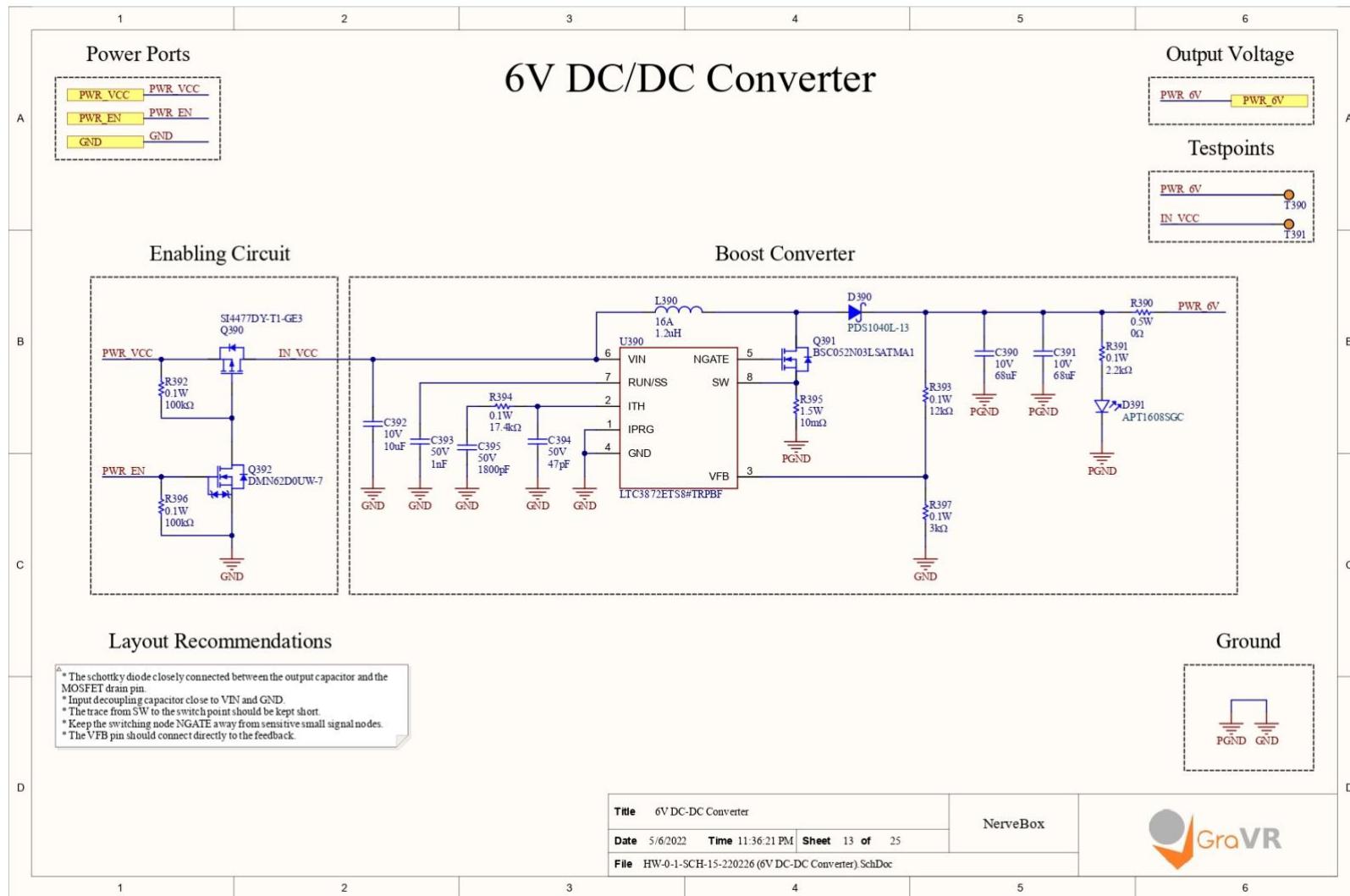


Ilustración 11.13: Esquemático del conversor DC-DC de 6V. (Sección 6.1.6.7)

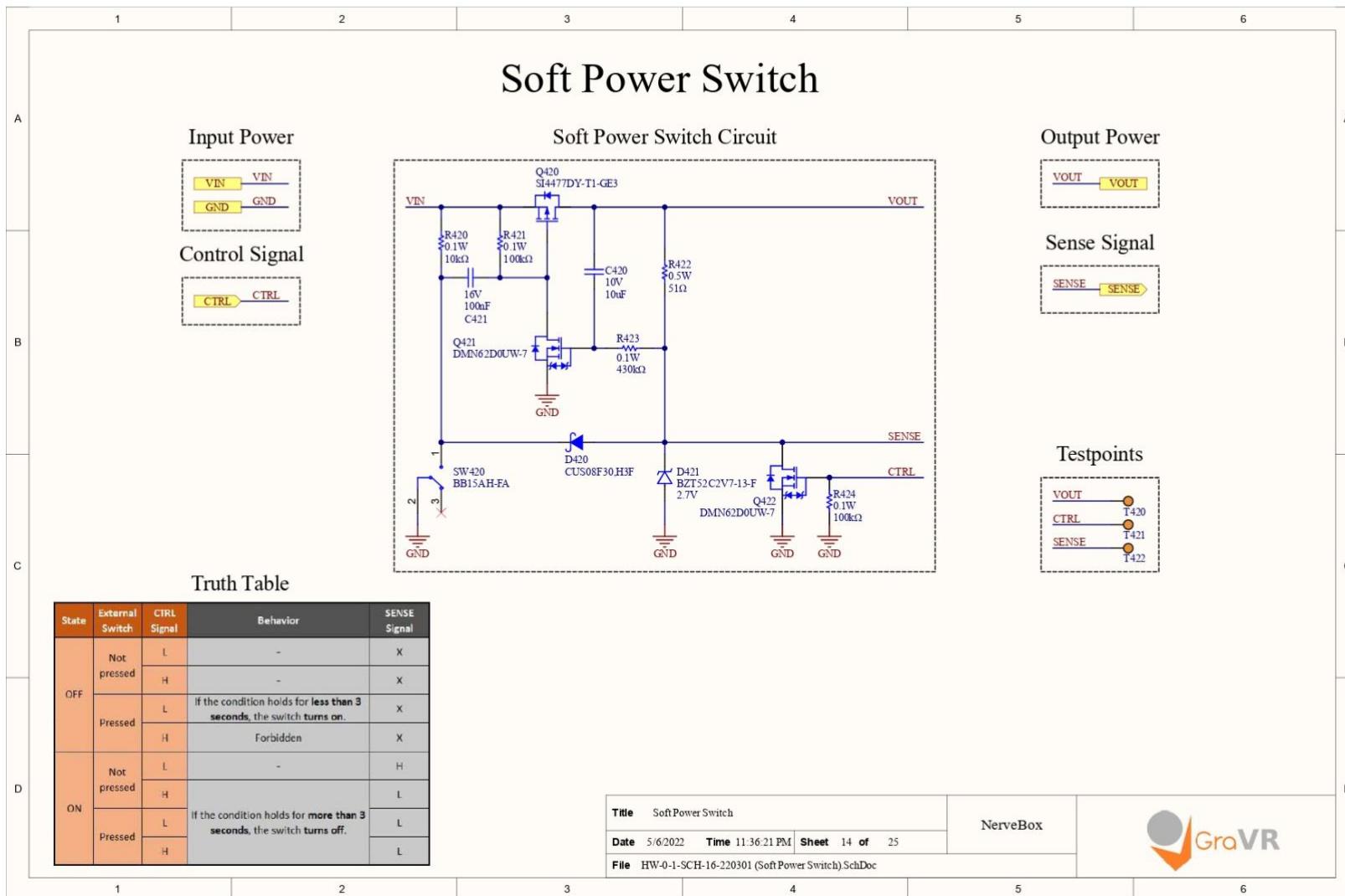


Ilustración 11.14: Esquemático del circuito del pulsador para encendido y apagado. (Sección Error! Reference source not found.)

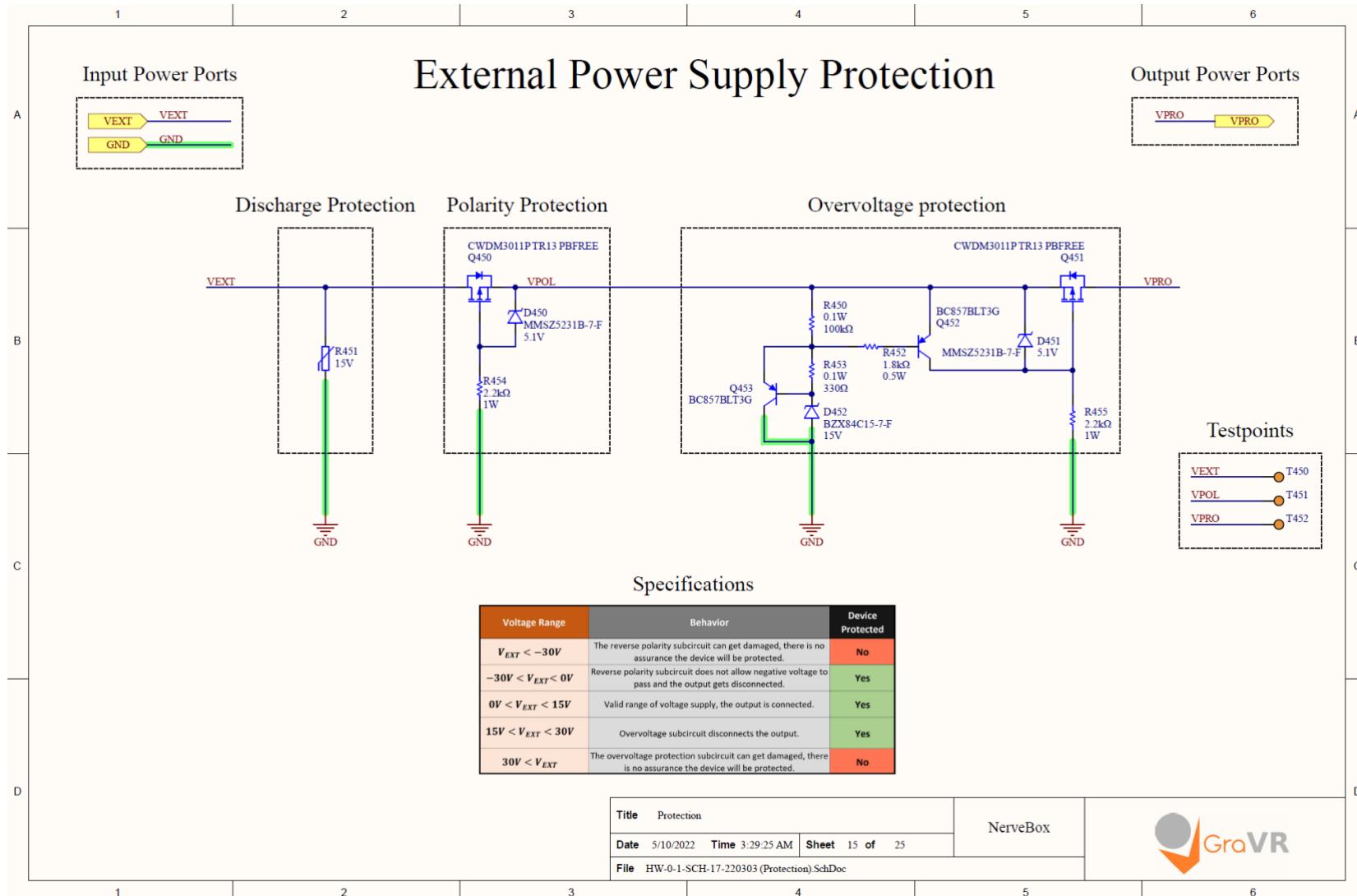


Ilustración 11.15: Esquemático de la protección de la fuente de alimentación externa. (Sección 6.1.6.10)

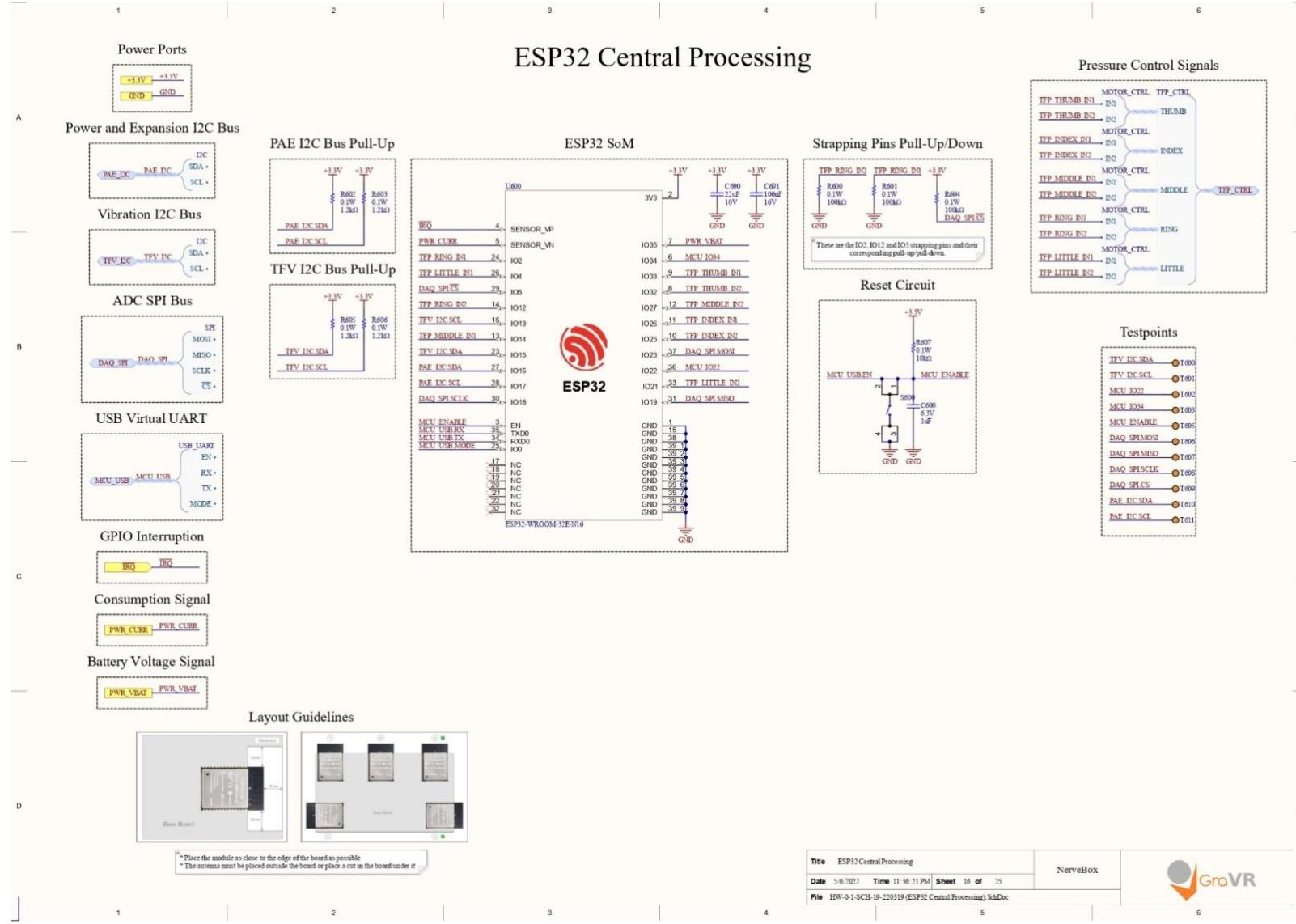


Ilustración 11.16: Esquemático del módulo central de procesamiento ESP32.

Force Feedback Module

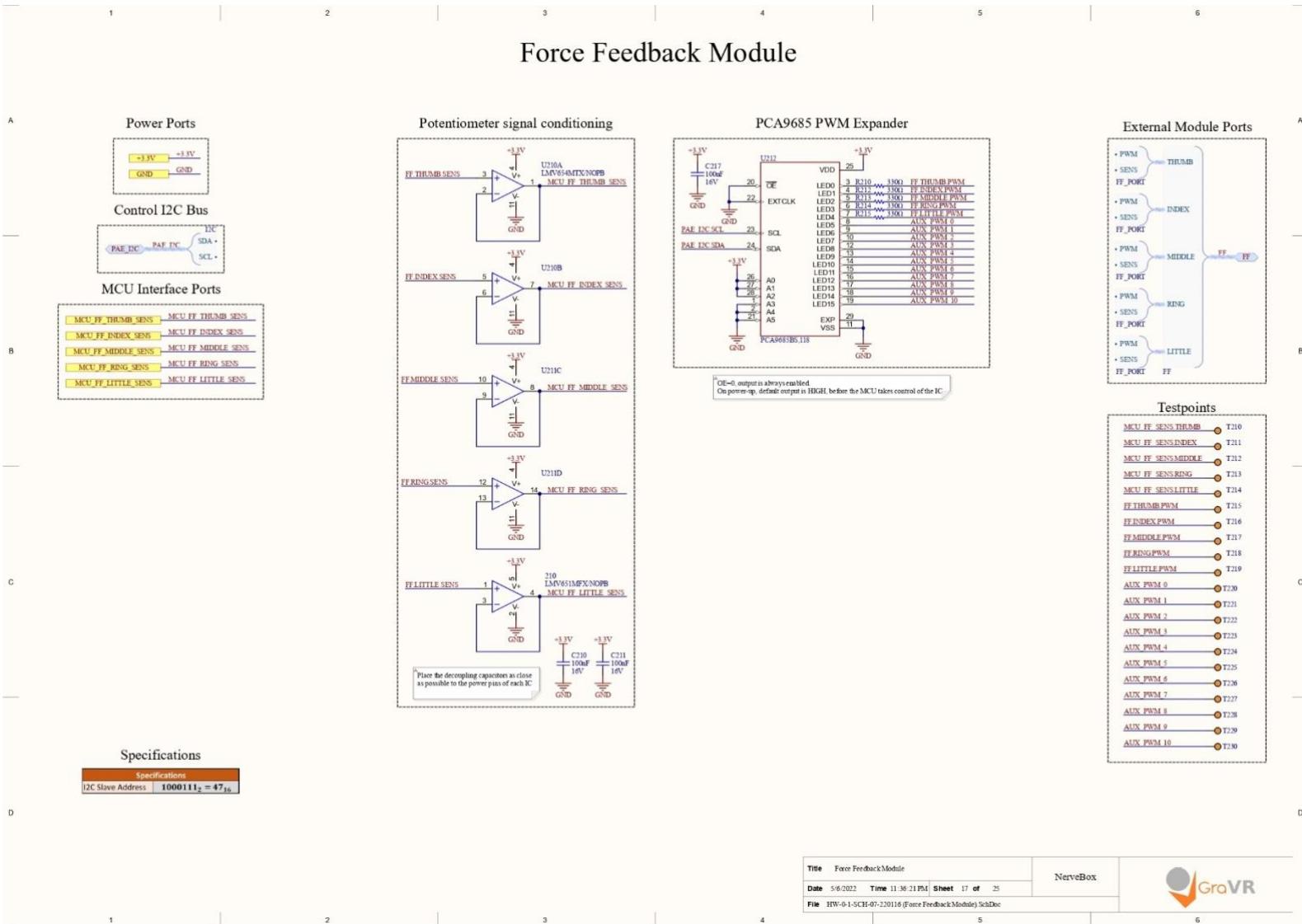


Ilustración 11.17: Esquemático del módulo de force-feedback. (Secciones 6.1.4.3 y 6.1.1.2)

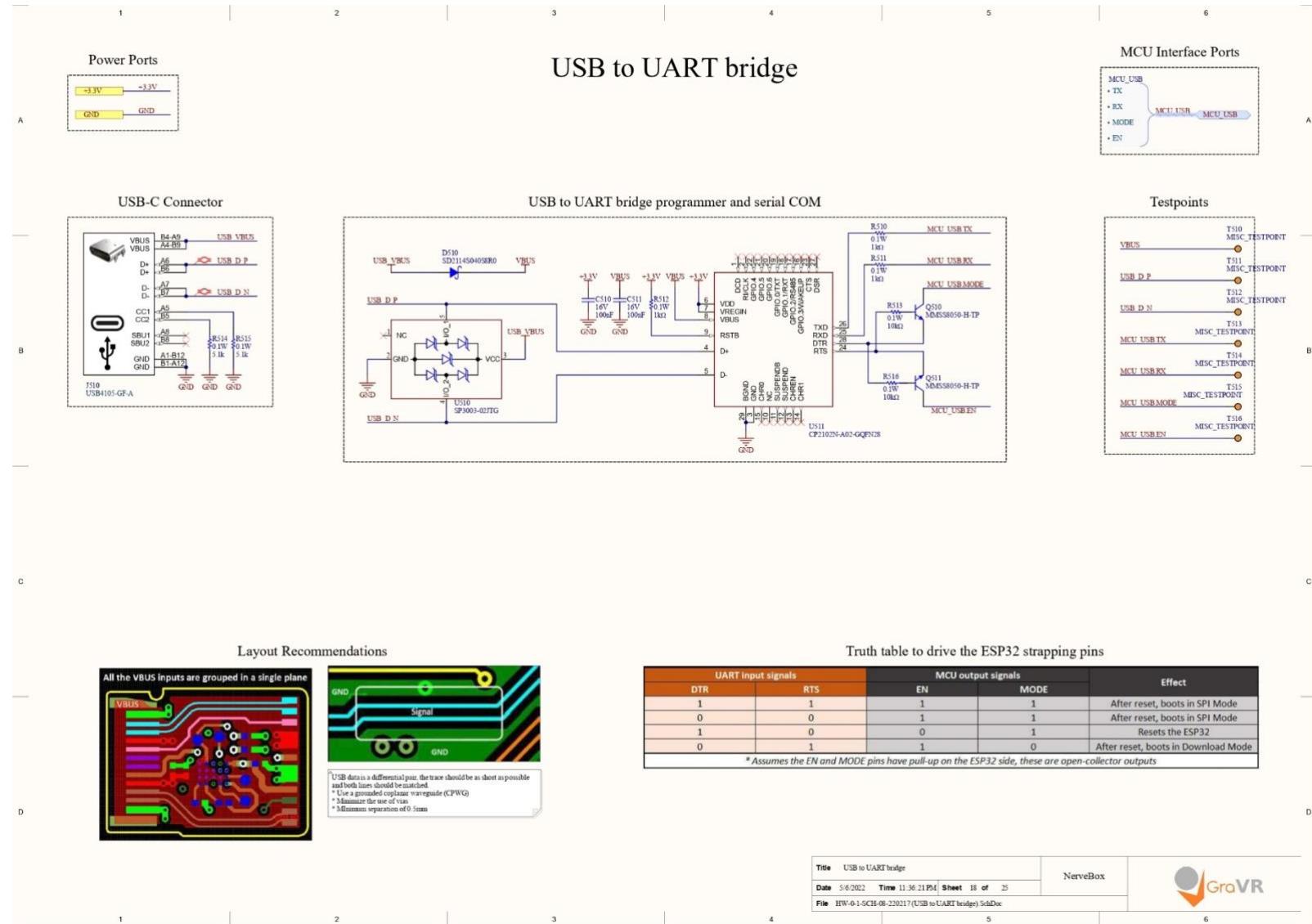


Ilustración 11.18: Esquemático de la conversión de USB a UART. (Sección 0)

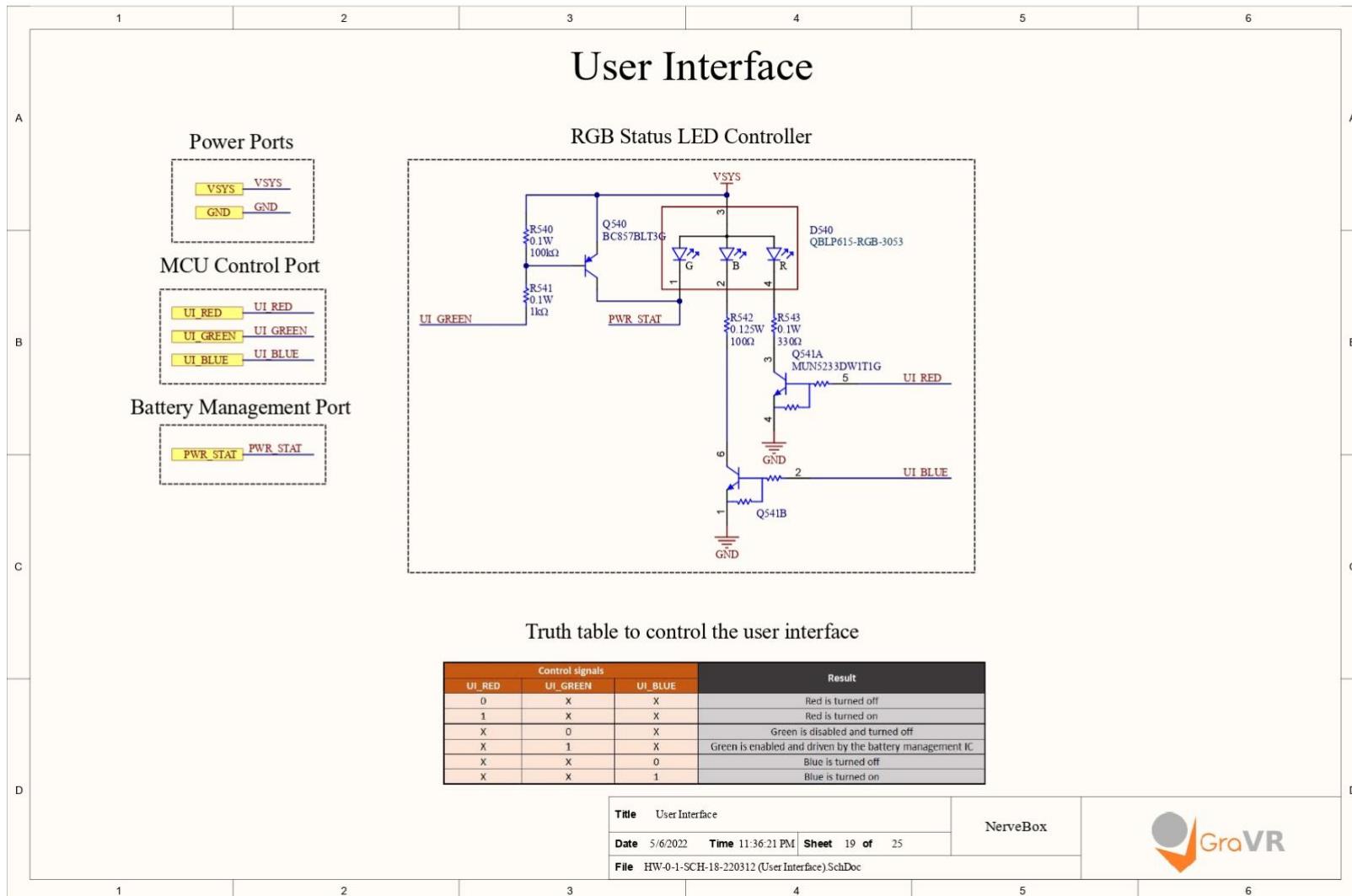


Ilustración 11.19: Esquemático de la interfaz de usuario. (Sección 6.1.1.4)

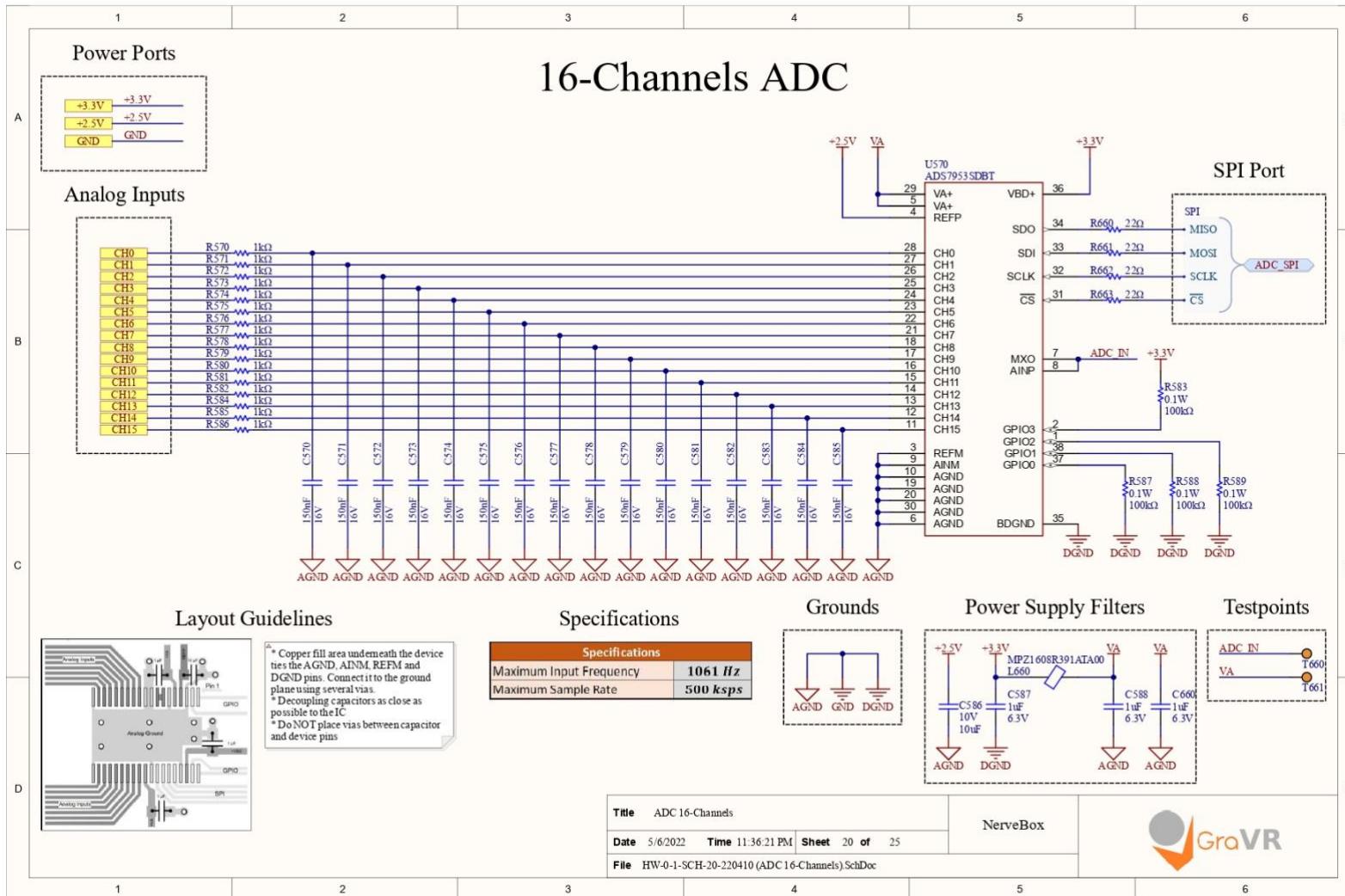


Ilustración 11.20: Esquemático del ADC de 16 canales. (Sección 6.1.1.2)

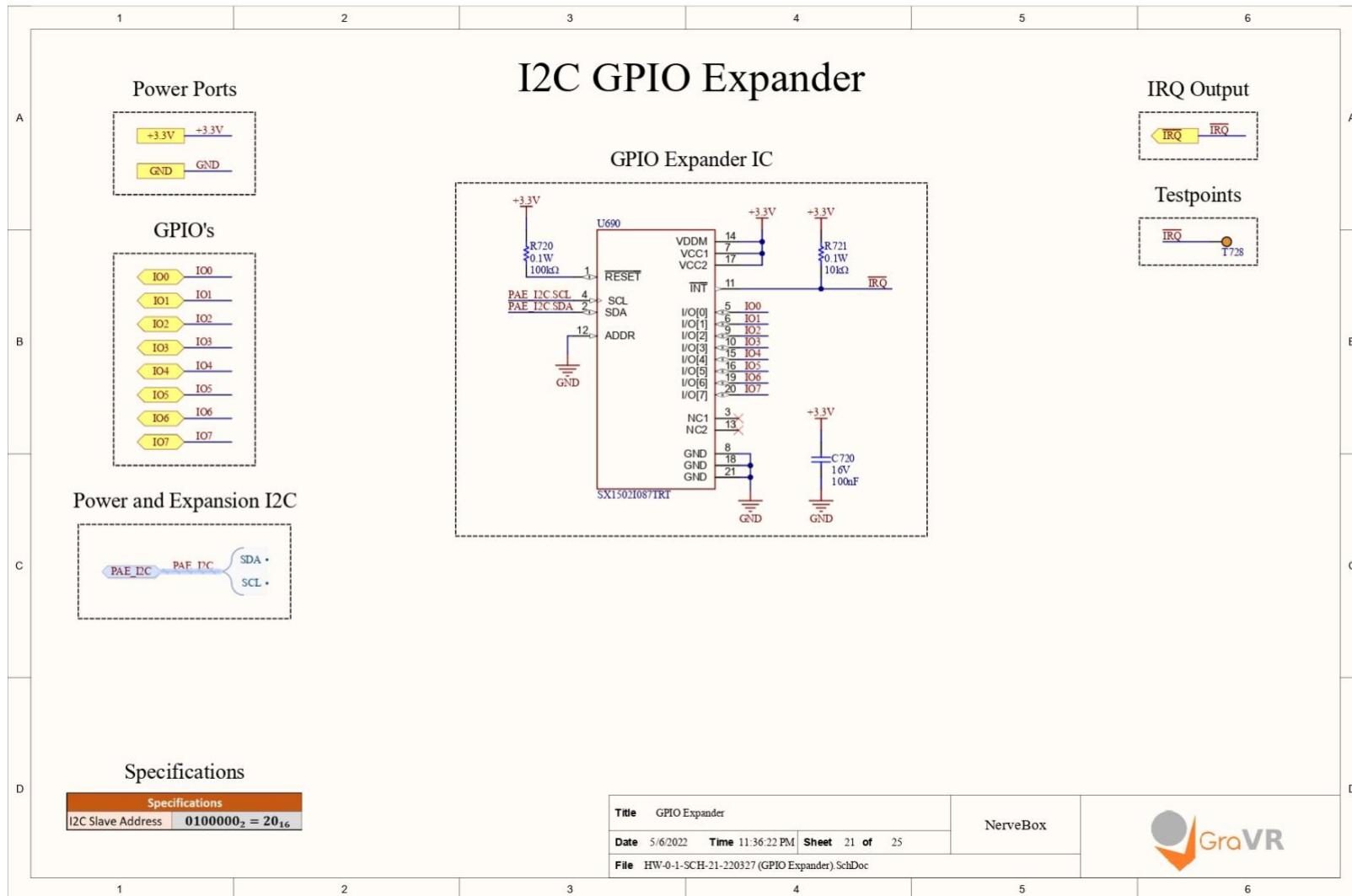


Ilustración 11.21: Esquemático del expander GPIO. (Sección 6.1.1.2)

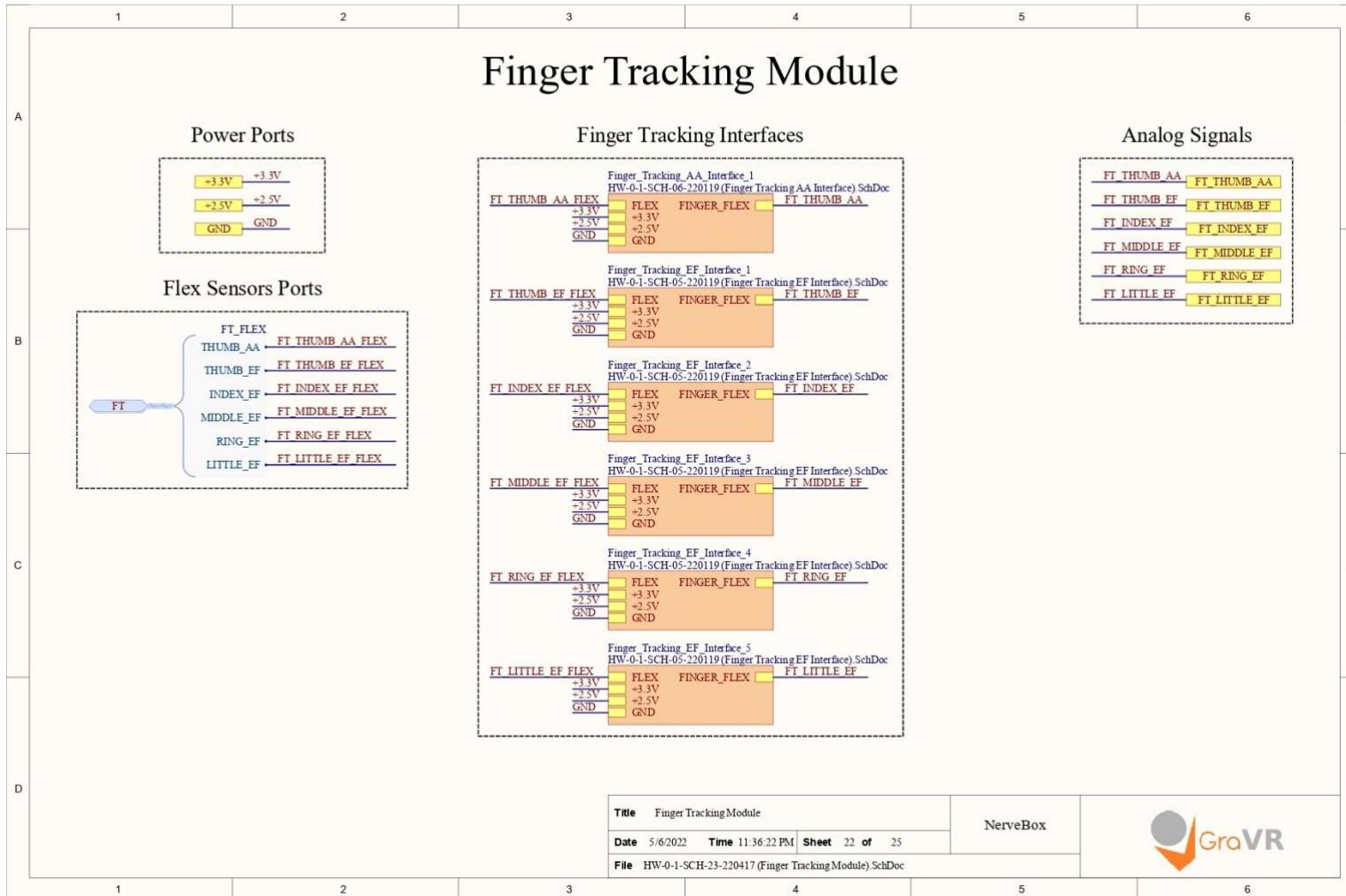


Ilustración 11.22: Esquemático del módulo de finger-tracking.

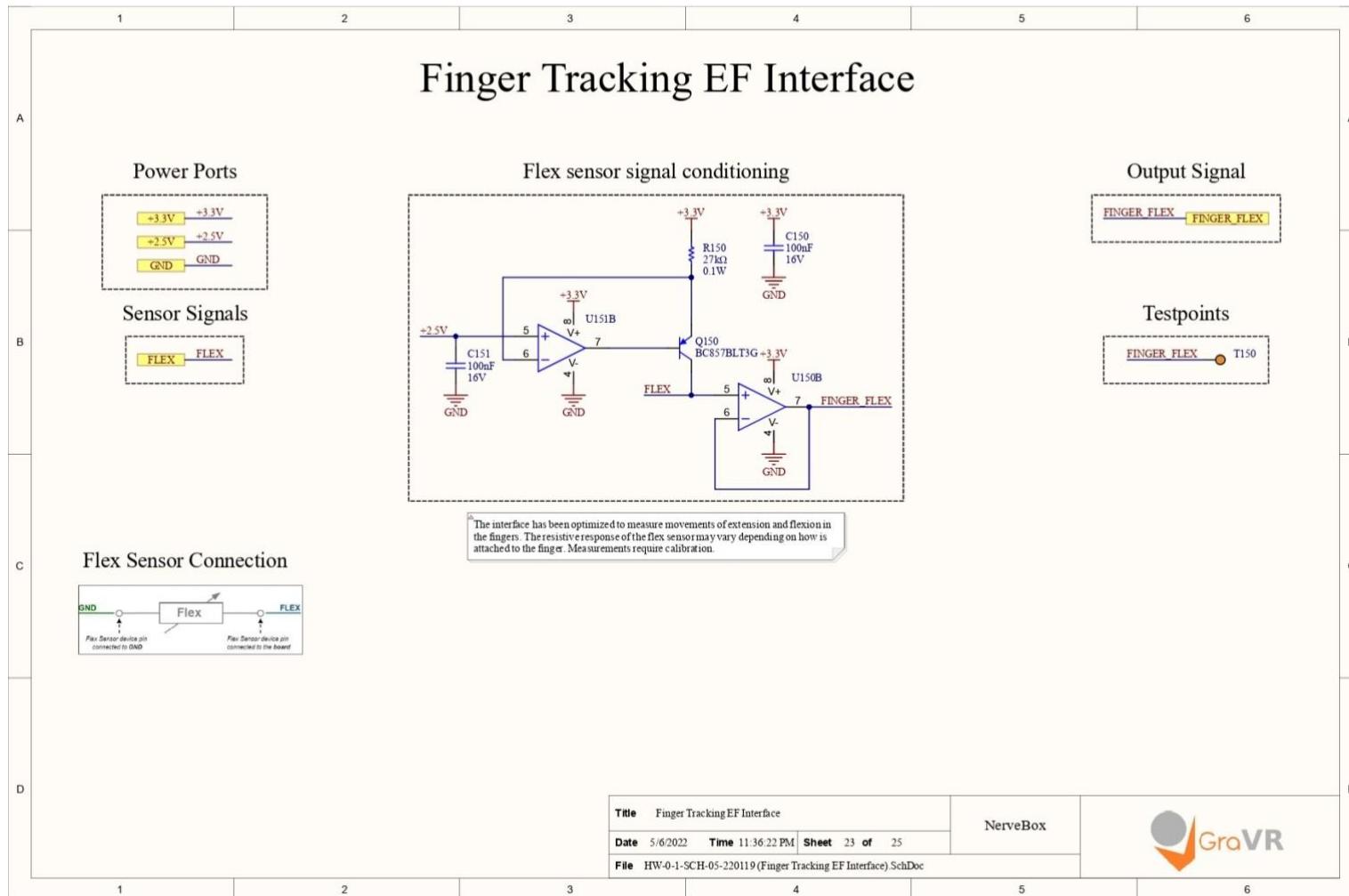


Ilustración 11.23: Esquemático de la interfaz de flexión y extensión de finger-tracking. (Sección 6.1.5.3)

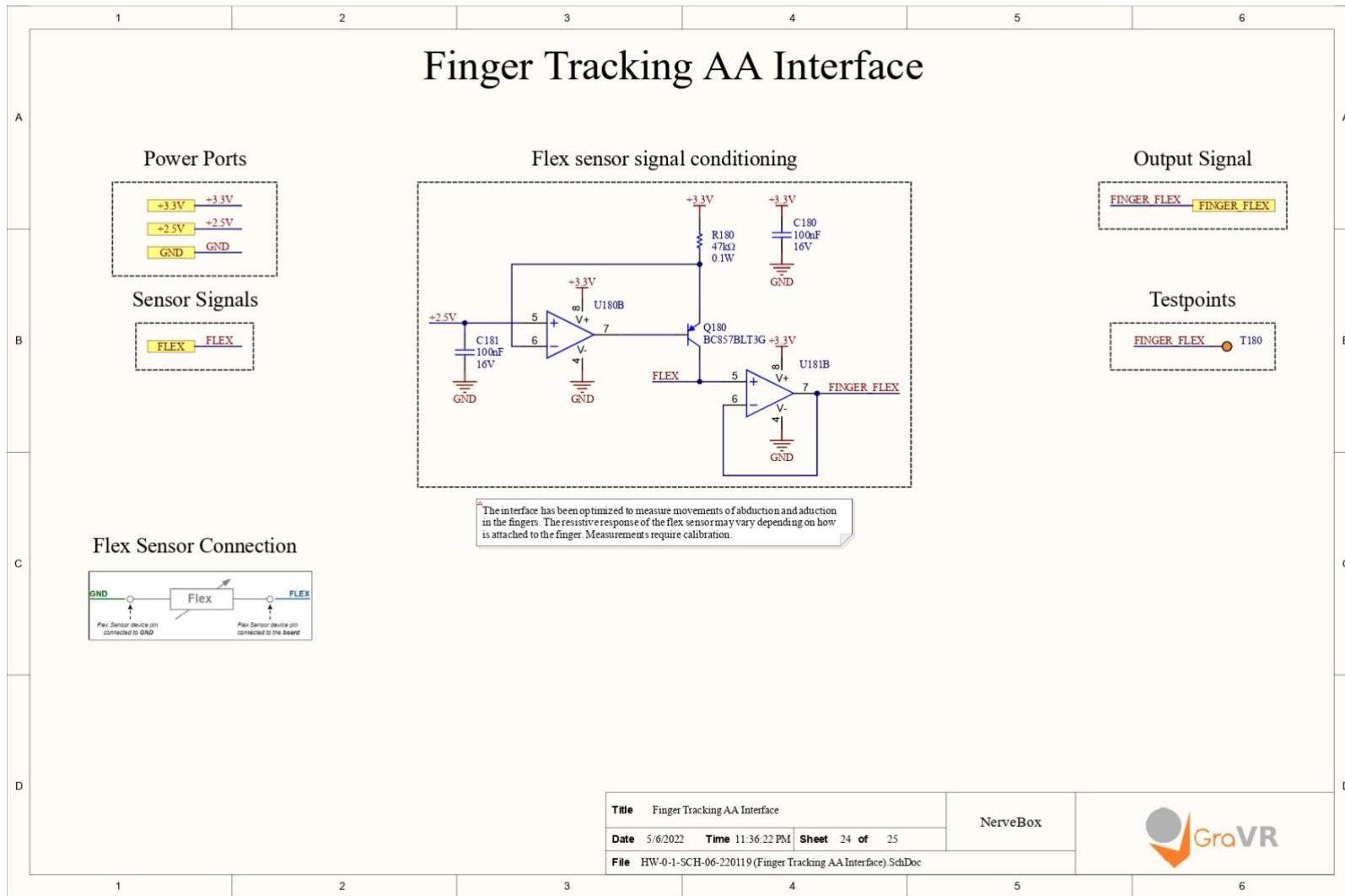


Ilustración 11.24: Esquemático de la interfaz de abducción y aducción de finger-tracking. (Sección 6.1.5.3)

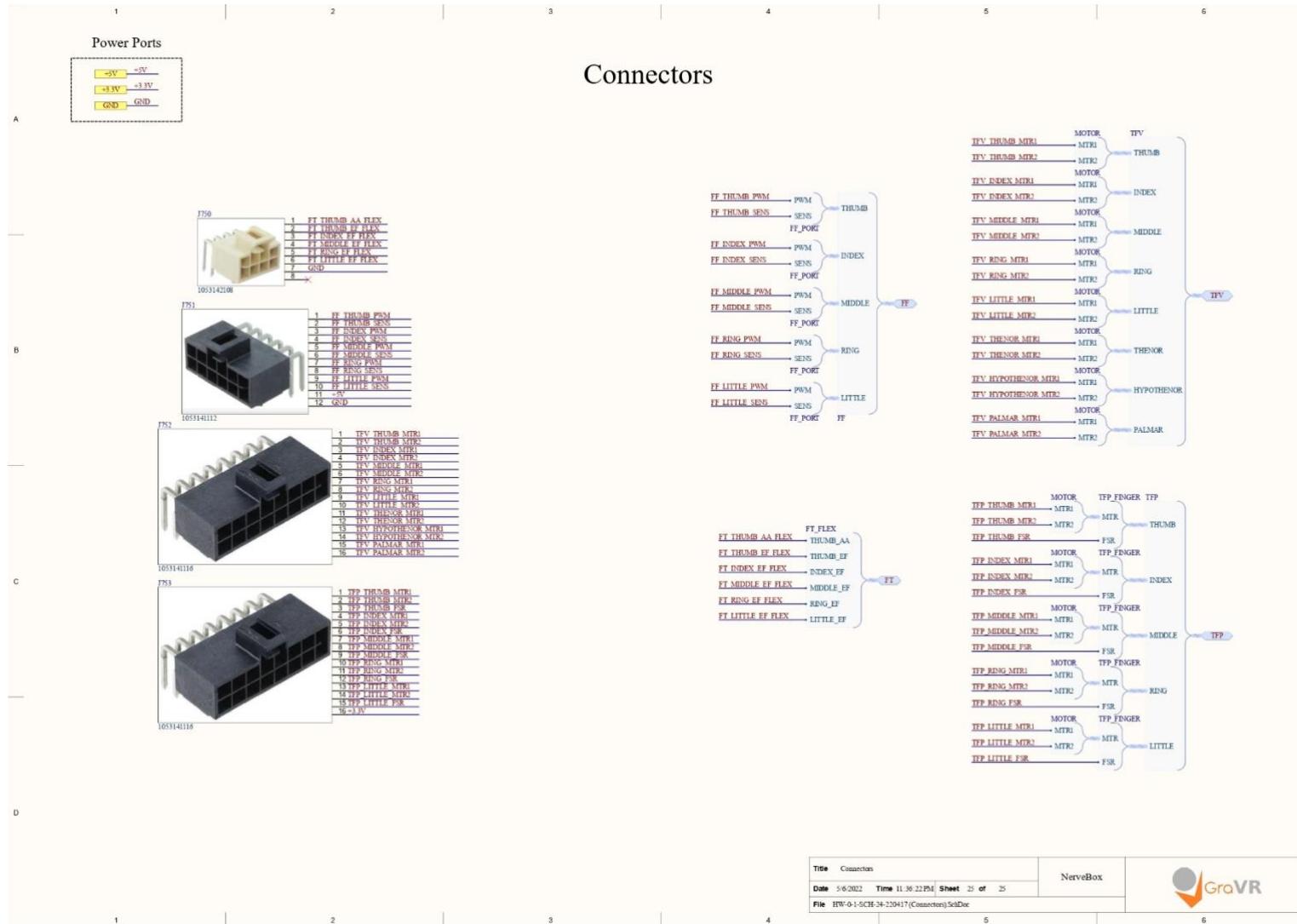


Ilustración 11.25: Esquemático de conectores.

- 11.2. Planos de PCB
- 11.3. Listado de Partes y Componentes (BOM)
- 11.4. Códigos de Software
- 11.5. Hojas de Datos de Componentes
- 11.6. Hojas de Aplicación, etc.
- 11.7. Justificaciones Casa de Calidad

11.7.1. Pesos relativos del cliente

La importancia dada por el cliente a cada requerimiento está basada en el estudio realizado de la competencia e interpretado con ayuda del relevamiento de datos:

1. **Alta inmersividad:** 5. Este es el principal requerimiento del guante, lograr una experiencia inmersiva.
2. **Bajo costo:** 4. En vistas de que los precios del mercado son muy altos y la encuesta dice que el público está interesado en un producto de costo accesible, se apunta a hacer un producto de bajo costo que sería una gran mejora respecto a lo que hay en el mercado.
3. **Alta comodidad:** 3. La comodidad del guante permite que se lo use durante mucho tiempo y afecta directamente a la calidad de la experiencia de realidad virtual, si no se tiene un guante cómodo es muy posible que haya distracciones.
4. **Alta seguridad:** 2. Siempre se debe considerar la seguridad eléctrica y mecánica para cuidar al usuario, pero si no se tiene un guante que el público quiera adquirir, esto es, de bajo costo y que provea una buena experiencia, la seguridad no importa. Es por eso que ocupa este lugar.
5. **Altas confiabilidad y robustez:** 2. De igual forma que para la seguridad, sin un guante utilizable, a nadie le importa que sea duradero.
6. **Gran facilidad de uso:** 1. Si bien siempre es importante que el uso sea intuitivo, no supera en importancia a los requerimientos anteriores y además el usuario de realidad virtual ya está familiarizado con la tecnología.
7. **Alta autonomía:** 1. Muchas aplicaciones de la realidad virtual no involucran mucho tiempo de uso, además de que ante el escenario de que se precise usarlo mucho tiempo, se puede utilizar cableado.

11.7.2. Relación entre requerimientos y especificaciones

Se lista la relación entre los requerimientos y las especificaciones correspondientes. El tipo de relación puede ser:

- *Fuerte*: Si la especificación tiene una incidencia directa sobre el requerimiento y se va a buscar mejorar esta especificación para cumplir con dicho requerimiento.
- *Media*: Si la especificación tiene cierta influencia y esta influencia en el requerimiento sea un factor al tomar una decisión con respecto a dicha especificación.
- *Baja*: Si la especificación tiene una incidencia indirecta en el requerimiento, por lo que no pesará a la hora de tomar una decisión de diseño. El resultado final de la especificación simplemente traerá como consecuencia la influencia en el requerimiento.

1. Consumo eléctrico:

- Tiene una relación *fuerte* con la **autonomía**. A menor consumo mayor autonomía.
- Tiene una relación *media* con el **costo**. Dada una tecnología, componentes de menor consumo suelen ser más caros.
- Tiene una relación *débil* con la **seguridad**. Mayor consumo implica mayor riesgo de excesos de corriente, temperatura, por lo tanto, necesidad de más protecciones para garantizar seguridad.

2. Peso y tamaño:

- Tiene una relación *fuerte* con la **comodidad**. A menor peso y tamaño más comodidad.
- Tiene una relación *media* con la **inmersividad**. A menor peso y tamaño más inmersividad, se siente menos el hecho de tener puesto un guante.
- Tiene una relación *media* con el **costo**. Materiales más livianos y componentes más pequeños suelen ser más caros.

3. Control sobre el movimiento de los dedos:

- Tiene una relación *fuerte* con la **inmersividad**. Cuanto mejor control se tiene, se puede lograr una experiencia más inmersiva.
- Tiene una relación *media* con el **costo**. Cuanta mayor fuerza se quiera ejercer, más caros serán los componentes.
- Tiene una relación *media* con la **comodidad**. El hecho de controlar el movimiento de la mano implica, justamente, una posible restricción al libre movimiento de los dedos incluso al no ejercer fuerza, lo cual puede resultar incómodo.
- Tiene una relación *media* con la **seguridad**. La posibilidad de ejercer una fuerza activa sobre los dedos implica un riesgo de daños a la mano si se ejerce una fuerza excesiva.

4. Sensación de tacto:

- Tiene una relación *fuerte* con la **inmersividad**. Cuanto mejor sea la sensación de tacto, mayor inmersividad se tendrá.
- Tiene una relación *fuerte* con el **costo**. Cuanta más resolución de tacto se quiera tener, más caro será el equipo, y a priori creemos que será una mayor influencia que para las demás especificaciones.
- Tiene una relación *baja* con la **comodidad**. La presencia de la tecnología utilizada para el tacto puede llegar a percibirse incluso al no actuar sobre las yemas y palma, lo cual puede resultar incómodo.

5. Detección de la posición de los dedos y la mano:

- Tiene una relación *fuerte* con la **inmersividad**. Cuanta mejor detección de la posición, más se va a corresponder lo que se siente en la mano con lo que se ve y más real se sentirá el agarre.
- Tiene una relación *media* con el **costo**. Cuanto mejor se busque que sea la detección, más caras serán las tecnologías.
- Tiene una relación *media* con la **comodidad**. La detección puede implicar el uso de componentes externos al guante que resulten en menos comodidad.

6. Latencia:

- Tiene relación *media* con la **inmersividad**. Una menor latencia permitirá percibir todo con más grado derealismo, pero no en la misma medida que, por ejemplo, una mejor sensación de tacto.
- Tiene una relación *baja* con el **costo**. Tecnologías que permiten una comunicación más veloz suelen ser más caras, pero la comunicación no es lo único que influye en la latencia y el peso de los módulos de comunicación probablemente sea bajo dentro del costo total.

7. Aislación eléctrica y protecciones:

- Tiene una relación *fuerte* con la **seguridad**. Una buena aislación permitirá que sea seguro ponerse el guante.
- Tiene una relación *fuerte* con la **confiabilidad y robustez**. Protecciones contra sobretensiones e inversiones de polaridad le dan un alto grado de robustez eléctrica al dispositivo.

8. Interfaz gráfica intuitiva de configuración:

- Tiene una relación *fuerte* con la **facilidad de uso**. Una interfaz más intuitiva permite una configuración más simple.

9. Ensamblaje robusto mecánicamente:

- Tiene una relación *fuerte* con la **confiabilidad y robustez**. Un ensamblaje robusto mecánicamente permite que al ponerse y sacarse el guante no se corra riesgo de romperlo.
- Tiene una relación *media* con la **facilidad de uso**. Si el usuario se debe preocupar por no romper el guante al usarlo, dificulta su uso.
- Tiene una relación *media* con la **comodidad**. Si el usuario puede usar el guante con tranquilidad le resultará más cómodo.
- Tiene una relación *baja* con el **costo**. Materiales más de más calidad y durables suelen ser más caros.

11.7.3. Relación entre especificaciones

Se lista a continuación la correlación entre las distintas especificaciones de diseño.

1. Consumo eléctrico:

- Tiene una correlación *fuerte negativa* con el **control sobre el movimiento de los dedos**. El consumo depende de la tecnología utilizada, pero como regla general (ley de conservación de la energía...) mayor fuerza implica mayor consumo.

- Tiene una correlación *baja negativa* con la **sensación de tacto y la detección de la posición de manos y dedos**. Estas técnicas implican un mayor consumo eléctrico, pero probablemente mucho menor al del control sobre el movimiento de los dedos.
 - Tiene una correlación *baja negativa* con la **latencia**. Una comunicación más rápida consume más energía.
2. **Peso y tamaño:**
- Tiene una correlación *baja negativa* con el **control sobre el movimiento de los dedos**. Tecnologías con mayor control sobre el movimiento de los dedos tienden a ser más aparatosas y pesadas.
 - Tiene una correlación *baja negativa* con el **ensamblaje robusto mecánicamente**. El agregado de alguna carcaza o algo por el estilo puede hacer que el guante sea más pesado.
3. **Latencia:**
- Tiene una correlación *alta negativa* con la **detección de los dedos y la mano**. La detección probablemente involucra el envío de imágenes a la plataforma de VR para que realice el procesamiento. Una mejor detección con más frecuencia de muestreo implicará una mayor latencia.
 - Tiene una correlación *alta negativa* con la **sensación de tacto y el control del movimiento de los dedos**. Ambos efectos tendrán un cierto tiempo de respuesta hasta poder aplicar el estímulo.

11.8. Justificación de Requerimientos

11.8.1. REQ-06

El requerimiento impone una restricción sobre el precio máximo que deberá costarle al usuario acceder al producto. El costo máximo de producto asociado a su fabricación y comercialización será restringido por las especificaciones de diseño derivadas del requerimiento, y se obtiene a partir de los análisis de factibilidad tecnológica y económica. En primer lugar, el precio máximo deriva (indirectamente) de un estudio de mercado que se realiza a través de una encuesta, donde si bien menos del 2% del público afirma que compraría el guante por más de U\$S 500, se consideró que el público encuestado no dimensionó adecuadamente el valor del guante, por desconocimiento del producto. En segundo lugar, la mayor parte de los productos competidores existentes en otros mercados que cuentan con características similares, en términos de la capacidad de seguimiento de dedos, manos, sensación de fuerza y tacto, tiene un valor muy superior a los U\$S 1000. Dado que uno de los objetivos es alcanzar un costo accesible para el usuario en el mercado argentino, se limitó (teniendo en cuenta la extensión de sus características) a U\$S 800.

11.8.2. REQ-17

Se selecciona esta edad de 14 años no de forma arbitraria, sino en base a la edad recomendada de utilización del Meta Quest 2. Este es el equipo compatible con nuestro producto y, en particular, el líder del mercado de VR.

11.9. Justificación de Especificaciones

11.9.1. PER-01

Los cascos de realidad virtual poseen una autonomía que oscila entre 2 y 3 horas, en los casos generales. En aplicaciones de contenido multimedia, la autonomía puede llegar a las 3 horas. Por otro lado, en juegos, simuladores y otras experiencias con mayor interactividad, la autonomía puede reducirse hasta 2 horas, o incluso puede ser. Se decide que el producto a diseñar deberá tener una autonomía de, al menos, una hora y media. En primer lugar, porque los cascos de realidad virtual tienen una autonomía igual o inferior a dos si la aplicación es exigente. Y el tipo de aplicación al cual está orientado el producto cae en esta categoría. En segundo lugar, no es recomendable por razones de salud que una persona emplee un sistema de realidad virtual por períodos extensos. Incluso si lo hace, es recomendable tomar pausas breves, en cuyo caso el dispositivo podría permanecer en reposo (con un menor consumo) y recargándose la batería.

11.9.2. PER-02

En los sistemas de realidad virtual, la latencia o tiempo de retraso que percibe el usuario en la interacción con el mundo es uno de los aspectos más críticos, dado que tiene un impacto negativo sobre el bienestar del individuo. Entre estos efectos, se encuentran mareos, náuseas y otros malestares. Este aspecto se encuentra profundamente estudiado actualmente, y recientes publicaciones científicas recomiendan una latencia por debajo de 50 ms.

11.9.3. PER-03

La International Data Corporation (IDC) realizó un estudio con participantes de los Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Francia y Alemania, para determinar el tiempo de uso de los cascos de realidad virtual. La conclusión del estudio fue que, en promedio, una persona utiliza su casco de realidad virtual aproximadamente 6,2 horas por mes. Siendo que la vida útil del producto son 24 meses y que el tiempo máximo de uso de su batería es 1,5 horas, entonces,

$$\frac{6,2 \frac{\text{hora}}{\text{mes}} \cdot 24 \text{ mes}}{1,5 \frac{\text{hora}}{\text{ciclo}}} = 99,2 \text{ ciclo}$$

Utilizando un margen de seguridad del 25%, se impone como restricción que la batería soporte al menos 125 ciclos de carga para tolerar el uso promedio según la información del mercado obtenida por el estudio del IDC.

11.9.4. IMP-DIM-01

Se considera como referencia que los guantes de boxeo pueden pesar entre 110 gramos y 170 gramos, y que las raquetas de tenis pueden pesar entre 250 gramos y 300 gramos. Por otro lado, los guantes de realidad virtual desarrollados por *haptx* pesan 540 gramos cada uno. Se busca un producto con mejor comodidad durante el uso que los provistos por *haptx* en lo posible. Por otro lado, si bien sirve como referencia el peso de una raqueta de tenis, el esfuerzo físico que realiza la mano al sujetarla no es directamente extrapolable al esfuerzo físico de tener un guante puesto. Por todo esto, es que se decide que el peso máximo del producto a diseñar es 500 gramos.

11.9.5. IMP-AMB-01, IMP-AMB-02, IMP-AYT-01 e IMP-AYT-02

Dado que el producto deberá ser compatible con el casco de realidad virtual Meta Quest 2, es razonable restringir las condiciones de temperatura y humedad a las mismas especificadas por la empresa Meta. Por ende, los valores presentados en estas especificaciones fueron adaptados a partir de los manuales de tal casco.

11.9.6. INT-PRV-01

Los guantes de realidad virtual deberán ser compatibles con el casco de realidad virtual Meta Quest 2. Este casco permite la conexión de periféricos al sistema utilizando Bluetooth 5.0, por lo cual, para garantizar compatibilidad será necesario que el producto se comunique de acuerdo a ese estándar.

11.9.7. INT-SDK-00

Dado que el guante de realidad virtual se integrará con las aplicaciones en el entorno de desarrollo Unity, la interfaz de programación deberá estar escrita en un lenguaje de programación empleado por esta plataforma. Esta plataforma (Unity), permite desarrollar aplicaciones utilizando el lenguaje C#, que es de alto nivel.

11.9.8. INT-IMM-01

La máxima fuerza que puede ejercer el guante sobre el movimiento de los dedos es determinante para el costo y la inmersividad. A partir de un análisis de mercado, se relevó que los productos competidores utilizan fuerzas máximas entre 20N y 50N. Por otro lado, en una reciente publicación científica donde se expone una nueva tecnología, se utilizó 20N y los resultados sobre la percepción de las personas fueron positivos. Por ende, se decidió utilizar 10N, porque hay evidencia a favor del efecto de inmersividad que puede provocar y porque buscar alcanzar fuerzas mayores podría desequilibrar la relación costo e inmersividad.

11.9.9. INT-IMM-02 e INT-IMM-03

Dado que este guante no está diseñado con el fin de realizar actividades que requieran de una precisión excesiva, como pueden ser aplicaciones en medicina, se decide fijar la precisión de la detección de la posición relativa de los dedos en 2mm. Esto se debe a dos factores principales. El primero, es que existe evidencia científica de que con ese nivel de precisión es posible reproducir la mano en un entorno virtual sin que el usuario note diferencias significativas que tengan un efecto negativo en la inmersión. El segundo, es que tener un margen de precisión holgado permite reducir los costos de fabricación, no solo por el costo de un sensor más preciso, sino por el costo que implica integrarlo con el sistema de control a utilizar. Esto a su vez permite mantener el precio de venta por debajo de lo establecido.

11.9.10. INT-IMM-06

Una de las características técnicas con las cuales se describe la capacidad del sistema para seguir el movimiento de los dedos, es el tipo de movimientos que puede realizarse. A esto se lo conoce como los grados de libertad. Está asociado a que la anatomía de la mano, como se puede ver en la Ilustración 11.28, posee junturas entre las falanges y los huesos metacarpianos que dan origen a dos tipos de movimientos, como se muestra en la Ilustración 11.27 y la Ilustración 11.26. En la literatura científica se explica que, teniendo en cuenta cuál de estos dos movimientos puede hacerse en cada juntura, la cantidad de grados de libertad que se posee es 25. Esto se puede observar en la Ilustración 11.29.

Para una funcionalidad mínima esperada del guante, donde pueda sujetarse un objeto, y teniendo en cuenta que una gran proporción de la población no puede mover independientemente las falanges distal y medial. La cantidad mínima de grados de libertad en el movimiento a detectar es 12.

11.9.11. INT-IMM-07

En primer lugar, las fuerzas que realizará el guante sobre los dedos serán de resistencia al movimiento. Esto quiere decir que serán fuerzas pasivas, y en consecuencia el riesgo de causar daño a la persona se ve reducido, ya que el sistema no cuenta con la capacidad de aplicar una fuerza para desplazar o forzar un movimiento. En segundo lugar, esa fuerza es aplicada para resistirse al movimiento de flexión de cada dedo, dando como resultado 5 grados de libertad en este sistema de fuerza. Se decide sólo controlar el movimiento de flexión, porque es el requerimiento mínimo para alcanzar una funcionalidad deseable en términos de inmersividad, teniendo en cuenta que más grados implicaría un costo elevado y busca alcanzarse un adecuado balance entre costo e inmersividad.

11.9.12. IMP-DIM-02

Se define ese rango de medidas a cubrir dado a que esos son los límites de la tabla de medidas estándar para guantes de uso convencional para hombres y mujeres y en particular para adultos y adolescentes.

11.9.13. RAM-CON-01

Se define el MTBF en base a el uso esperado que se considera que tendrá el guante. Dadas las condiciones de funcionamiento, en las que el dispositivo se encuentra sometido a constantes fuerzas de flexión en los dedos y en la palma, es posible que los materiales utilizados en el mismo se vean deteriorados visual y/o estructuralmente pasados los 9 meses de uso. Estas fallas no solo influyen en el estado mecánico del producto, sino que también podría disminuir la inmersión, dado que, con la disminución en las tolerancias constructivas, las mediciones de los sensores del dispositivo ya no tendrían la precisión requerida para lograr que los movimientos en el entorno real sean traducidos con la fidelidad necesaria.

11.9.14. RAM-CON-02

El tiempo promedio que tarda la empresa Meta, actualmente la más importante en el área de realidad virtual para particulares, en lanzar un nuevo dispositivo al mercado es de aproximadamente 1 año y medio. En base a esto es que se define el ciclo de vida del producto en 2 años, con el fin de poder mantener en servicio a los usuarios que aún no hayan actualizado su equipo.

11.9.15. RAM-DIS-01

Una disponibilidad del 99.9% implica que de cada 1000 veces que se utilice el guante, 999 de estas son satisfactorias y únicamente 1 presenta fallas. Considerando que un usuario promedio puede utilizar un dispositivo para consumir contenido en VR 3 veces al día, en promedio, se podría utilizar el dispositivo por al menos 11 meses sin que se presente una falla en su funcionamiento.

11.10. Anatomía y movimientos posibles de la mano

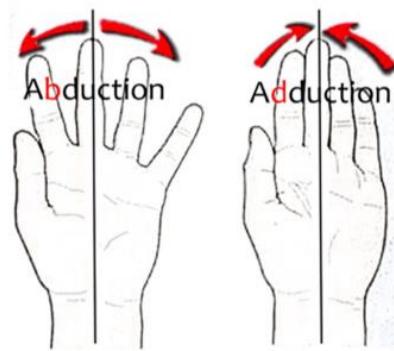


Ilustración 11.26: Movimiento de abducción y aducción

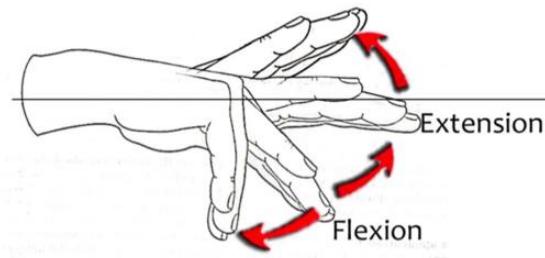


Ilustración 11.27: Movimiento de extensión y flexión



Ilustración 11.28: Anatomía de la mano

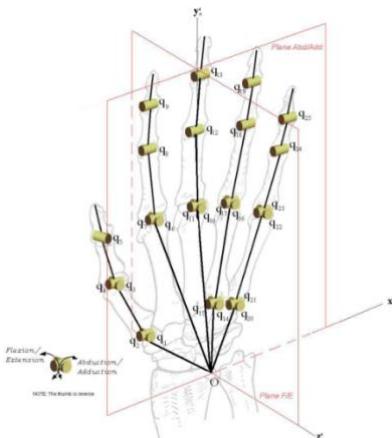


Ilustración 11.29: Grados de libertad de la mano

11.11. Tablas de Factibilidad Tecnológica

11.11.1. Módulo IMM-TF

<i>Valores</i>	<i>Descripción</i>
SÍ	El componente está disponible comercialmente.
NO	No se puede acceder al componente, no está disponible o tiene que ser fabricado a medida.

Tabla 11.1: Significados de la escala de accesibilidad de componentes para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

<i>Valores</i>	<i>Descripción</i>
NULO	No se tiene ningún conocimiento en el tema.
MEDIO	Se posee conocimiento en algunos de los componentes de hardware o software que se emplean. Puede que haya experiencia parcial trabajando con los elementos que se utilizan, pero indirectamente.
ALTO	Se tienen extensos conocimientos sobre los componentes de hardware o software, y existen experiencias previas del equipo de trabajo manejando los subsistemas de la tecnología.

Tabla 11.2: Significados de la escala de conocimiento y experiencia para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

<i>Valores</i>	<i>Descripción</i>
PODRÍA AFECTAR	El usuario puede sentir la presencia del módulo, y podrían presentarse molestias luego de cierto tiempo.
SE SIENTE	El usuario puede sentir la presencia del módulo, pero no produce molestias.
NO SE SIENTE	No se percibe o es muy poco perceptible el módulo colocado sobre la mano del usuario.

Tabla 11.3: Significados de la escala de comodidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

<i>Valores</i>	<i>Descripción</i>
ALTA	Complejidad alta, puede llegar a ser extremadamente difícil llevar adelante el diseño o construcción del módulo, ya sea a nivel mecánico, eléctrico o algorítmico.
MEDIA	Complejidad media, está al alcance, pero no es sencillo. Puede presentar complejidades a la hora de llevar a cabo la parte mecánica, eléctrica o algorítmica.
BAJA	Complejidad baja, se considera relativamente sencillo de ejecutar, no existe mayor complejidad a nivel mecánico ni algorítmico.

Tabla 11.4: Significados de la escala de complejidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

<i>Valores</i>	<i>Descripción</i>
VIBRACIÓN	Puede generar una vibración controlable en una región de la piel.
PRESIÓN NORMAL	Puede generar una presión en una única orientación sobre la superficie de la piel.
PRESIÓN NORMAL ORIENTABLE	Puede orientar la normal con que se aplica la presión sobre la piel en cualquier dirección.
PRESIÓN NORMAL LOCALIZABLE	Permite renderizar la presión normal de contacto aplicada en puntos de la piel localizables, es decir, presenta resolución en la presión sobre la piel.
CURVATURA	Puede generar sensación de curvatura en la superficie de contacto.
RIGIDEZ	Puede renderizar la dureza, rigidez o suavidad de una superficie, brindando información sobre su textura.
FRICCIÓN	Puede generar la sensación de fricción, por desplazamiento de la piel en sentido lateral, es decir, direcciones tangenciales o paralelas a la superficie de la piel.

Tabla 11.5: Significados de la escala de estímulos para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

	<i>Plataformas móviles</i>	<i>Arreglo de pines</i>	<i>Sistemas neumáticos</i>	<i>Plataforma con cinturón</i>
Costo	U\$S 10	-	-	U\$S 12
Accesibilidad de los componentes	SÍ	NO	NO	SÍ
Conocimiento y experiencia	MEDIO	NULO	NULO	MEDIO
Peso	25-50 g	30 g	20 g	35 g

Comodidad	PODRÍA AFFECTAR	SE SIENTE	SE SIENTE	SE SIENTE
Complejidad	ALTA	ALTA	ALTA	MEDIA
Estímulo	PRESIÓN NORMAL ORIENTABLE, CURVATURA	PRESIÓN NORMAL LOCALIZABLE, CURVATURA, VIBRACIÓN	PRESIÓN NORMAL LOCALIZABLE, CURVATURA, RIGIDEZ, VIBRACIÓN	PRESIÓN NORMAL, FRICCIÓN

Tabla 11.6: Comparación cualitativa de los mecanismos para presión de contacto en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a U\$S 15	3
Entre U\$S 15 y U\$S 30	2
Mayor a U\$S 30	1

Tabla 11.7: Escala cuantitativa de costo para la comparación de mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Accesible	1
No accesible	0

Tabla 11.8: Escala cuantitativa de accesibilidad de los componentes para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Nula	0
Medio	1
Alto	2

Tabla 11.9: Escala cuantitativa del conocimiento y la experiencia para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 20 g	3
Entre 20 g y 50 g	2
Mayor a 50 g	1

Tabla 11.10: Escala cuantitativa de peso del módulo para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 20 g	3
Entre 20 g y 50 g	2
Mayor a 50 g	1

Podría afectar	0
Se siente	1
No se siente	2

Tabla 11.11: Escala cuantitativa de comodidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Baja	2
Media	1
Alta	0

Tabla 11.12: Escala cuantitativa de la complejidad para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Par cada estímulo que permite reproducir se suma el peso	1

Tabla 11.13: Escala cuantitativa de los tipos de estímulos para la comparación de los mecanismos de presión en el módulo IMM-TF

Valores	Descripción
AMPLITUD Y FRECUENCIA DEPENDIENTES	No se puede controlar de forma independiente la amplitud y la frecuencia del desplazamiento en la vibración.
AMPLITUD Y FRECUENCIA INDEPENDIENTES	Se pueden controlar independientemente.
FRECUENCIA FIJA	La frecuencia de vibración del dispositivo es fija por su construcción.

Tabla 11.14: Significados de la controlabilidad de la vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

	Motor de rotación excéntrica	Actuador de resonancia lineal	Vibrador piezoelectrónico	Actuador piezoelectrónico
Costo (por módulo)	U\$S 1,2	U\$S 2,75	> U\$S 20	≈ U\$S 16
Accesibilidad de componentes	Sí	Sí	Sí	Sí
Peso (por módulo)	≈ 0,9 g	≈ 1,5 g	≈ 3 g	-
Comodidad	NO SE SIENTE	NO SE SIENTE	NO SE SIENTE	NO SE SIENTE

Tiempo de respuesta (arranque/parada)	Entre 20 ms y 50 ms.	Entre 5 ms y 10 ms de arranque. Entre 200 ms y 300 ms de parada.	< 10 ms	< 5 ms
Amplitud de vibración	≈ 0,8 G	Entre 1,2 G y 1,7 G	≈ 1,2 G	≈ 2,5 G
Consumo	≈ 80 mA	≈ 80 mA	≈ 2 mA	< 10 mA
Tensiones de operación	Entre 2 V y 4 V (Corriente Continua)	≈ 2 V (Corriente Alterna)	Entre 2 V y 4 V	Entre 0 y 60 V
Controlabilidad de la vibración	AMPLITUD Y FRECUENCIA DEPENDIENTES	FRECUENCIA FIJA	FRECUENCIA FIJA	AMPLITUD Y FRECUENCIA INDEPENDIENTES

Tabla 11.15: Comparación cualitativa de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a U\$S 5	3
Entre U\$S 5 y U\$S 10	2
Mayor a U\$S 10	1

Tabla 11.16: Escala cuantitativa de costo para la comparación de mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Accesible	1
No accesible	0

Tabla 11.17: Escala cuantitativa de accesibilidad de los componentes para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 2 g	3
Entre 2 g y 5 g	2
Mayor a 5 g	1

Tabla 11.18: Escala cuantitativa de peso del módulo para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Podría afectar	0
Se siente	1
No se siente	2

Tabla 11.19: Escala cuantitativa de comodidad para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 10 ms	2
Entre 10 ms y 100 ms	1
Mayor a 100 ms	0

Tabla 11.20: Escala cuantitativa de tiempo de respuesta para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 1 G	1
Entre 1 G y 2 G	2
Mayor a 2 G	3

Tabla 11.21: Escala cuantitativa de la amplitud de vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Menor a 5 mA	3
Entre 5 mA y 10 mA	2
Mayor a 10 mA	1

Tabla 11.22: Escala cuantitativa del consumo para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Baja tensión	1
Alta tensión	0

Tabla 11.23: Escala cuantitativa de la tensión de operación para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

Condición o descripción	Peso
Frecuencia fija	1
Amplitud y frecuencia dependientes	2
Amplitud y frecuencia independientes	3

Tabla 11.24: Escala cuantitativa de la controlabilidad de la vibración para la comparación de los mecanismos de vibración en el módulo IMM-TF

11.11.2. Módulo IMM-HT

Categoría	Peso
Precisión de detección	Importante para una experiencia inmersiva, sobre todo en las manos donde el espacio de movimiento es mucho mayor y las diferencias entre lo real y lo mostrado en el mundo virtual pueden acrecentarse.
Costo	Uno de los principales objetivos a lograr en este diseño: un bajo costo.
Consumo	No son tecnologías activas en general, por lo cual su consumo es despreciable en comparación a otros módulos.
Tiempo de desarrollo	Esencial para las metas propuestas y los recursos disponibles que el tiempo sea bajo.
Experiencia previa	Tendrá alto impacto en el tiempo de desarrollo y facilitará la obtención de resultados, así como provee certidumbre en cuanto a la factibilidad.
Disponibilidad	En pocos casos limita altamente a una tecnología, pero en caso de que tenga buena disponibilidad, acelera los lead times.
Velocidad de lectura	En un diseño cargado de sensores y actuadores trabajando en tiempo real, será beneficioso bajar la carga a la unidad de control. Más allá de esto, este módulo en particular no aportaría gran cantidad de sensores.
Factor de forma	Un diseño voluminoso o incómodo irá en detrimento de la experiencia de usuario.

Tabla 11.25: Justificación para valoración de categorías en matriz de decisión de IMM-HT

	IMUs	Flex sensors	Cámaras
Precisión de detección	Error de deriva en la integración. Puede volverse muy significativo dado el movimiento de las manos.	Interpolar la posición de la mano a través de detección de movimiento en articulaciones del brazo puede acumular mucho error	Probada eficiencia con muy buenos resultados de tracking. Tiene problemas de occlusion, pero son casos de uso poco frecuentes.
Costo	~ 1000 ARS por sensor	~ 2500 ARS por sensor	Muy alto si es off-the-shelf. A menos que se use el de Meta (0 costo extra).
Consumo	Lectura de un controlador de un sensor	Lectura de una tensión	Proces. de imágenes muy costoso
Tiempo de desarrollo	Corregir el error de deriva puede ser muy demandante	Corregir el error de la interpolación por las articulaciones puede ser muy demandante	Incorporar un módulo de terceros por software

Experiencia previa	Aceptable	Muy poca, casi nula	Idealmente el módulo a incorporar viene con docs de uso.
Disponibilidad	Inmediata y en Argentina	Inmediata y en Argentina	Depende de las prests. Si es Meta, inmediata
Velocidad de lectura	Lectura de un controlador de un sensor	Lectura de una tensión	Proces. de imágenes muy costoso (a menos que se use el de Meta, en cuyo caso se procesa en el <i>headset</i>).
Factor de forma	Bueno, no es grande en comparación al tamaño de la mano	Agregaría componentes a usar en articulaciones del brazo, malo	Nulo volumen agregado

Tabla 11.26: Justificación para valoración de cada tecnología en matriz de decisión de IMM-HT

11.11.3. Módulo IMM-FT

Categoría	Peso
Precisión de detección	Importante para una experiencia inmersiva.
Grados de libertad	Si bien es importante para una experiencia inmersiva, varios grados de libertad son acopiables y reducibles, no es del todo necesario acapararlos todos.
Costo	Uno de los principales objetivos a lograr en este diseño: un bajo costo.
Consumo	No son tecnologías activas en general, por lo cual su consumo es despreciable en comparación a otros módulos.
Tiempo de desarrollo	Esencial para las metas propuestas y los recursos disponibles que el tiempo sea bajo.
Experiencia previa	Tendrá alto impacto en el tiempo de desarrollo y facilitará la obtención de resultados, así como provee certidumbre en cuanto a la factibilidad.
Disponibilidad	En pocos casos limita altamente a una tecnología, pero en caso de que tenga buena disponibilidad, acelera los lead times.
Velocidad de lectura	En un diseño cargado de sensores y actuadores trabajando en tiempo real, será beneficioso bajar la carga a la unidad de control. Este módulo será uno con gran cantidad de sensores si se pretende cubrir los DoF requeridos.
Factor de forma	Un diseño voluminoso o incómodo irá en detrimento de la experiencia de usuario. El módulo IMM-FT trabaja con tamaños pequeños (dedos), por lo cual hay menos espacio para tecnologías voluminosas.

Tabla 11.27: Justificación para valoración de categorías en matriz de decisión de IMM-FT

	IMUs	Flex sensors	Stretch sensors	Sensores rotacionales	Camaras	Arreglo de stretch sensosrs con DL
Precisión de detección	Error de deriva en integración	Muy buena	Muy buena	Buena	Sufre problemas de oclusión	Excelente
Grados de libertad	Bueno, puede potencialmente funcionar para todos	Aceptable. Muy bueno para E/C pero no con A/A	Aceptable. Muy bueno para E/C pero no con A/A	Solo para un DoF por dedo de E/C	Excelente, todos	Excelente, todos
Costo	~ 1000 ARS por sensor	~ 2500 ARS por sensor	Por pedido. > 10 USD más envío	~ 150 ARS por sensor	Muy alto si es off-the-shelf. A menos que se use el de Meta (0 costo extra)	Fabricación y componentes de difícil acceso y costosos en consecuencia.
Consumo	Lectura de un controlador de un sensor	Lectura de una tensión	Lectura de una tensión	Lectura de una tensión, aunque vendría acoplado a un motor	Proces. de imágenes muy costoso	Proces. de arreglo de sensores muy costoso
Tiempo de desarrollo	Corregir error de deriva puede tomar mucho ajuste	Experiencias previas detalladas	Concepto sencillo	Experiencias previas detalladas	Incorporar un módulo de terceros por software	Concepto de alta complejidad e innovador
Experiencia previa	Aceptable	Experiencias previas detalladas	Aceptable	Experiencias previas detalladas	Idealmente el módulo a incorporar viene con docs de uso.	Paper detallado, aunque concepto innovador
Disponibilidad	Inmediata y en Argentina	Inmediata y en Argentina	Por pedido y del exterior	Inmediata y en Argentina	Depende de las prest. Si es Meta, inmediata	Muy difícil.
Velocidad de lectura	Lectura de un controlador de un sensor	Lectura de una tensión	Lectura de una tensión	Lectura de una tensión	Proces. de imágenes muy costoso (excepto Meta)	Proces. de arreglo de sensores muy costoso
Factor de forma	Grandes en comparación a los dedos	Relativamente chicos, aceptable	Muy delgados	Grande. Solo considerar si se usa en IMM-FF	Nulo volumen agregado	Guante muy delgado

Tabla 11.28: Justificación para valoración de cada tecnología en matriz de decisión de IMM-FT

11.11.4. Módulo UCC

Módulo	BM832A	BC833M	BC840	ESP32 WROOM
IC	nRF52810	nRF52833	nRF52840	ESP32-D0WD

CPU	ARM Cortex M4 (32 bits)	ARM Cortex M4 (32 bits)	ARM Cortex M4 (32 bits)	Xtensa LX6 dual core (32 bits)
Tamaño (mm)	10.2x15x1.9	10x14.3x1.9	7.1x9.2x1.5	18.0 × 25.5 × 3.1
\$/1k	3	4.49	6.3	4.08
Consumo idle	2uA	2uA	2uA	10uA
Alimentación	1.7~3.6	1.7~5.5	1.7~5.5	3~3.6
Flash/Ram	128k/24k	512k/128k	1M/256k	4MB/520k
Frecuencia máxima (clock)	64MHz	64MHz	64MHz	240MHz
I2C	2 masters/slaves	2 masters/slaves	2 masters/slaves	2 masters/slaves
SPI	3 masters/slaves	2 masters/slaves	4 masters/slaves	5 masters/slaves
UART	1	1	2	3
PWM	4	4	4	16
ADC	8	8	8	18
GPIO	32	18	48	34
SDK	Muy completo	Muy completo	Muy completo	Completo
Documentación	Buena	Buena	Buena	Muy Buena
Material disponible	Regular	Regular	Regular	Mucho material preexistente y comunidad de desarrollo muy activa
Consumo en funcionamiento	tx<7.5ma, rx<5.4ma	tx<4.9ma, rx<4.7ma	tx<13.6ma, rx<6.4ma	tx>165ma, rx>118ma
Disponibilidad	Alta	Baja	Media	Media
Kit de desarrollo	Si- U\$D60	no	Si- U\$D60	Si- U\$D15
Encapsulado	LGA	LGA	LGA	QFN
Certificaciones RF	FCC,IC,CE,JP,AU,KR, QDID	FCC,IC,CE,JP,AU,KR, QDID	FCC,IC,CE,JP,AU,KR, QDID	FCC/CE-RED/IC/TELEC/KCC/SRR C/NCC
Comentarios	XTAL DE SLEEP EXTERNO	XTAL DE SLEEP INCLUIDO	XTAL DE SLEEP EXTERNO	

11.12. Diseño de Hardware

11.12.1. Módulo de vibración

EFFECT ID NO.	WAVEFORM NAME	EFFECT ID NO>	WAVEFORM NAME	EFFECT ID NO.	WAVEFORM NAME
1	Strong Click - 100%	42	Long Double Sharp Click Medium 2 – 80%	83	Transition Ramp Up Long Smooth 2 – 0 to 100%
2	Strong Click - 60%	43	Long Double Sharp Click Medium 3 – 60%	84	Transition Ramp Up Medium Smooth 1 – 0 to 100%
3	Strong Click - 30%	44	Long Double Sharp Tick 1 – 100%	85	Transition Ramp Up Medium Smooth 2 – 0 to 100%
4	Sharp Click - 100%	45	Long Double Sharp Tick 2 – 80%	86	Transition Ramp Up Short Smooth 1 – 0 to 100%
5	Sharp Click - 60%	46	Long Double Sharp Tick 3 – 60%	87	Transition Ramp Up Short Smooth 2 – 0 to 100%
6	Sharp Click - 30%	47	Buzz 1 – 100%	88	Transition Ramp Up Long Sharp 1 – 0 to 100%
7	Soft Bump - 100%	48	Buzz 2 – 80%	89	Transition Ramp Up Long Sharp 2 – 0 to 100%
8	Soft Bump - 60%	49	Buzz 3 – 60%	90	Transition Ramp Up Medium Sharp 1 – 0 to 100%
9	Soft Bump - 30%	50	Buzz 4 – 40%	91	Transition Ramp Up Medium Sharp 2 – 0 to 100%
10	Double Click - 100%	51	Buzz 5 – 20%	92	Transition Ramp Up Short Sharp 1 – 0 to 100%
11	Double Click - 60%	52	Pulsing Strong 1 – 100%	93	Transition Ramp Up Short Sharp 2 – 0 to 100%
12	Triple Click - 100%	53	Pulsing Strong 2 – 60%	94	Transition Ramp Down Long Smooth 1 – 50 to 0%
13	Soft Fuzz - 60%	54	Pulsing Medium 1 – 100%	95	Transition Ramp Down Long Smooth 2 – 50 to 0%
14	Strong Buzz - 100%	55	Pulsing Medium 2 – 60%	96	Transition Ramp Down Medium Smooth 1 – 50 to 0%
15	750 ms Alert 100%	56	Pulsing Sharp 1 – 100%	97	Transition Ramp Down Medium Smooth 2 – 50 to 0%
16	1000 ms Alert 100%	57	Pulsing Sharp 2 – 60%	98	Transition Ramp Down Short Smooth 1 – 50 to 0%
17	Strong Click 1 - 100%	58	Transition Click 1 – 100%	99	Transition Ramp Down Short Smooth 2 – 50 to 0%
18	Strong Click 2 - 80%	59	Transition Click 2 – 80%	100	Transition Ramp Down Long Sharp 1 – 50 to 0%
19	Strong Click 3 - 60%	60	Transition Click 3 – 60%	101	Transition Ramp Down Long Sharp 2 – 50 to 0%
20	Strong Click 4 - 30%	61	Transition Click 4 – 40%	102	Transition Ramp Down Medium Sharp 1 – 50 to 0%
21	Medium Click 1 - 100%	62	Transition Click 5 – 20%	103	Transition Ramp Down Medium Sharp 2 – 50 to 0%
22	Medium Click 2 - 80%	63	Transition Click 6 – 10%	104	Transition Ramp Down Short Sharp 1 – 50 to 0%
23	Medium Click 3 - 60%	64	Transition Hum 1 – 100%	105	Transition Ramp Down Short Sharp 2 – 50 to 0%
24	Sharp Tick 1 - 100%	65	Transition Hum 2 – 80%	106	Transition Ramp Up Long Smooth 1 – 0 to 50%
25	Sharp Tick 2 - 80%	66	Transition Hum 3 – 60%	107	Transition Ramp Up Long Smooth 2 – 0 to 50%
26	Sharp Tick 3 - 60%	67	Transition Hum 4 – 40%	108	Transition Ramp Up Medium Smooth 1 – 0 to 50%
27	Short Double Click Strong 1 – 100%	68	Transition Hum 5 – 20%	109	Transition Ramp Up Medium Smooth 2 – 0 to 50%
28	Short Double Click Strong 2 – 80%	69	Transition Hum 6 – 10%	110	Transition Ramp Up Short Smooth 1 – 0 to 50%
29	Short Double Click Strong 3 – 60%	70	Transition Ramp Down Long Smooth 1 – 100 to 0%	111	Transition Ramp Up Short Smooth 2 – 0 to 50%
30	Short Double Click Strong 4 – 30%	71	Transition Ramp Down Long Smooth 2 – 100 to 0%	112	Transition Ramp Up Long Sharp 1 – 0 to 50%
31	Short Double Click Medium 1 – 100%	72	Transition Ramp Down Medium Smooth 1 – 100 to 0%	113	Transition Ramp Up Long Sharp 2 – 0 to 50%
32	Short Double Click Medium 2 – 80%	73	Transition Ramp Down Medium Smooth 2 – 100 to 0%	114	Transition Ramp Up Medium Sharp 1 – 0 to 50%
33	Short Double Click Medium 3 – 60%	74	Transition Ramp Down Short Smooth 1 – 100 to 0%	115	Transition Ramp Up Medium Sharp 2 – 0 to 50%

Ilustración 11.30: Efectos del DRV2605L. (Sección 6.1.3.3)

11.12.2. Señales del guante a la NerveBox

Referenciado en la Sección 6.1.1.5.

Interfaz NB-FT					
#	Nombre	Dirección	Tipo	Corriente	Descripción
1	FT_THUMB_AA	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
2	FT_THUMB_EF	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
3	FT_INDEX_EF	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
4	FT_MIDDLE_EF	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
5	FT_RING_EF	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
6	FT_LITTLE_EF	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
7	FT_GND	-	-	< 600 μA	-

Tabla 11.29: Especificación de la interfaz NB-FT.

Interfaz NB-FF					
#	Nombre	Dirección	Tipo	Corriente	Descripción
1	FF_THUMB_PWM	Salida	Digital	< 1 mA	Señal cuadrada de $f = 50Hz$ con ciclo de trabajo variable entre $[500\mu s, 2400\mu s]$
2	FF_THUMB_SENS	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
3	FF_INDEX_PWM	Salida	Digital	< 1 mA	Señal cuadrada de $f = 50Hz$ con ciclo de trabajo variable entre $[500\mu s, 2400\mu s]$
4	FF_INDEX_SENS	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
5	FF_MIDDLE_PWM	Salida	Digital	< 1 mA	Señal cuadrada de $f = 50Hz$ con ciclo de trabajo variable entre $[500\mu s, 2400\mu s]$
6	FF_MIDDLE_SENS	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
7	FF_RING_PWM	Salida	Digital	< 1 mA	Señal cuadrada de $f = 50Hz$ con ciclo de trabajo variable entre $[500\mu s, 2400\mu s]$
8	FF_RING_SENS	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
9	FF_LITTLE_PWM	Salida	Digital	< 1 mA	Señal cuadrada de $f = 50Hz$ con ciclo de trabajo variable entre $[500\mu s, 2400\mu s]$
10	FF_LITTLE_SENS	Entrada	Analógica	< 100 μA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 100 Hz$
11	FF_5V	-	-	-	
12	FF_GND	-	-	-	

Tabla 11.30: Especificación de la interfaz NB-FF

Interfaz NB-TFV					
#	Nombre	Dirección	Tipo	Corriente	Descripción
1	TFV_THUMB_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
2	TFV_THUMB_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
3	TFV_INDEX_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
4	TFV_INDEX_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
5	TFV_MIDDLE_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
6	TFV_MIDDLE_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
7	TFV_RING_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
8	TFV_RING_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
9	TFV_LITTLE_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
10	TFV_LITTLE_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
11	TFV_THENOR_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
12	TFV_THENOR_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
13	TFV_HYPOTHENOR_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
14	TFV_HYPOTHENOR_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
15	TFV_PALMAR_M+	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.
16	TFV_PALMAR_M-	Salida	Digital	< 100 mA	Señal cuadrada de $f = 20.5 \text{ kHz}$ de ciclo de trabajo variable para manejar un motor de corriente continua de rotación excéntrica.

Tabla 11.31: Especificación de la interfaz NB-TFV

Interfaz NB-TFP					
#	Nombre	Dirección	Tipo	Corriente	Descripción
1	TFP_THUMB_M+	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
2	TFP_THUMB_M-	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
3	TFP_THUMB_R-	Entrada	Analógica	< 100µA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 500Hz$
4	TFP_INDEX_M+	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
5	TFP_INDEX_M-	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
6	TFP_INDEX_R-	Entrada	Analógica	< 100µA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 500Hz$
7	TFP_MIDDLE_M+	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
8	TFP_MIDDLE_M-	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
9	TFP_MIDDLE_R-	Entrada	Analógica	< 100µA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 500Hz$
10	TFP_RING_M+	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
11	TFP_RING_M-	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
12	TFP_RING_R-	Entrada	Analógica	< 100µA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 500Hz$
13	TFP_LITTLE_M+	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
14	TFP_LITTLE_M-	Salida	Digital	< 700mA	Señal cuadrada de $f = 20kHz$ para manejar un motor de corriente continua.
15	TFP_LITTLE_R-	Entrada	Analógica	< 100µA	Posee un ancho de banda de $\Delta f = 500Hz$
16	TFP_3.3V	-	-	< 500µA	-

Tabla 11.32: Especificación de la interfaz NB-TFP