MANUAL DE INGENIERÍA DE RADIOFRECUENCIA: WI-FI, BLE GATT, LORA Y SUEÑO PROFUNDO (DEEP SLEEP)

Curso: Internet de las Cosas (IoT) con Arduino y Raspberry Pi — Ingeniería Mecatrobótica

Módulo 06 / Video 06: Fundamentos Matemáticos de Presupuesto de Enlace RF, Arquitectura GATT Bluetooth SIG, Modulación Chirp Spread Spectrum (`LoRa`) y Modelado Energético de Baterías

---

1. El Trilema de las Comunicaciones Inalámbricas en IoT

En ingeniería de telecomunicaciones industriales, ningún protocolo de radiofrecuencia puede maximizar simultáneamente **tres variables físicas contrapuestas**:

- **Alcance Geográfico (d)**
- **Caudal de Datos o Ancho de Banda (R_b)**
- **Autonomía Energética en Batería (T_{vida})**

Parámetro de Ingeniería	Wi-Fi (`IEEE 802.11n`)	Bluetooth Low Energy (`BLE 5.0`)	Radio `LoRa Sub-GHz (SX1278)`
Banda de Frecuencia ISM	$2.4\ GHz$ / $5.0\ GHz$	$2.4\ GHz$ (40 canales de $2\ MHz$)	$433\ MHz$ / $868\ MHz$ / $915\ MHz$
Velocidad Efectiva (R_b)	$20\ Mbps$ a $72\ Mbps$	$125\ kbps$ a $2.0\ Mbps$	$293\ bps$ (`SF12`) a $5.47\ kbps$ (`SF7`)
Alcance Típico en Campo	$30\ m$ a $90\ m$	$15\ m$ a $60\ m$	$2.0\ km$ **a** $15.0\ km$
Sensibilidad del Receptor ($S_{\min}$)	$-75\ dBm$	$-95\ dBm$	$-123\ dBm$ **(** `SF7` **)** **a** $-137\ dBm$ **(** `SF12` **)**
Corriente Pico en Transmisión	$180\ mA$ a $260\ mA$	$12\ mA$ a $18\ mA$	$90\ mA$ a $120\ mA$ ($+17..20\ dBm$)
Pila TCP/IP Nativa	Sí (Directo a Broker MQTT)	No (Requiere Pasarela GATT → IP)	No (Requiere Concentrador SPI → IP)

---

2. Presupuesto de Enlace RF (Link Budget) y Ecuación de Friis

La potencia electromagnética recibida P_{rx} (expresada en dBm, decibelios referidos a $1\ mW$) en la antena del servidor de borde viene determinada por el **balance logarítmico de potencias, ganancias y pérdidas**:

$$P_{rx}\ (dBm) = P_{tx}\ (dBm) + G_{tx}\ (dBi) + G_{rx}\ (dBi) - FSPL(d, f)\ (dB) - L_{misc}\ (dB)$$

Donde la **Pérdida de Propagación en el Espacio Libre de Friis ($FSPL$)** en función de la distancia $d\ (km)$ y la frecuencia portadora $f\ (MHz)$ es:

$$FSPL\ (dB) = 20 \cdot \log_{10}(d_{km}) + 20 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) + 32.44$$

2.1 ¿Por qué la banda Sub-GHz ($433\ MHz$) penetra mucho mejor que $2.4\ GHz$?

A igual distancia d, la diferencia de atenuación en espacio libre entre $2400\ MHz$ (`Wi-Fi` / `BLE`) y $433\ MHz$ (`LoRa`) es:

$$\DeltaFSPL = 20 \cdot \log_{10}\left((2400) / (433)\right) = 20 \cdot \log_{10}(5.5427) \approx +14.87 \text{ dB}$$

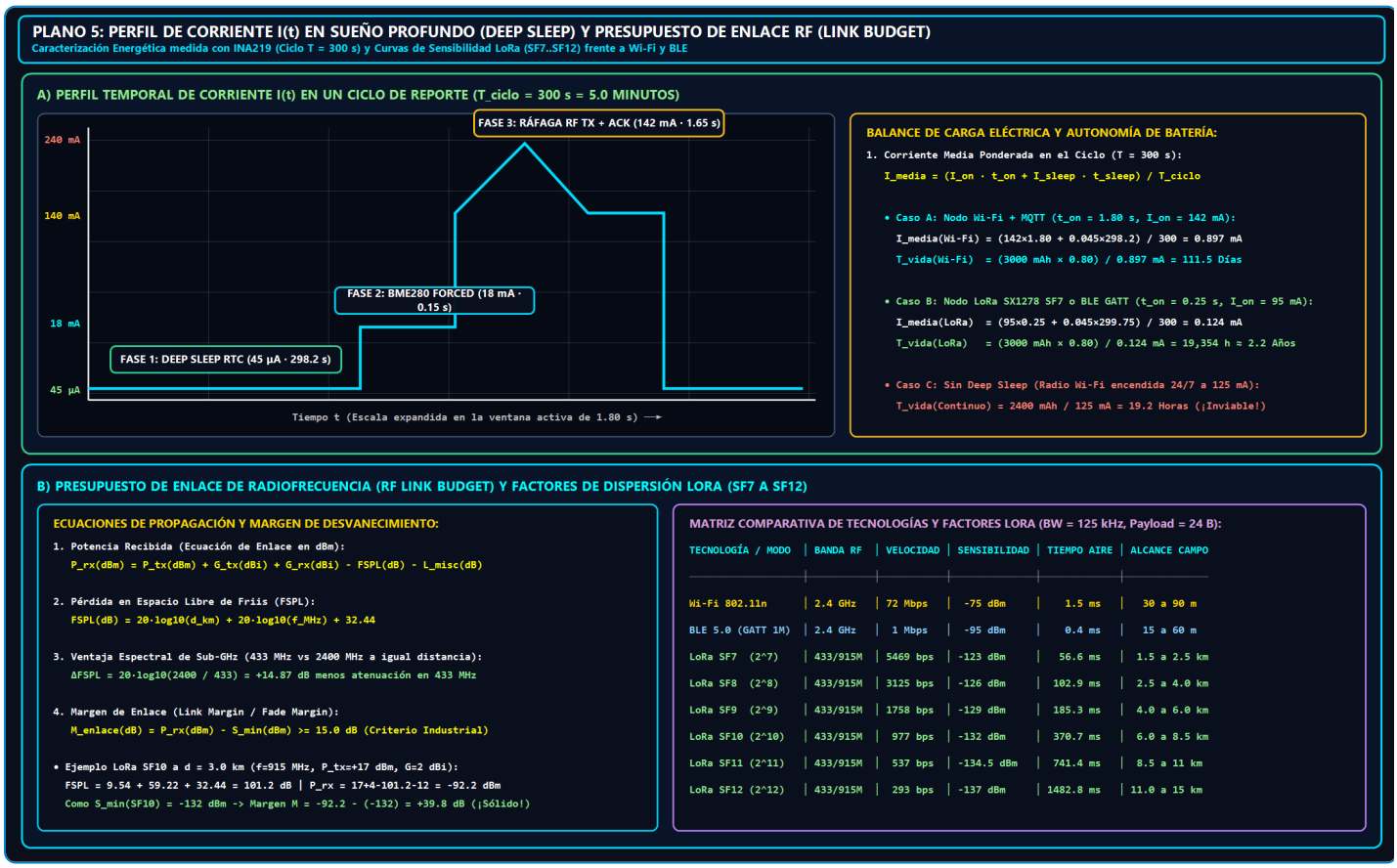
Una ventaja de $14.87\ \text{dB}$ equivale a multiplicar el alcance lineal en espacio libre por un factor de $5.54\times$ con la misma potencia de transmisión, además de sufrir menor absorción dieléctrica al atravesar follaje húmedo en invernaderos o muros de hormigón.

2.2 Margen de Desvanecimiento (Link Margin)

Para que un enlace industrial sea confiable ante lluvia, niebla o interferencia multitrayecto, exigimos un margen mínimo de seguridad de $15\ \text{dB}$ sobre la sensibilidad límite $S_{\min}$ del demodulador:

$$M_{\text{enlace}}\ (\text{dB}) = P_{\text{rx}}\ (\text{dBm}) - S_{\min}\ (\text{dBm}) \geq 15.0\ \text{dB}$$

📐 Plano 5: Perfil Temporal de Corriente en Deep Sleep y Presupuesto de Enlace RF



---

3. Reconexión Wi-Fi y MQTT con Backoff Exponencial y Jitter Estocástico

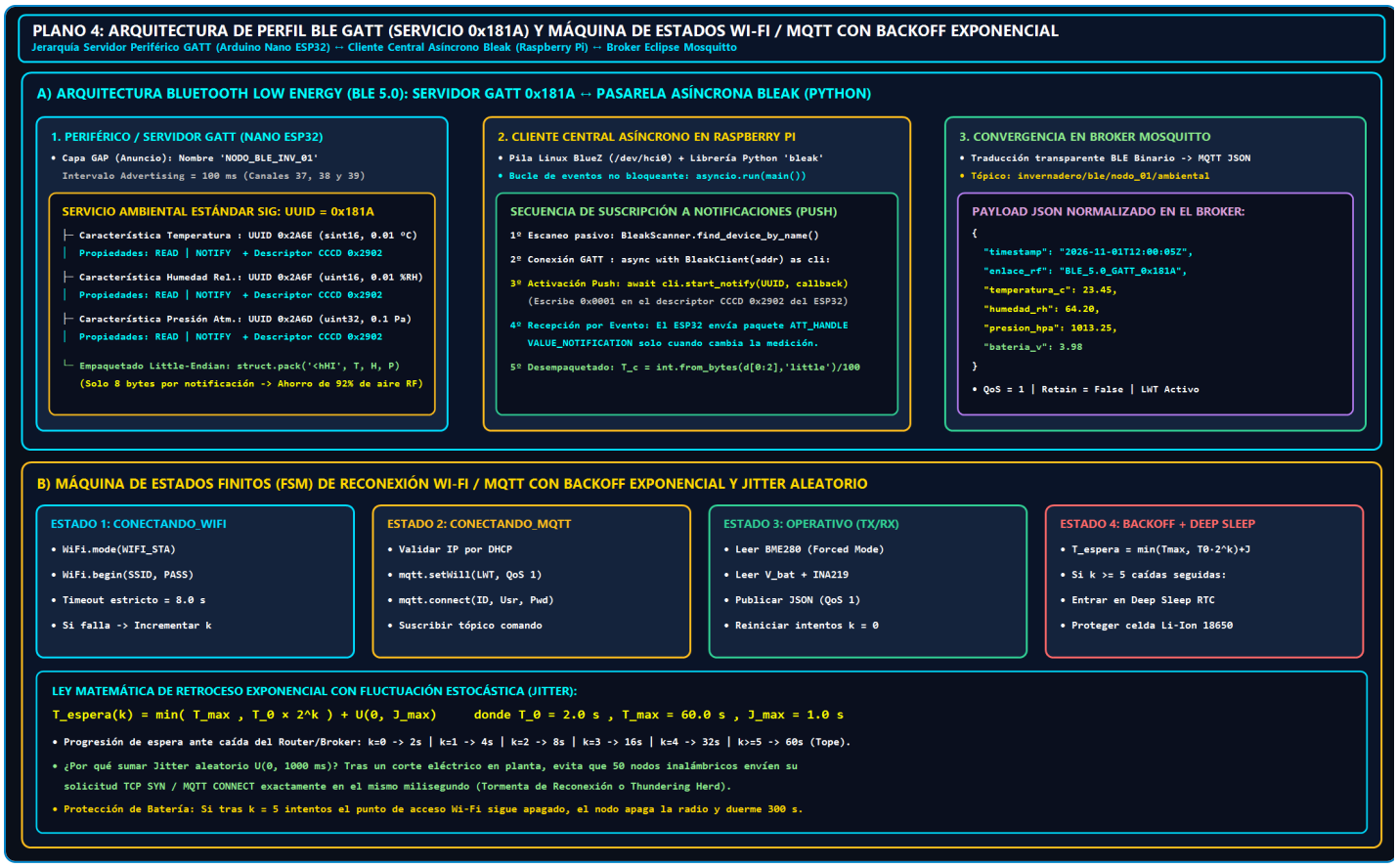
Cuando se restaura la energía eléctrica tras un apagón en planta, los microcontroladores arrancan en menos de $200\ \text{ms}$, mientras que el router Wi-Fi industrial y el servidor Linux tardan entre $30\ \text{s}$ y $60\ \text{s}$ en levantar sus servicios. Si N nodos reintentan conectarse en un bucle fijo cada $500\ \text{ms}$, provocan una *Tormenta de Reconexión (*Thundering Herd*)* y agotan sus baterías.

La solución de grado industrial implementa *Retroceso Exponencial Truncado con Fluctuación Aleatoria (*Jitter*)*:

$$T_{\text{espera}}(k) = \min\left(T_{\max},\ T_0 \cdot 2^k\right) + U(0, J_{\max})$$

Con $T_0 = 2.0\ \text{s}$, $T_{\max} = 60.0\ \text{s}$ y $J_{\max} = 1.0\ \text{s}$, la espera crece geométricamente ($2\ \text{s}, 4\ \text{s}, 8\ \text{s}, 16\ \text{s}, 32\ \text{s}, 60\ \text{s}$) y el término aleatorio uniforme $U(0,\ 1000\ \text{ms})$ desincroniza las ráfagas TCP SYN entre nodos.

📐 Plano 4: Arquitectura de Perfil BLE GATT 0x181A y Máquina de Estados de Reconexión con Backoff



---

4. Modelado Energético en Sueño Profundo (`Deep Sleep`) y Vida Útil de Batería

En un nodo cíclico con periodo total $T_{ciclo} = t_{activo} + t_{sleep}$, la **corriente media ponderada** drenada de la batería es:

$$I_{media} = \frac{I_{activo} \cdot t_{activo} + I_{sleep} \cdot t_{sleep}}{t_{activo} + t_{sleep}}$$

Aplicando un factor de descarga segura $\eta_{bat} = 0.80$ para preservar la química de la celda `Li-Ion 18650` ($Q_{bat} = 3000\ mAh$), la autonomía en días es:

$$T_{vida\ (días)} = \frac{Q_{bat\ (mAh)} \cdot \eta_{bat}}{24 \cdot I_{media\ (mA)}}$$

- **Sin Deep Sleep ($I_{media} = 125\ mA$ continuo):** $T_{vida} = (3000 \times 0.80) / (24 \times 125) = 0.80$ días $= 19.2$ horas.
- **Con Deep Sleep en Wi-Fi ($t_{activo} = 1.8$ s a $142\ mA$, $t_{sleep} = 298.2$ s a $45\ \mu A$):** $I_{media} = 0.897\ mA \implies T_{vida} = \mathbf{111.5\ días}$.
- **Con Deep Sleep en LoRa `SF7` o `BLE` ($t_{activo} = 0.25$ s a $95\ mA$, $t_{sleep} = 299.75$ s a $45\ \mu A$):** $I_{media} = 0.124\ mA \implies T_{vida} = \mathbf{806\ días\ (\approx 2.2\ años)}$.