MARCO TEÓRICO Y FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA DEL PROYECTO

Título del Proyecto: Sistema Biomédico Portátil y Autónomo Basado en Procesamiento en el Borde (*Edge Computing*) para la Monitorización Fisiológica, Gestión del Estrés y Prevención de Riesgos en Entornos Aeroespaciales.

RESUMEN

El presente documento desarrolla los fundamentos biofísicos, fisiológicos, médicos y de ingeniería electrónica que sustentan el diseño de un prototipo portátil experimental orientado a la telemetría biomédica y la intervención autónoma en misiones espaciales tripuladas. Frente a las limitaciones de los dispositivos comerciales convencionales en condiciones de microgravedad y al retardo en las comunicaciones de espacio profundo, el sistema integra fotopletismografía de doble longitud de onda, termometría cutánea digital, procesamiento en tiempo real mediante microcontroladores de arquitectura embebida (ESP8266 / ESP32) y, de forma modular, dosimetría de radiación ionizante mediante tubo Geiger-Müller. A través de algoritmos no bloqueantes y fusión multisensor, el prototipo permite ejecutar diagnósticos diferenciales entre esfuerzo físico y estrés agudo, administrar terapias guiadas de biofeedback cardiorrespiratorio y supervisar protocolos de desnitrogenación previos a actividades extravehiculares (EVA).

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

La exploración espacial tripulada somete al organismo humano a un entorno extremo caracterizado por la ausencia de gravedad, el aislamiento prolongado, el confinamiento, alteraciones en los ciclos circadianos, variaciones de presión atmosférica y exposición continua a radiación ionizante. En misiones de órbita terrestre baja (LEO), como las realizadas en la Estación Espacial Internacional (ISS), la telemetría médica depende en gran medida de la transmisión continua de datos hacia centros de control en Tierra para su interpretación por cirujanos de vuelo. No obstante, en futuras misiones de exploración hacia la Luna o Marte, las distancias astronómicas introducen retardos de comunicación significativos y períodos de ocultamiento orbital que impiden la asistencia médica en tiempo real.

En consecuencia, resulta indispensable desarrollar sistemas biomédicos portátiles dotados de **autonomía operativa local (*Edge Computing*)**, capaces no solo de adquirir variables fisiológicas con precisión clínica, sino también de procesarlas, detectar patrones de riesgo y activar contramedidas terapéuticas inmediatas sin requerir conectividad externa. Asimismo, la democratización de microcontroladores de alto rendimiento y sensores ópticos miniaturizados permite construir prototipos experimentales de bajo costo que replican estas arquitecturas críticas con fines de investigación aplicada y validación tecnológica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fisiología Cardiovascular en Microgravedad y Diseño Biomecánico Modular

En condiciones de gravedad terrestre ($1g$), la presión hidrostática mantiene aproximadamente el \$70\%\$ del volumen sanguíneo por debajo del plano cardíaco. Al ingresar en un entorno de microgravedad, este gradiente hidrostático desaparece de forma inmediata, desencadenando un fenómeno denominado **desplazamiento cefálico de fluidos (*cephalad fluid shift*)**, mediante el cual cerca de $2litros$ de líquido intravascular e intersticial migran desde las extremidades inferiores hacia el tórax y la región cefálica (Buckey, 2006).

La distensión resultante de los barorreceptores cardiopulmonares activa mecanismos de regulación neurohormonal —específicamente la inhibición de la hormona antidiurética (ADH) y la supresión del sistema renina-angiotensina-aldosterona— que inducen una diuresis compensatoria y provocan una **reducción del volumen plasmático total de entre un \$10\%\$ y un \$15\%\$** durante los primeros días de vuelo espacial (NASA, 2009). Esta hipovolemia relativa, sumada a la disminución del tono vascular periférico y a la reducción del perímetro de las extremidades, degrada el acoplamiento mecánico y reduce la amplitud de pulso en la arteria radial a nivel de la muñeca, comprometiendo la fiabilidad de los monitores ópticos convencionales tipo reloj.

Para superar esta limitación hemodinámica, el sistema adopta una **arquitectura biomecánica dividida**:

- **Unidad Central de Procesamiento (Antebrazo):** Se emplaza sobre la región muscular del pronador redondo, proporcionando una superficie estable que evita puntos de flexión articular y aloja el microcontrolador, la interfaz visual OLED y el transductor acústico.
- **Módulo Sensor Distal (Falange Distal):** Se ubica en la yema del dedo índice o medio, región anatómica caracterizada por una elevada densidad de lechos capilares y anastomosis arteriovenosas, lo que garantiza una perfusión periférica suficiente para obtener una relación señal-ruido óptima en las mediciones ópticas y térmicas.

2.2. Principios Biofísicos de la Fotopletismografía (PPG) y Oximetría de Pulso (SpO_2)

La adquisición no invasiva de la actividad cardíaca y de la oxigenación arterial se fundamenta en la **fotopletismografía de reflectancia (PPG)** y en la **Ley de Beer-Lambert**, la cual establece que la intensidad de la luz transmitida o reflejada a través de un medio absorbente decrece exponencialmente en función de la concentración de las sustancias absorbentes y de la longitud del trayecto óptico (Webster, 1997).

El sensor óptico integrado (**MAX30102**) emite secuencialmente haces de luz mediante diodos emisores en dos longitudes de onda específicas: **espectro rojo ($\lambda_1 = 660nm$)** e **infrarrojo cercano ($\lambda_2 = 880nm$)** (Analog Devices / Maxim Integrated, 2018). La determinación de la saturación arterial de oxígeno (SpO_2) se basa en los coeficientes de extinción molar diferenciados de las dos especies principales de hemoglobina:

- La **desoxihemoglobina (**Hb**)** presenta una absorción significativamente mayor en la banda roja ($660nm$).
- La **oxihemoglobina (**HbO_2**)** absorbe mayor proporción de radiación en la banda infrarroja ($880nm$).

Durante cada sístole ventricular, la onda de presión arterial incrementa transitoriamente el volumen de sangre en los capilares digitales, generando una modulación en la luz reflejada hacia el fotodetector. El procesamiento digital de señales descompone cada canal óptico en dos componentes (Allen, 2007):

1. **Componente Alterna (**AC**):** Variación pulsátil asociada exclusivamente al flujo arterial oxigenado.
2. **Componente Continua (**DC**):** Atenuación basal constante producida por la epidermis, el tejido conectivo, el hueso y el lecho venoso.

Con el objetivo de normalizar la medición frente a variaciones individuales en la pigmentación cutánea o el espesor tisular, el algoritmo calcula el **cociente de cocientes (*Ratio of Ratios*,** R**)**:

$$R = \frac{AC_{Red}/DC_{Red}}{AC_{IR}/DC_{IR}}$$

A partir del parámetro adimensional R, el sistema estima el porcentaje de saturación mediante una aproximación lineal empírica ($SpO_2 = 110 - 25R$). En hábitats presurizados cerrados, una falla en el control ambiental o en el suministro de oxígeno puede inducir **hipoxia** de instauración insidiosa; por ello, el prototipo establece un umbral crítico de seguridad en **$SpO_2 < 93\%$**, activando una alarma multimodal inmediata antes de que se comprometa el rendimiento cognitivo del operador (NASA, 2022).

2.3. Neurofisiología del Estrés Agudo y Fusión Multisensor Diferencial

El aislamiento, el confinamiento y la elevada carga cognitiva de las operaciones aeroespaciales representan factores estresores críticos que pueden afectar el desempeño y la toma de decisiones de la tripulación (NASA, 2009). Desde el punto de vista de la telemetría biomédica, uno de los principales desafíos consiste en discriminar entre el **esfuerzo físico** y el **estrés psicológico agudo**, dado que ambos estados inducen taquicardia sinusal.

El prototipo resuelve esta ambigüedad mediante un modelo de **fusión multisensor** que evalúa simultáneamente tres biomarcadores regulados por el **Sistema Nervioso Autónomo (SNA)**:

1. **Frecuencia Cardíaca (**BPM**):** Determinada a partir de la detección de picos sistólicos y el cálculo del Intervalo Entre Latidos (IBI, expresado en milisegundos). Para suprimir artefactos mecánicos sin introducir retardos de fase significativos, se aplica un filtro digital de promedio móvil exponencial (EMA).
2. **Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (**HRV**):** Cuantifica las fluctuaciones fisiológicas en los intervalos de tiempo entre latidos consecutivos, reflejando el

equilibrio dinámico entre la rama simpática (activación) y la rama parasimpática o vagal (recuperación). El algoritmo implementa en el dominio del tiempo el índice **RMSSD** (*Root Mean Square of Successive Differences*):

3. $$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}(IBI_i - IBI_{i-1})^2}$$
4. De acuerdo con los estándares clínicos internacionales, valores reducidos de RMSSD ($< 25ms$) indican retracción del tono vagal y predominio simpático asociado a fatiga o estrés agudo (Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, 1996).
5. **Termometría Periférica Digital (T_{piel}):** Durante la actividad física, la termogénesis muscular induce **vasodilatación cutánea** para disipar calor, elevando la temperatura superficial de los dedos. Por el contrario, ante un episodio de ansiedad o estrés agudo, la descarga de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) provoca **vasoconstricción arteriolar periférica** mediada por receptores α-adrenérgicos con el fin de redistribuir el gasto cardíaco hacia la musculatura esquelética y los órganos vitales, generando un descenso medible de la temperatura digital ($< 33.0^\circ\text{C}$).

Mediante la evaluación lógica conjunta (BPM > 100 ∧ RMSSD < 25 ms ∧ Temp < 33.0 °C), el sistema logra diferenciar con especificidad fisiológica el estrés psicológico agudo de la actividad metabólica ordinaria.

2.4. Psicofisiología de la Intervención: Biofeedback y Respiración Coherente

Además de la detección pasiva, el sistema incorpora un módulo de intervención activa fundamentado en el **biofeedback de variabilidad cardíaca** y la **Arritmia Sinusal Respiratoria (RSA)**. La RSA constituye un mecanismo fisiológico cardiorrespiratorio mediante el cual la frecuencia cardíaca se incrementa durante la inspiración (debido a la inhibición temporal del tono vagal) y disminuye durante la espiración (por liberación de acetilcolina en el nodo sinoauricular a través del nervio vago).

La evidencia psicofisiológica demuestra que el sistema cardiovascular humano exhibe una **frecuencia de resonancia** cercana a $0.1Hz$, correspondiente a una frecuencia respiratoria de **6 ciclos por minuto** ($10segundos$ por ciclo). Al sincronizar la respiración con esta frecuencia, las oscilaciones de la presión arterial (ondas de Mayer), el reflejo barorreceptor y la frecuencia cardíaca entran en coherencia de fase, maximizando la amplitud de la HRV y restableciendo la homeostasis autonómica (Lehrer & Gevirtz, 2014).

El **Modo de Biofeedback** del prototipo guía al usuario mediante retroalimentación visual y acústica siguiendo un patrón asimétrico de **4 segundos de inhalación y 6 segundos de exhalación**, prolongando deliberadamente la fase espiratoria para potenciar la estimulación vagal y permitir al usuario observar en tiempo real el incremento de su índice RMSSD.

2.5. Medicina Aeroespacial Operativa: Enfermedad por Descompresión (DCS)

Durante las Actividades Extravehiculares (EVA), los astronautas transitan desde el ambiente presurizado de la nave —mantenido habitualmente a $14.7psi$ ($101.3kPa$) con una mezcla normóxica de \$79\%\$ nitrógeno y \$21\%\$ oxígeno— hacia el interior de un traje espacial que opera a una presión reducida (aproximadamente $4.3psi$ o $29.6kPa$ con \$100\%\$ de oxígeno) para preservar la movilidad mecánica de las articulaciones presurizadas (Buckey, 2006).

Este gradiente bárico se rige por la **Ley de Henry**, la cual postula que, a temperatura constante, la concentración de un gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial de dicho gas en equilibrio con el líquido. Al disminuir bruscamente la presión ambiental dentro del traje, los tejidos corporales quedan sobresaturados de nitrógeno (N_2); si este gas no ha sido eliminado previamente, tiende a formar **burbujas gaseosas intravasculares y extravasculares**, originando la **Enfermedad por Descompresión (DCS)**, patología capaz de desencadenar dolor articular incapacitante, embolia gaseosa arterial, déficit neurológico o colapso cardiorrespiratorio (NASA, 2009).

Para mitigar este riesgo, los protocolos aeroespaciales prescriben una etapa previa de **desnitrogenación (pre-respiración de oxígeno puro)** antes de la despresurización. No obstante, estudios de fisiología espacial han demostrado que la contracción muscular intensa durante la fase de purga favorece la formación de **micronúcleos de cavitación** en las articulaciones y acelera el desprendimiento de burbujas venosas (NASA, 2022). En consecuencia, el **Modo Pre-EVA** del prototipo supervisa simultáneamente el tiempo de purga mediante un temporizador regresivo y la frecuencia cardíaca del tripulante, emitiendo una alerta preventiva si se superan los $120BPM$ para mantener la carga metabólica dentro de márgenes seguros.

2.6. Dosimetría Espacial y Radiación Ionizante (Extensión Geiger-Müller)

Más allá de la protección atmosférica y magnetosférica de la Tierra, las tripulaciones espaciales están expuestas a un campo complejo de radiación ionizante compuesto principalmente por **Rayos Cósmicos Galácticos (GCR)** —núcleos atómicos altamente energéticos de origen extrasolar— y **Eventos de Partículas Solares (SPE)** asociados a fulguraciones y eyecciones de masa coronal. La interacción de esta radiación con los tejidos biológicos provoca ionizaciones directas e indirectas (mediante radiólisis del agua y generación de radicales libres), induciendo roturas de doble cadena en el ADN, carcinogénesis, opacidades del cristalino y alteraciones neurocognitivas (ICRP, 2013; NASA, 2009).

La integración opcional de un **detector Geiger-Müller** (basado en tubos de pared delgada como los modelos M4011 o J305) amplía las capacidades del prototipo hacia la **dosimetría ambiental activa**, permitiendo aplicar el principio radiológico **ALARA** (*As Low As Reasonably Achievable*) establecido por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 2007) y el estándar **NASA-STD-3001** (NASA, 2022):

- **Principio físico de detección:** El tubo alberga una mezcla de gas noble (neón o argón) y un agente extintor halógeno sometida a una diferencia de potencial de $380V$ **a** $400VDC$ entre un cátodo cilíndrico y un ánodo central. El paso de una partícula ionizante libera pares ion-electrón; los electrones son acelerados por el campo

eléctrico intenso, desencadenando una ionización secundaria en cascada (**avalancha de Townsend**) que produce un pulso eléctrico discretizable mediante interrupciones por hardware en el microcontrolador (Knoll, 2010).

- **Conversión dosimétrica y alcance experimental:** El firmware registra las cuentas por minuto (CPM) y las convierte a tasa de dosis equivalente en microsieverts por hora ($\mu\text{Sv/h}$) mediante el factor de sensibilidad calibrado del tubo ($\approx 151\text{ CPM}/(\mu\text{Sv/h})$). Desde una perspectiva metrológica rigorosa, un tubo Geiger-Müller convencional detecta eficientemente radiación beta (β) y gamma (γ), resultando idóneo para demostrar la radiación ionizante de fondo y simular alertas de tormenta solar en un entorno educativo; sin embargo, en misiones espaciales reales se complementa con espectrómetros de silicio de estado sólido capaces de discriminar la Transferencia Lineal de Energía (LET) de iones pesados de alta carga y energía (partículas HZE) y neutrones secundarios (ICRP, 2013; NCRP, 2000).

2.7. Arquitectura de Procesamiento en el Borde (*Edge Computing*) y Ejecución Asíncrona

Para garantizar la fiabilidad operativa en tiempo real sin depender de enlaces de telemetría externos, el firmware implementa una **arquitectura de software asíncrona y no bloqueante** gobernada por el reloj interno de hardware (millis()). A diferencia de la programación secuencial convencional basada en retardos bloqueantes (delay()), que suspendería la adquisición óptica y provocaría la pérdida de picos sistólicos, el sistema planifica tareas concurrentes con frecuencias deterministas (Espressif Systems, 2023):

1. **Muestreo fotopletismográfico continuo:** Adquisición de alta frecuencia sobre el bus I^2C a $400kHz$ para capturar con precisión temporal la morfología de la onda de pulso.
2. **Adquisición térmica desacoplada ($1Hz$):** Empleo de conversión asíncrona en el bus OneWire (DS18B20), iniciando la medición en segundo plano y recuperando el registro digital tras cumplirse el tiempo de conversión de $10bits$ sin detener el flujo principal de ejecución (Maxim Integrated, 2019).
3. **Refresco gráfico y evaluación clínica ($5Hz$):** Actualización periódica de la pantalla OLED SSD1306 cada $200ms$, asegurando fluidez visual en las interfaces de biofeedback y estabilidad en la lectura de parámetros.
4. **Tolerancia a fallos y gestión de interrupciones:** Incorporación de filtrado antirrebote por software para la interfaz táctil y manejo de excepciones ante la desconexión de periféricos, asegurando la continuidad operativa de los módulos activos.

3. APLICACIONES Y UTILIDAD PRÁCTICA DEL PROTOTIPO

Además de su propósito central como demostrador tecnológico para medicina aeroespacial en ferias científicas, la arquitectura desarrollada posee aplicabilidad directa en diversos escenarios de ingeniería biomédica y entornos extremos:

- **Misiones Análogas Espaciales y Ambientes Confinados:** Monitorización fisiológica continua y gestión autónoma del estrés en estaciones de investigación polar, hábitats submarinos, expediciones de alta montaña y simulaciones de aislamiento prolongado.
- **Seguridad Ocupacional en Operaciones Críticas:** Supervisión preventiva de personal expuesto a estrés térmico, hipoxia o sobrecarga cardiovascular, tales como cuerpos de bomberos, brigadas de rescate en espacios confinados, minería subterránea y buceo profesional.
- **Plataforma Educativa STEM de Ingeniería Biomédica:** Herramienta didáctica abierta para la enseñanza integrada de procesamiento digital de señales fisiológicas, protocolos de comunicación embebida (I^2C, OneWire), instrumentación médica y física de radiaciones.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 28(3), R1–R39.
- Analog Devices / Maxim Integrated. (2018). *MAX30102: High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health* (Datasheet, Rev. 1). Maxim Integrated Products.
- Buckey, J. C. (2006). *Space Physiology*. Oxford University Press.
- Espressif Systems. (2023). *ESP8266EX Datasheet & ESP32-WROOM-32 Technical Reference Manual*. Espressif Systems.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). *ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP, 37(2–4).
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2013). *ICRP Publication 123: Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space*. Annals of the ICRP, 42(4).
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement* (4.ª ed.). John Wiley & Sons.
- Lehrer, P. M., & Gevirtz, R. (2014). Heart rate variability biofeedback: How and why does it work? *Frontiers in Psychology*, 5, 756.
- Maxim Integrated. (2019). *DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* (Datasheet, Rev. 6). Maxim Integrated Products.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2009). *Human Health and Performance Risks of Space Exploration Missions: Evidence Reviewed by the NASA Human Research Program* (NASA SP-2009-3405). NASA Johnson Space Center.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022). *NASA Space Flight Human-System Standard, Volume 2: Human Factors, Habitability, and Environmental Health* (NASA-STD-3001, Rev. C). NASA Technical Standards System.
- National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). (2000). *NCRP Report No. 132: Radiation Protection Guidance for Activities in Low-Earth Orbit*. NCRP Publications.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065.

- Webster, J. G. (1997). *Design of Pulse Oximeters*. Institute of Physics Publishing.