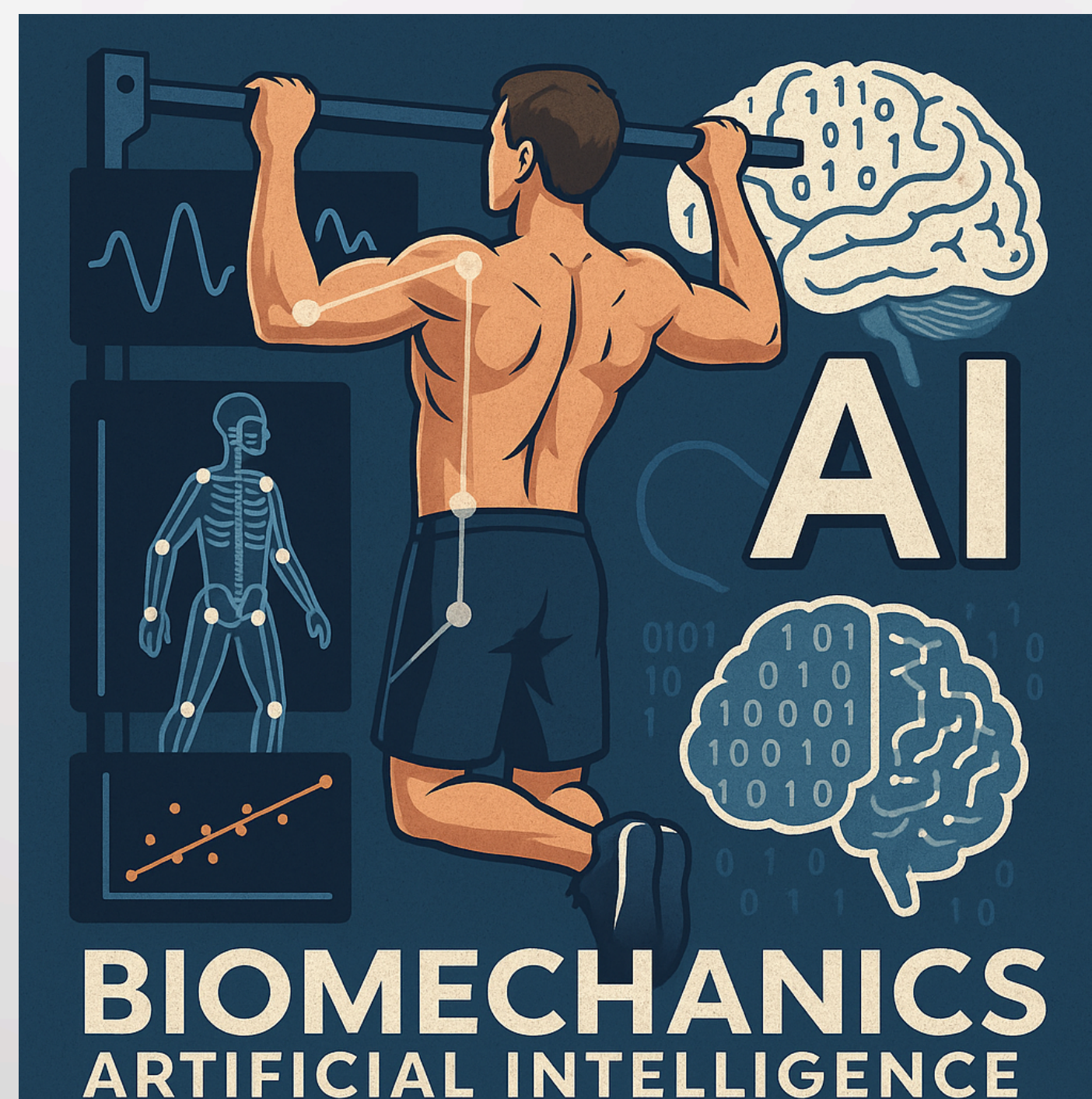




doctor
KNOWMAD
rōnin del conocimiento

by Robert Usach, PhD.

9 CONSIDERACIONES FINALES



Glosario de términos (en contexto de la Biomecánica)

Criterio de Nyquist	Principio de muestreo que exige registrar a una frecuencia al menos el doble de la máxima frecuencia presente en la señal para evitar pérdida de información.
Aliasing	Distorsión que aparece cuando se viola el criterio de Nyquist: componentes de alta frecuencia se “pliegan” y aparecen como frecuencias más bajas, generando medidas erróneas.
Drift	Deriva gradual de la señal (p. ej., orientación calculada) por acumulación de error numérico o inestabilidad de sensores (bias variable en giroscopio).
GPIO	General-Purpose Input/Output: Pin digital de un microcontrolador configurable como entrada o salida para enviar/recibir señales lógicas.
GPIO libre	Cualquier pin GPIO que no está ocupado por otro periférico y puede dedicarse, por ejemplo, a disparar un LED de sincronía.
Pulso de sincronía	Señal eléctrica breve (p. ej., 100 ms a nivel alto) usada como “marca de tiempo” común entre IMU y cámara, visible en vídeo y registrado en el log del sensor.
Cross-correlación	Operación matemática que desplaza dos series temporales para encontrar el desfase con la correlación máxima ; se usa para afinar la alineación IMU-vídeo.
FINER	Acrónimo para evaluar la calidad de una pregunta de investigación: Feasible, Interesting, Novel, Ethical, Relevant .
SMART	Criterios para redactar objetivos operativos: Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound .
G*Power	Software gratuito para cálculo de tamaño muestral y potencia estadística (tests t, ANOVA, correlación, etc.).
Línea axilar media	Referencia anatómica que pasa por el centro de la axila en el plano frontal; punto recomendado para fijar un IMU en el tronco.
Clipping	Saturación del rango del sensor (acelerómetro o giroscopio); los valores “se recortan” al máximo $\pm g$ o \pm°/s permitido, perdiendo fidelidad.
Latencia trig-frame	Diferencia temporal entre el instante del pulso de sincronía (trigger) y el fotograma en que se observa en la cámara; idealmente ≤ 1 frame.
Picos alineados	Verificación de que los máximos/minimismos de la señal IMU coinciden temporalmente con los mismos eventos medidos por la referencia óptica.
LOA (Limits of Agreement)	Límites de acuerdo de Bland-Altman: intervalo $\bar{d} \pm 1.96 \cdot SD$ que abarca el 95 % de las diferencias entre dos métodos.
Model Card	Ficha estandarizada que documenta un modelo de ML: datos de entrenamiento, métricas por subgrupo, ámbito de uso y limitaciones éticas.
TinyML	Disciplina que lleva modelos de <i>machine learning</i> cuantizados y comprimidos a microcontroladores de muy bajo consumo (Arduino, ESP32).
Log QC (Quality Control Log)	Registro estructurado donde se anotan todos los pasos de control de calidad: filtros aplicados, outliers descartados, incidencias de sesión, etc.

Frecuencia de muestreo: ¿cuál elegir y por qué?

Regla de oro: aplicar el criterio de Nyquist sobre la **frecuencia máxima esperada del fenómeno de interés** ($\geq 2 \times f_{\text{máx}}$) y añadir un factor 2 de seguridad para poder filtrar digitalmente sin degradación.

Escenario	Frecuencia recomendada	Justificación práctica
Óptima para el proyecto (dominadas, validación IMU-vs-óptico, posible cálculo de potencia)	≈ 200 Hz	<ul style="list-style-type: none">• Captura sin aliasing el contenido útil de la señal (transitorios de aceleración y giros de hasta ≈ 40–50 Hz).• Dobla con holgura la banda en la que los algoritmos de fusión (Madgwick/Kalman) conservan exactitud alta (RMSE < 3–4°).• Es la frontera a partir de la cual los errores por integración-drift se estabilizan en movimientos rápidos y explosivos; para carrera se piden ≥200 Hz y para running intenso ≥333 Hz / 500 Hz en variables pico ResearchGate.• Balance razonable entre precisión y consumo (batería/memoria).
Mínima aceptable sin comprometer rigor	100 Hz	<ul style="list-style-type: none">• Estudios de orientación en locomoción muestran que por encima de 100 Hz la precisión apenas mejora; por debajo de 100 Hz los RMSE crecen rápido PMC.• Revisiones de IMU portables indican que 100 Hz es suficiente para la mayoría de gestos de la vida diaria y ejercicios de fuerza controlada PMC.• Permite archivos más pequeños (~3 MB/min con 9 canales a 16 bit) y mayor autonomía; adecuado si solo se analizan ángulos medios y conteo de repeticiones.
Umbral “de compromiso” (solo control de repeticiones, feedback recreativo)	≈ 50 Hz	<ul style="list-style-type: none">• Cubre el doble de la frecuencia fundamental de la dominada (~1 Hz) y los armónicos hasta 20 Hz.• Admite conteo de repeticiones y detección de fase, pero pierde exactitud en ángulos instantáneos y picos de potencia; no recomendable para validación científica.

Protocolo de sincronización IMU ↔ filmación paso a paso

Alternativas cuando no hay GPIO libre

- **Clap test:** palmada audible/visible; sincronizar usando pico sonoro (onda) + pico de aceleración.

- **Salto/impacto:** golpe breve que genere pico claro en acelerómetro y en imagen.

Precisión: ± 1 frame en vídeo de alta tasa o ±20 ms con métodos de correlación [ResearchGate](#).

Paso	Acción	Detalles técnicos
1. Preparar hardware	<ul style="list-style-type: none">• Micro-controlador (Arduino/ESP32) conectado a la(s) IMU(s).• LED de alta luminosidad orientado al objetivo de la cámara.• Salida digital (pin TTL) común a LED y línea “trigger” de la IMU.	<ul style="list-style-type: none">• El mismo flanco del pin asegura tiempo cero compartido.
2. Arranque coordinado	<ul style="list-style-type: none">• Iniciar la grabación de vídeo (p.ej., 120–240 fps).• Esperar 2-3 s para estabilizar.• Enviar pulso de sincronía: encender LED 100 ms y registrar marca en la cabecera del archivo IMU.	<ul style="list-style-type: none">• Si se usan varias IMU, todas reciben el mismo pulso.
3. Registro continuo	<ul style="list-style-type: none">• Realizar las dominadas con IMU y cámara grabando.	<ul style="list-style-type: none">• Mantener LED apagado para no contaminar luz.
4. Marcaje final (opcional)	<ul style="list-style-type: none">• Repetir pulso al terminar para tener ancla de cierre.	<ul style="list-style-type: none">• Útil si hubiera drift de reloj.
5. Alineación en post-proceso	<ul style="list-style-type: none">• Detectar el fotograma donde el LED se enciende (pico de intensidad).• Ajustar el “t = 0” de la serie IMU al time-stamp del fotograma usando: $t_{LED} = \text{Frame N} / \text{FPS}$.• Opcional) refinar con cross-correlación entre aceleración vertical IMU y desplazamiento del cuerpo extraído del vídeo para sub-frame precision (< 10 ms).	<ul style="list-style-type: none">• El método LED+flag ofrece errores ≤ 1 frame $\approx 4\text{-}8$ ms a 120 fps espace.curtin.edu.au.
6. Verificación	<ul style="list-style-type: none">• Superponer señales (posición de barra o codo en vídeo vs. aceleración/ángulo del IMU) y comprobar que los picos coinciden.	<ul style="list-style-type: none">• Si hay desajuste lineal, corregir drift con estiramiento temporal (warping).

Fase	Proceso	Resultado
1. Planteamiento de la pregunta	1.1 Aplicar criterios FINER + SMART para redactar la pregunta central (ej.: “¿ <i>Puede un IMU a 200 Hz, ubicado en esternón, medir ROM y contar repeticiones de dominadas con ± 2 reps y $\pm 5^\circ$ frente a Vicon?</i> ”). 1.2 Listar la relevancia práctica (monitorizar fuerza de tracción in-situ, feedback técnico, etc.).	Pregunta de investigación aprobada y justificada (máx. ½ página).
2. Revisión de literatura y marco teórico	2.1 Buscar revisiones y estudios de validación IMU-vs-óptico en ejercicios de tracción. 2.2 Extraer umbrales de error aceptables (bias, LOA, RMSE).	Tabla comparativa de estudios y brecha a cubrir.
3. Definición de variables	3.1 Variables dependientes (ROM articular, tiempo ascenso, nº reps). 3.2 Variables independientes (agarre, lastre) y covariables (sexo, fatiga). 3.3 Criterios de éxito (p.ej., ICC ≥ 0.90 , bias $< \pm 5^\circ$).	Lista de variables con definiciones operativas y métricas objetivo.
4. Diseño experimental	4.1 Tipo de estudio: comparativo transversal IMU–óptico. 4.2 Cálculo de muestra en G*Power (α 0.05, potencia 0.8). 4.3 Número de repeticiones: ≥ 5 válidas \times 3 series / condición.	Plan de estudio (protocolo v0.1) y justificativo muestral.
5. Material y equipamiento	5.1 IMU multieje $\geq \pm 16$ g, $\pm 2000^\circ/\text{s}$, 200 Hz. 5.2 Sistema óptico o Kinovea 120–240 fps como gold standard. 5.3 LED trigger + GPIO, cinchas antideslizantes, Arduino/ESP32.	Inventario de equipo y fichas técnicas.
6. Configuración técnica	6.1 Frecuencia de muestreo: 200 Hz (explicar Nyquist + reservas). 6.2 Filtro Butterworth 4° 15 Hz; calibración 6-pos + figure-8 magnetómetro.	Manual de configuración (checklist laboratorio).
7. Protocolo de colocación y sincronización	7.1 Ubicación IMU: línea axilar media (T12/L1); marcar contorno. 7.2 Protocolo LED 100 ms + marca TTL para sincronizar IMU-vídeo; repetir al cierre para drift. 7.3 Ensayo quiet-standing 10 s para bias + 3 sentadillas piloto (alineación ejes).	Instrucciones ilustradas paso a paso (PDF/laminado).
8. Sesión piloto y refinamiento	8.1 Recolectar datos de 2 sujetos, 10 dominadas c/u. 8.2 Verificar clipping, latencia trig-frame, picos alineados. 8.3 Ajustar filtros/ventanas y confirmar que LOA preliminar $\approx \pm 5^\circ$.	Informe piloto con gráficos Bland-Altman y correcciones recomendadas.
9. Adquisición definitiva	9.1 Grabación según protocolo (contrabalanceo agarres/lastre). 9.2 Registro inmediato de incidencias (slippage, fatiga).	Dataset crudo + metadatos estructurados.
10. Procesado y control de calidad	10.1 Aplicar pipeline estándar (normalización, filtrado). 10.2 Detectar outliers (> 3 SD) y repetir pruebas si procede.	Carpeta de datos procesados + log QC.
11. Análisis estadístico	11.1 Validez: bias, LOA 95 %, RMSE, ICC. 11.2 Fiabilidad test-retest (ICC, CV) y análisis inter-observador si hay 2 técnicos.	Tabla de resultados + gráficas concordancia.
12. Implementación IA/ML	12.1 Ventanas 2 s / 50 % solap.; extracción features + CNN-LSTM en TensorFlow. 12.2 Validación LOSO; métricas Accuracy, F1, MCC. 12.3 Quantization int8 y prueba en Arduino.	Prototipo de modelo + reporte TinyML (latencia, tamaño).
13. Interpretación y conclusiones	13.1 Comparar errores obtenidos con umbrales aceptables. 13.2 Recomendar ajustes (frecuencia, posición sensor).	Documento de conclusiones y recomendaciones prácticas.
14. Difusión y documentación	14.1 Redactar artículo/tesis siguiendo APA; incluir gráficos BA, ICC. 14.2 Crear <i>Model Card</i> y glosario para usuarios finales.	Manuscrito, presentación docente y materiales de apoyo.

