



**Facultad de
UNER Ingeniería**

Universidad Nacional de Entre Ríos

Facultad de Ingeniería

Electrónica programable

**Proyecto integrador: “EMG portátil para evaluación
de fatiga muscular en tiempo real”**

Leguiza Scandizzo, Ailen

Perez, María de los Ángeles

Objetivo:

Desarrollar un sistema capaz de adquirir, procesar y transmitir señales electromiográficas de superficie (EMG) en tiempo real. El sistema permitirá visualizar en una PC o celular el nivel de activación muscular y estimar la fatiga a partir del procesamiento de la señal.

Resumen:

El sistema mide la actividad eléctrica generada por la contracción del músculo mediante un sensor EMG de superficie. La señal es adquirida por un conversor analógico digital del microcontrolador, que actúa como unidad de procesamiento. Se implementarán las tareas pertinentes para la adquisición y el filtrado de la señal, así como para la transmisión de datos por Bluetooth hacia una interfaz para su visualización.

Cuando el usuario lo solicita desde la aplicación móvil, se activa una tarea encargada de procesar una ventana completa de muestras. Mediante una tarea se aplica un filtro pasa altos y pasa bajos para limpiar la señal. Luego calcula la FFT, obteniendo el espectro de frecuencias. A partir del espectro se extraen métricas características: Frecuencia media, frecuencia mediana y amplitud RMS de la señal filtrada.

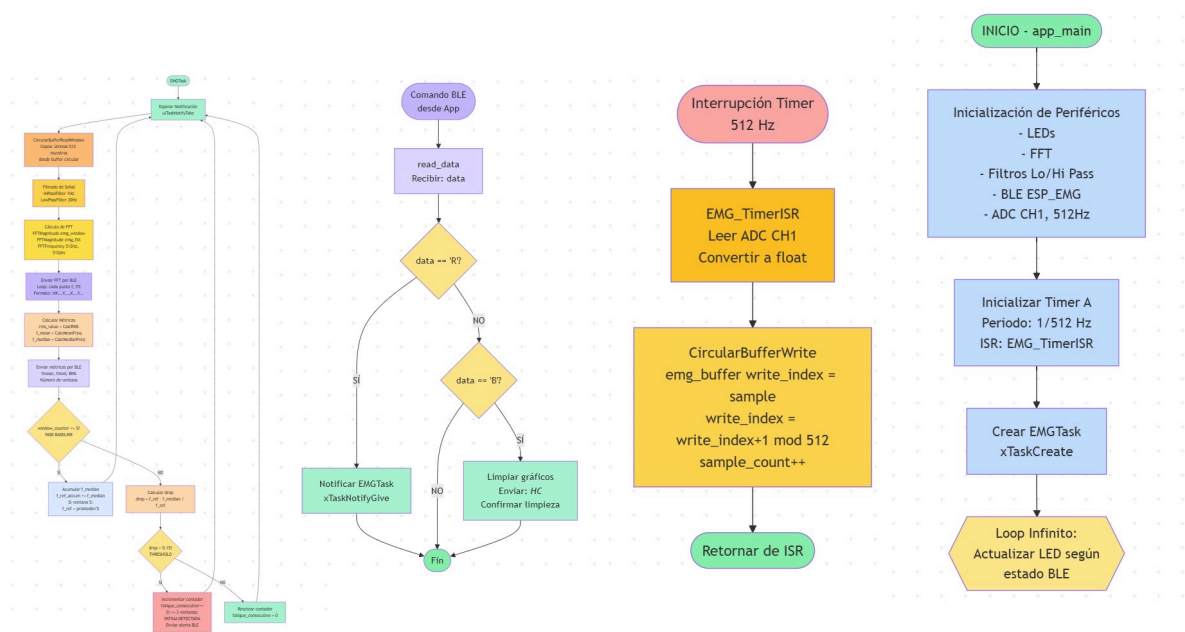
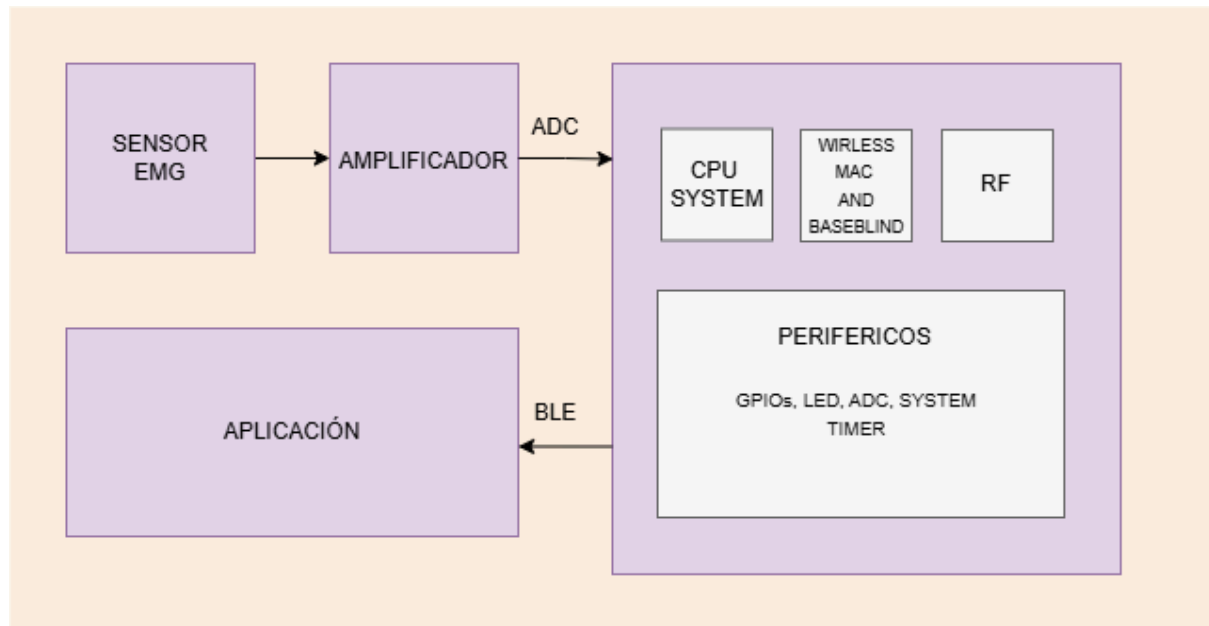
Estas métricas permiten estimar el estado fisiológico del músculo. Durante la fatiga muscular, la frecuencia mediana y la frecuencia media tienden a desplazarse hacia valores más bajos. Si la frecuencia mediana cae por encima de un umbral predeterminado durante varias ventanas consecutivas, el sistema concluye que existe fatiga muscular.

Finalmente, el sistema transmite por Bluetooth tanto las FFT procesadas como las métricas espectrales y el estado de fatiga hacia una aplicación móvil o PC, donde pueden ser visualizadas de forma gráfica en tiempo real. Este enfoque permite evaluar la activación y la fatiga muscular durante ejercicios específicos, siendo útil en aplicaciones de rehabilitación, entrenamiento deportivo y control biomédico.

Requerimiento del diseño:

- Microcontrolador
- Sensor EMG
- Electrodos
- Transmisión de datos: Bluetooth o UART a PC.
- Convertidor analógico digital
- Bioamplificador

Diagrama de flujo y bloque:



Este proyecto implementa un sistema embebido diseñado para medir la fatiga muscular durante el ejercicio utilizando una señal de electromiografía (EMG). El funcionamiento integra distintos módulos del ESP32, incluyendo ADC, temporizadores, interrupciones, procesamiento digital de señales (FFT e IIR), comunicación Bluetooth Low Energy (BLE) y tareas manejadas por FreeRTOS. El objetivo del sistema es adquirir la señal EMG en tiempo real, filtrarla, calcular su FFT y, a partir del análisis espectral, detectar la aparición de fatiga muscular, enviando toda la información a una aplicación móvil mediante BLE.

El proceso comienza con la adquisición de la señal EMG, la cual ingresa por el canal CH1 del ADC del ESP32. Para asegurar una frecuencia de muestreo constante de 512 Hz, se utiliza un temporizador configurado para generar interrupciones cada 1953 microsegundos. Cada vez que ocurre esta interrupción, se ejecuta la rutina EMG_TimerISR. Dentro de esta rutina se realiza exclusivamente la lectura del ADC y el almacenamiento de la muestra en un buffer circular de 512 posiciones. Este buffer circular permite mantener un registro continuo y actualizado de las muestras más recientes sin bloquear el sistema, ya que la ISR se limita únicamente a tareas rápidas y críticas.

Cuando el usuario desea procesar una ventana de datos, la aplicación móvil envía por BLE el comando 'R'. Este comando no produce procesamiento dentro de la interrupción de BLE, sino que despierta la tarea EMGTask a través de una notificación de FreeRTOS. Esta separación es fundamental porque evita realizar cálculos pesados dentro de interrupciones y mantiene la estructura determinística del sistema. Una vez activada, EMGTask comienza copiando desde el buffer circular las últimas 512 muestras en un arreglo temporal de trabajo. Sobre esta ventana se aplican dos filtros IIR: un pasaaltos de 1 Hz para eliminar artefactos de movimiento y un pasabajos de 30 Hz para reducir el ruido de alta frecuencia. Esto deja la señal preparada para el análisis espectral.

A continuación, la tarea calcula la transformada rápida de Fourier (FFT) tanto de la señal cruda como de la señal filtrada, obteniendo los espectros de magnitud y el vector de frecuencias correspondiente. Con estos datos se calculan tres métricas fundamentales: el RMS de la señal filtrada (indicador de la intensidad muscular), la frecuencia media (centroide del espectro) y la frecuencia mediana, que es una de las medidas más utilizadas en la detección de fatiga muscular debido a que tiende a disminuir cuando las fibras musculares pierden capacidad de conducción eléctrica.

El sistema implementa una fase de establecimiento de línea base (baseline), durante la cual se promedian las frecuencias medianas de las primeras cinco ventanas procesadas. Ese valor promedio se denomina frecuencia de referencia (f_{ref}) y representa el estado no fatigado del músculo. Una vez concluida la etapa de baseline, cada nueva ventana se compara con f_{ref} para calcular el porcentaje de caída. Si la frecuencia mediana desciende más de un 15% respecto del valor de referencia, se considera que hay una ventana candidata a fatiga. Si esta condición se cumple durante al menos tres ventanas consecutivas, el sistema declara la presencia efectiva de fatiga muscular, enviando una notificación clara a la aplicación móvil mediante BLE.

Además del análisis de fatiga, la tarea EMGTask se encarga de enviar por BLE tanto las FFT crudas como filtradas y las métricas espectrales, permitiendo que la aplicación móvil grafique la evolución de la señal en frecuencia y el estado fisiológico del músculo durante el

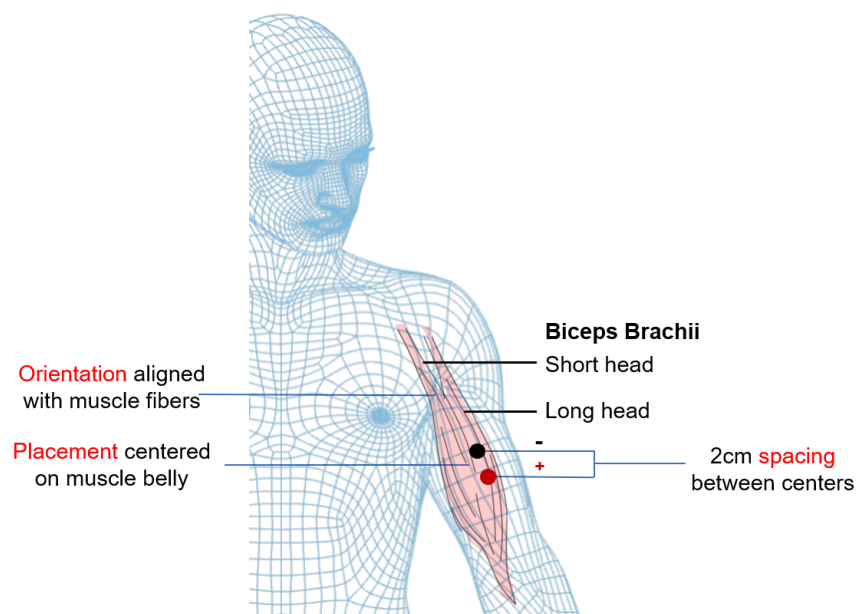
ejercicio. Este envío se realiza de manera pausada con pequeños retardos para no saturar el stack BLE.

Finalmente, la función `app_main` coordina la inicialización de todos los periféricos del sistema: LEDs, ADC, filtros, BLE y temporizadores. También crea la tarea `EMGTask` con prioridad suficiente para procesar la señal sin demoras. En el bucle principal del programa se utiliza un LED para indicar el estado actual del módulo BLE: apagado, parpadeando o encendido fijo según esté apagado, desconectado o conectado, respectivamente. Esto permite al usuario verificar visualmente el estado de conectividad del dispositivo.

El sistema completo integra muestreo, procesamiento digital y comunicación inalámbrica en un único dispositivo embebido, cumpliendo con los requisitos típicos de aplicaciones biomédicas basadas en señal EMG.

Protocolo utilizado para la adquisición de señales

La adquisición de la señal EMG requiere una correcta colocación de los electrodos de superficie para asegurar una medición confiable y con mínima interferencia. Los electrodos se ubican sobre el bíceps braquial alineados con la orientación de las fibras musculares, lo que permite captar de manera más precisa la actividad eléctrica generada durante la contracción.



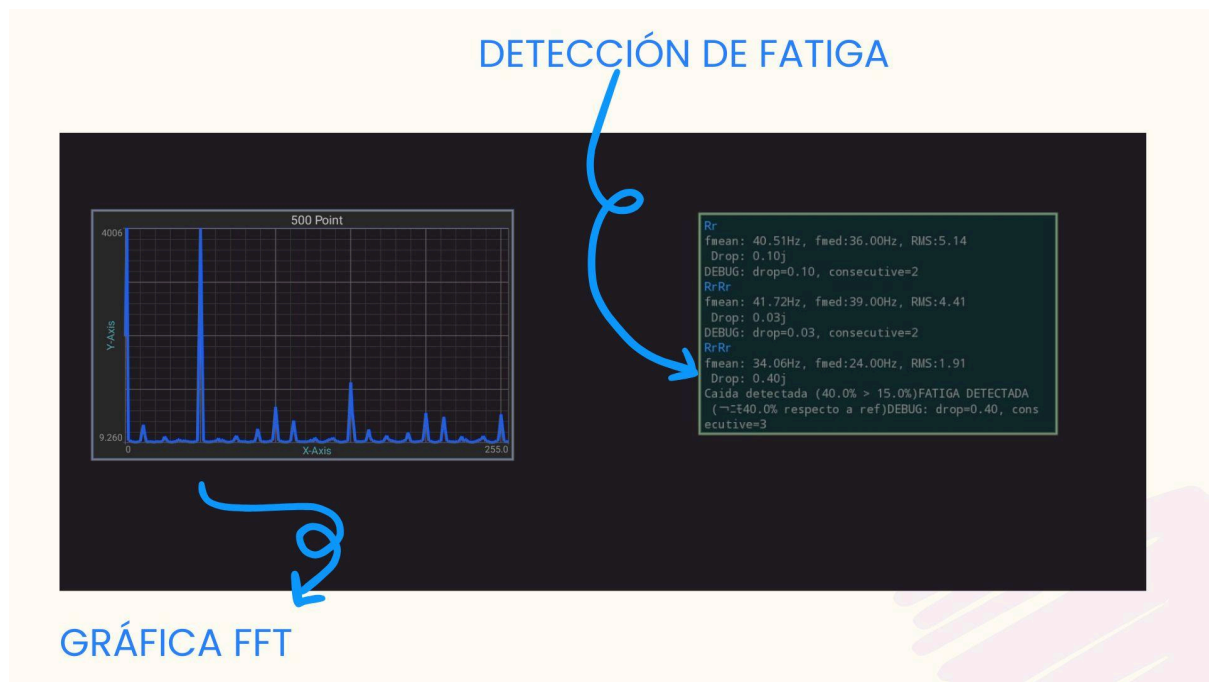
El ejercicio consiste en realizar repeticiones de curl de bíceps con una mancuerna, respetando una cadencia de 2 segundos para la fase concéntrica y 2 segundos para la excéntrica.

Mientras el sujeto realiza el movimiento, el sistema continúa monitoreando las ventanas espectrales.

Se detecta fatiga cuando la frecuencia mediana disminuye de manera sostenida respecto al valor inicial: si la caída relativa supera el 15% durante tres ventanas consecutivas, el

sistema envía una alerta de “FATIGA DETECTADA”. Finalmente, tras completar el ejercicio, se detiene la adquisición, y se retiran los electrodos.

Resultado:



Fuentes bibliográficas:

- Zaman, S. A., MacIsaac, D. T., & Parker, P. A. (2011). Repeatability of surface EMG-based single parameter muscle fatigue assessment strategies in static and cyclic contractions. En *2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (pp. 3857-3860). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090958>
- Chang, J., Chablat, D., Bennis, F., & Ma, L. (2016). Estimating the EMG response exclusively to fatigue during sustained static maximum voluntary contraction. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.00257>
- Jørgensen, K., Fallentin, N., Krogh-Lund, C., & Jensen, B. (1988). Electromyography and fatigue during prolonged, low-level static contractions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 57(3), 316–321. <https://doi.org/10.1007/BF00635990>
- Doud, J. R., & Walsh, J. M. (1995). Muscle fatigue and muscle length interaction: Effect on the EMG frequency components. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 35(6), 331. (myobase.org)
- Wan, X. (2024). Real time detection of muscle fatigue using Arduino based surface EMG frequency and amplitude measurements. *Journal of Student Academic Research*. Recuperado de https://jsar.fsha.org/index.php/jsar/article/view/68?utm_source=chatgpt.com