



Integración de un modelo de energía en la simulación de redes LoRaWAN en NS-3

Trabajo Final de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Gabriel Dobato Ingalaturre
Junio 2018



Índice

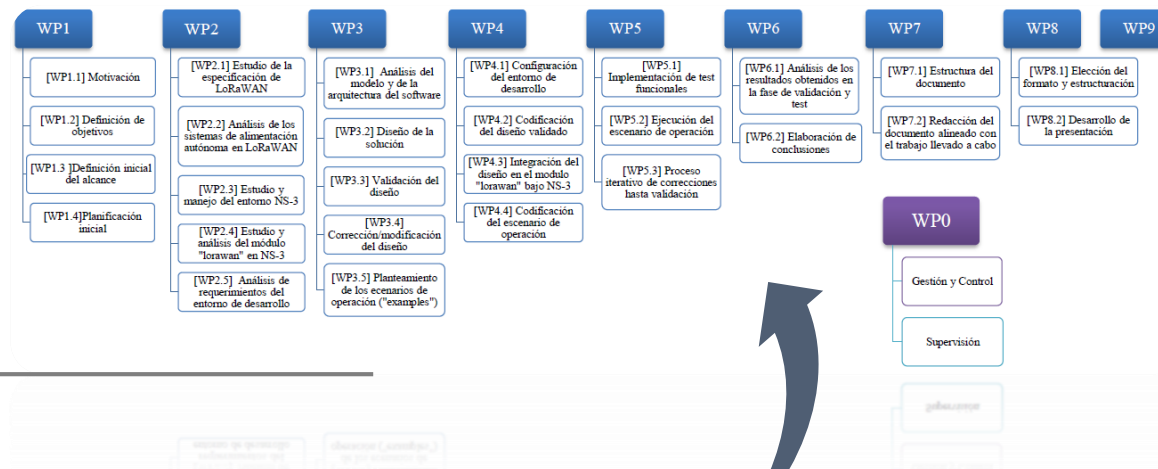
- **Objetivos**
- **Planificación**
- **LoRaWAN**
- **Módulo LoRaWAN en NS-3**
- **Integración del modelo de energía**
- **Escenarios**
- **Resultados**
- **Conclusiones**

Objetivos

- **Análisis y contextualización**
 - Caracterización de las redes de baja potencia y área amplia (LPWAN)
 - Análisis del estándar LoRaWAN. Necesidad de implementar simulaciones de red.
 - Configuración y manejo del entorno de simulación de red NS-3.
 - Análisis del modelo LoRaWAN disponible en NS-3 en el cual se aplicará el modelo de energía.
- **Diseño e implementación de un modelo energético**
 - Diseño de un modelo energético que caracterice las fuentes de energía y el consumo de los dispositivos finales (ED) en una red LoRaWAN.
 - Codificación del modelo en C++.
 - Establecimientos de métricas. Test y validación.
- **Diseño y despliegue de escenarios**
 - Planteamiento y diseño de escenarios para aplicar el modelo energético.
 - Codificación de escenarios en C++.
- **Análisis de resultados**
 - Análisis de los datos capturados durante las simulaciones.
 - Análisis de los factores que mejoran el rendimiento energético en los escenarios.

Planificación

- Planificación alineada con los hitos del plan docente del TFM.
- Reporte periódico del estado de actividades.
- Seguimiento y ajuste de tareas.
- Estructuración y desglose en paquetes de trabajo (WP).



Entregas parciales	Paquetes de trabajo	Fecha
Propuesta TFM	N/A – Fase previa al <i>kick-off</i>	28/02/2018
PEC1: Planificación del trabajo	[WP1] Determinación del Marco General del TFM.	07/03/2018
PEC2: Primera entrega (60% trabajo técnico)	[WP2] Análisis y desarrollo teórico. Conceptualización. [WP3] Análisis y diseño de la solución.	18/04/2018
PEC3: Segunda entrega (100% trabajo técnico)	[WP4] Codificación del diseño e integración. [WP5] Validación y ejecución de escenarios.	23/05/2018
Entrega de la memoria final	[WP6] Valoración y conclusiones. [WP7] Elaboración de la memoria.	10/06/2018
Entrega de la presentación	[WP8] Elaboración de la presentación del TFM.	17/06/2018
Inicio del tribunal	[WP9] Elaboración de la presentación del TFM.	18/06/2018
Final del tribunal		24/06/2018

LoRaWAN

¿Qué es LoRaWAN?

LoRaWAN es una especificación de red abierta publicada por el grupo **LoRa Alliance** que hace uso de la tecnología propietaria LoRa, con el fin de fomentar su uso en aplicaciones sobre redes **LPWAN** con altos requisitos de consumo, proporcionando mecanismos de localización, y garantizando seguridad extremo a extremo.

¿Por qué LoRaWAN?

- Relación alcance / tasa de transmisión.
- Operación en múltiples bandas.
- Tamaño *payload* apropiado para múltiples aplicaciones en el contexto IoT.
- Popularidad en el mercado frente a otras tecnologías como SigFox, Ingenu, Telensa, etc.



[Ref]



[Ref]



[Ref]

	Sigfox	LoRaWAN	Ingenu	Telensa
Modulación	UNB DBPSK(UL), GFSK(DL)	CSS	RPMA-DSSS(UL), CDMA(DL)	UNB 2-FSK
Banda frecuencial	SUB-GHz ISM: EU (868 MHz), US(902MHz)	SUB-GHz ISM: EU (433MHz, 868MHz), US(915MHz), Asia(430MHz)	ISM 2,4 GHz	SUB-GHz ISM: EU(868MHz), US(915MHz), Asia(430MHz)
Tasa de bits	100 bps(UL), 600 bps(DL)	0.3-37.5 kbps(LoRa), 50 kbps(FSK)	78kbps(UL), 19.5 kbps(DL)	62.5(UL), 500 bps (DL)
Alcance	10 km (urbano), 50 km (rural)	5 km (urbano), 15 km(rural)	15 km (urbano)	1km (urbano)
Número de canales/ Señales ortogonales	360 canales	10 en EU, 64+8(UL) – 8DL en US	40 canales de 10MHz, hasta 1200 señales por canal	Múltiples canales
Simetría de enlace	No	Si	No	No
FEC	No	Si	Si	Si
MAC	ALOHA	ALOHA	CDMA	-
Topología	estrella	Estrella de estrellas	Estrella, árbol	estrella
ADP	No	Si	Si	No
Longitud de datos útiles (Payload)	12 B (UL), 8 B (DL)	Hasta 250B	10KB	-
Handover	EDs no se suscriben a una única estación base	EDs no se suscriben a una única estación base	Si	No
Autenticación y encriptación	No	AES 128 b	16B hash, AES 256 b	-
Actualizaciones OTA	No	Si	Si	Si
Soporte SLA	No	No	No	No
Localización	No	Si	No	No

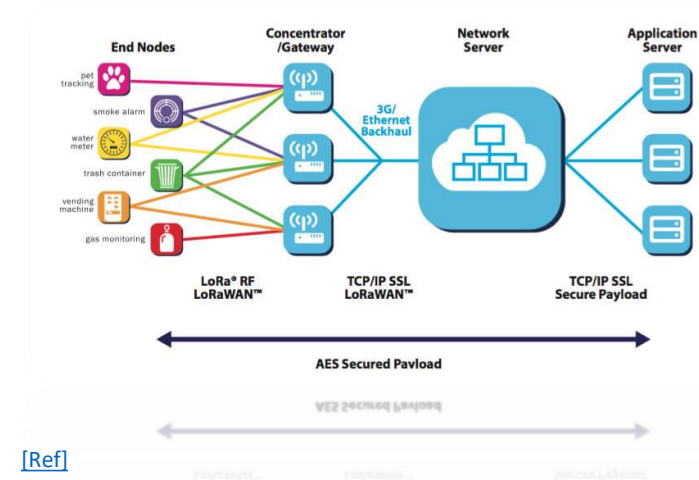
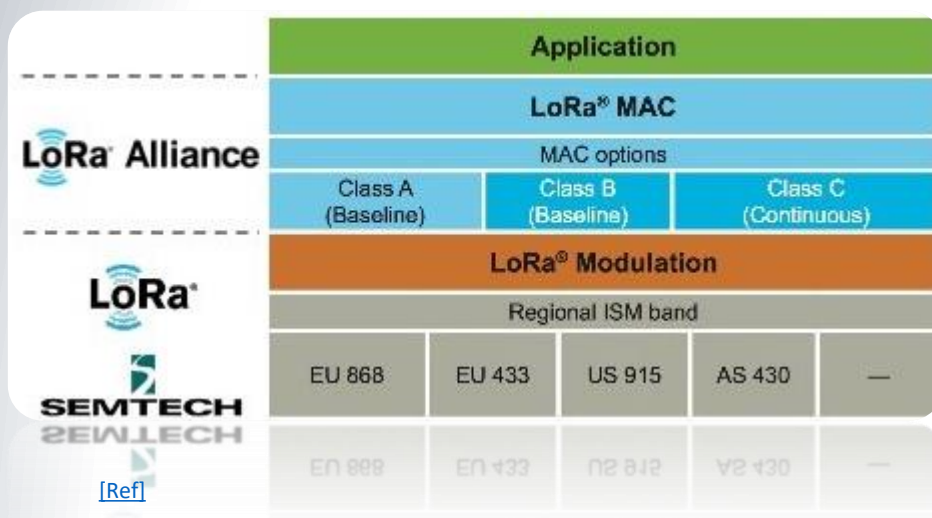
[Ref]

LoRaWAN

Arquitectura

- Basada en una topología “**estrella de estrellas**”, constituida por múltiples dispositivos finales (ED) para la captura de datos o actuadores, puertas de enlace (GW) como transductores de protocolo (Lora/TCP-IP) y servidores centrales (NS) de gestión y control de red.
- Dispositivos finales clasificados en **clases** (A, B, C) en función de la aplicación y los requisitos de consumo.

Stack



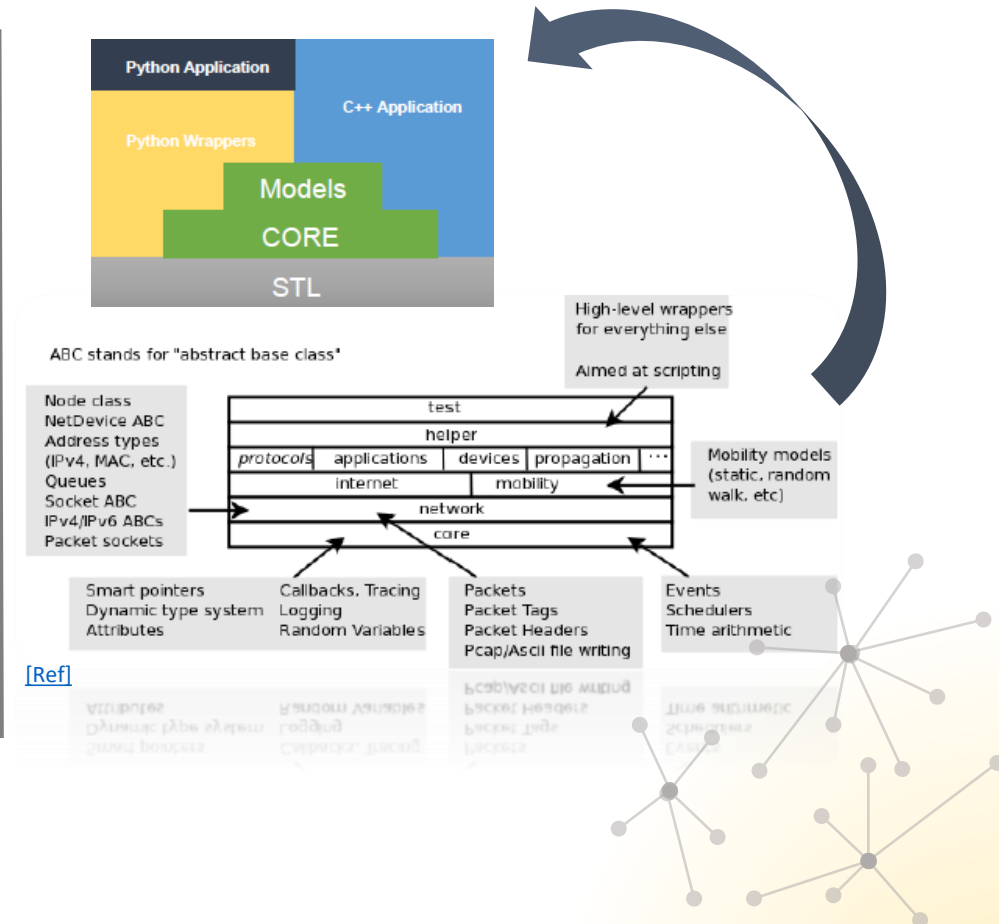
- Capa física** propietaria (Semtech) que hace uso de un esquema de modulación basado en **Chirp Spread Spectrum (CCS)**.
- Capa lógica**, que lleva a cabo la implementación de la especificación LoRaWAN.
- Capa de aplicación** no contemplada en la especificación LoRaWAN, donde se lleva a cabo la **lógica de usuario** de acuerdo a aplicaciones específicas de usuario.

Módulo LoRaWAN en NS-3

El trabajo toma como punto de partida un módulo ya existente de LoRaWAN [\[Ref\]](#) implementado bajo NS-3, así como otros modelos base disponibles en la plataforma.

¿Por qué NS – 3 ?

- Amplio uso en los campos de investigación actual de redes.
- Fácil acceso a la herramienta (disponibilidad bajo licencia **GNU GPLv2**)
- Uso de **C++ y Python**, así como disponibilidad de gran variedad de librerías de software que simplifican el diseño a alto nivel.
- **Organización por capas y estructura modular**, permiten un alto grado de reusabilidad de software.
- Gestión sencilla de configuración y monitorización basada en “**atributos**” de los elementos de red.
- Uso de herramientas como **Waf, Git, Mercurial**, facilitan el desarrollo bajo metodologías ágiles.

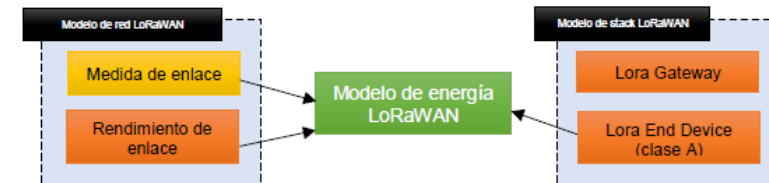


Módulo LoRaWAN en NS-3

❑ Módulo LoRaWAN

El módulo LoRaWAN [Ref], tomado como punto de partida, caracteriza el modelo el **modelo de red** y la **pila de protocolos** de una red LoRaWAN:

- **Modelo de red** dividido en dos submodelos:
 - Medida de enlace : caracteriza la intensidad de la señal entre un par transmisor – receptor, a través de modelos de pérdidas por propagación variables en función del entorno.
 - Medida de rendimiento : Abstrae la implementación real de la cadena de transmisión de la capa física.
- **Modelo de *stack***: caracteriza los diferentes componentes que forman parte de la pila de protocolos de LoRaWAN de los dispositivos finales (ED) y *gateways* (GW), a través diferentes **clases principales** y haciendo uso de “*helpers*” o **clases auxiliares** que facilitan la configuración de los diferentes parámetros de la red.

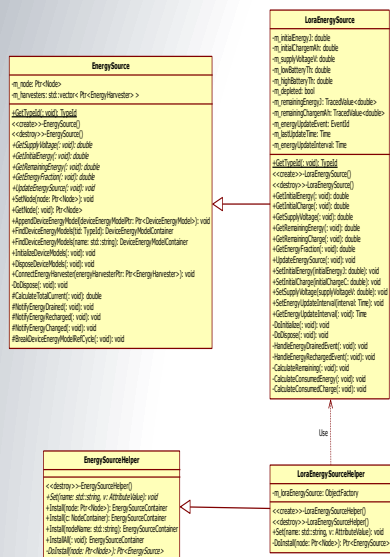


- Módulo implementado en NS-3.
- Módulo implementado en el módulo LoraWAN [4], rama principal de desarrollo.
- Módulo a implementar e integrar en el presente
- Módulos con influencia directa en el modelo de energía.

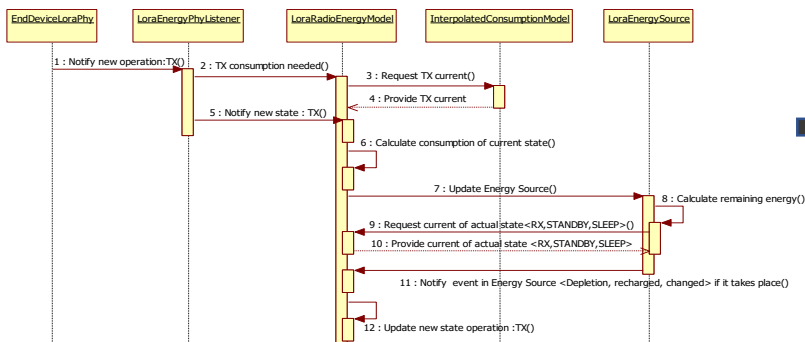
Integración del modelo de energía

La solución planteada se basa en el desarrollo de un modelo de medida de consumo y análisis de eficiencia energética a aplicar en el módulo LoRaWAN en NS-3:

- Alcance definido de acuerdo a los objetivos generales del proyecto.
- Limitaciones del modelo localizadas. A destacar la no disponibilidad de mecanismos para plantear escenarios con transmisiones en enlace descendente (DL).
- Localización de los parámetros del estándar LoRaWAN con impacto en el modelo energético: modelo de propagación, asignación de SF de operación (mayor valor implica mayor consumo), ciclo de envío de paquetes, etc.
- Metodología de desarrollo útil basado en un enfoque de arriba abajo: Arquitectura – diseño – implementación.



Diagramas UML



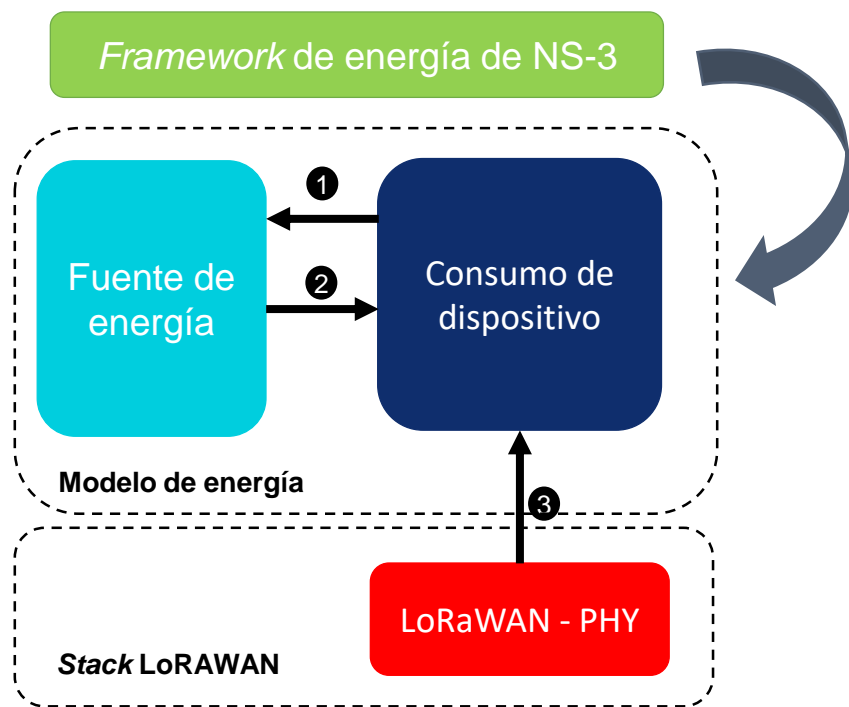
```

double
InterpolatedLoraConsumptionModel::calcTxCurrent (double power_dBm) const
{
    NS_LOG_FUNCTION (this << power_dBm);
    //Collect data from database
    std::vector<double> power_dBm_lookup_table = {7.0, 13.0, 17.0, 20.0 };
    std::vector<double> current_ma_lookup_table = {18.0, 28.0, 90.0, 125.0};
    //Size of look up table elements
    int n_elements = power_dBm_lookup_table.size();
    //Values which limits the value to be interpolated
    double current_ma_L, current_ma_R, power_dBm_L, power_dBm_R;
    //Value of current result of interpolation
    double current_ma_interpolated;
    //Index
    int index = 0;
    NS_ASSERT ( power_dBm < power_dBm_lookup_table[n_elements - 1] || power_dBm > power_dBm_lookup_table[0] );
    while ( ! ( power_dBm > power_dBm_lookup_table[index + 1] ) )
    {
        index++;
    }
    //Prepare terms of the formula (For more reference : "Integración de un modelo de energía en la
    simulación de redes LoRaWAN en NS-3 ", section 5.3.2.2)
    current_ma_L = current_ma_lookup_table[index];
    power_dBm_L = power_dBm_lookup_table[index];
    current_ma_R = current_ma_lookup_table[index + 1];
    power_dBm_R = power_dBm_lookup_table[index + 1];
    current_ma_interpolated = current_ma_L + (current_ma_R - current_ma_L)/(power_dBm_R - power_dBm_L) *
    (power_dBm - power_dBm_L);
    NS_LOG_DEBUG ("Input Power: " << power_dBm << "dBm - Interpolated current: " << current_ma_interpolated <<
    "mA");
    return (current_ma_interpolated / 1000);
}
    
```

Implementación

Integración del modelo de energía

El modelo energético implementado hace uso del **framework de energía** de NS-3, el cual se basa en un modelo dual : **consumo de dispositivo - fuente de energía** , que caracteriza el consumo de los dispositivos finales (ED), así como el sistema de alimentación autónomo (baterías) respectivamente, bajo el cual operan en la red, particularizándolo al modelo energético de un dispositivo ED de red LoRAWAN, y realizando el acoplo con el *stack* de red implementado en el módulo LoRaWAN de NS-3, a través de una serie de *interfaces*.



- 1 Información del consumo del dispositivo.
- 2 Información del estado de la fuente.
- 3 Información del estado de operación del dispositivo.

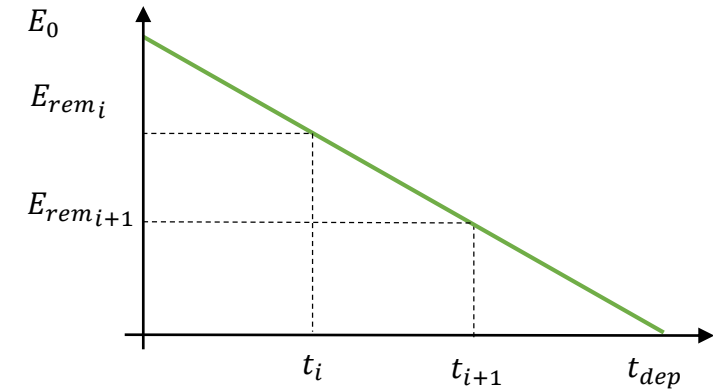
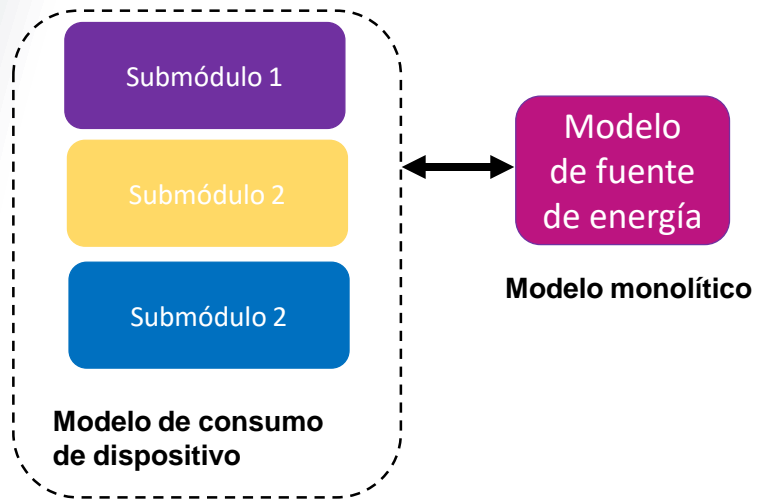
Integración del modelo de energía

□ Modelo de fuente de energía

• Modelo teórico

Modelo idealizado de una batería Ion – Litio con un perfil de descarga lineal y un nivel de diferencia de potencial constante durante todo el intervalo de operación de la fuente.

• Diseño de software



Módulo monolítico con bases derivadas del *framework* de energía de NS-3, e interfaces que proporcionan:

- Configuración de los parámetros eléctricos de la batería.
- Información del estado de la batería.
- Notificación de eventos producidos (agotamiento, cambio, re-carga).
- Petición de actualización del estado de la batería.

Integración del modelo de energía

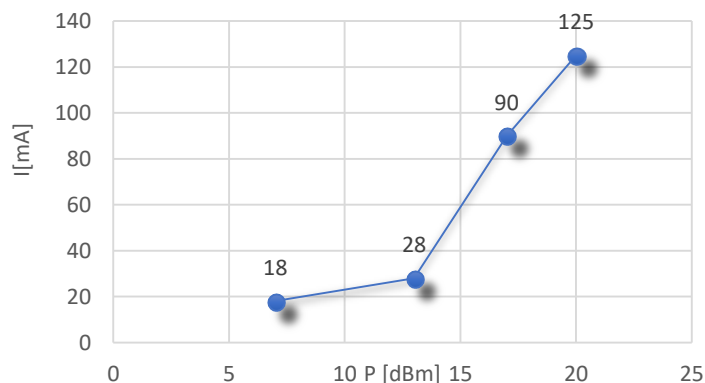
Modelo de consumo de energía de dispositivo

Modelo teórico

Realiza el cálculo del consumo de los dispositivos en cada uno de los **modos de operación**, a partir de los datos de consumo de la **hoja de datos del fabricante**.

Modo	Condiciones	Consumo típico
STANDBY	N/A	1.4 mA
TX	+20 dBm	125 mA
	+17 dBm	90 mA
	+13 dBm	28 mA
	+7 dBm	18 mA
RX	LnaBoost On	11.2 mA
SLEEP	N/A	1.8

[Ref]



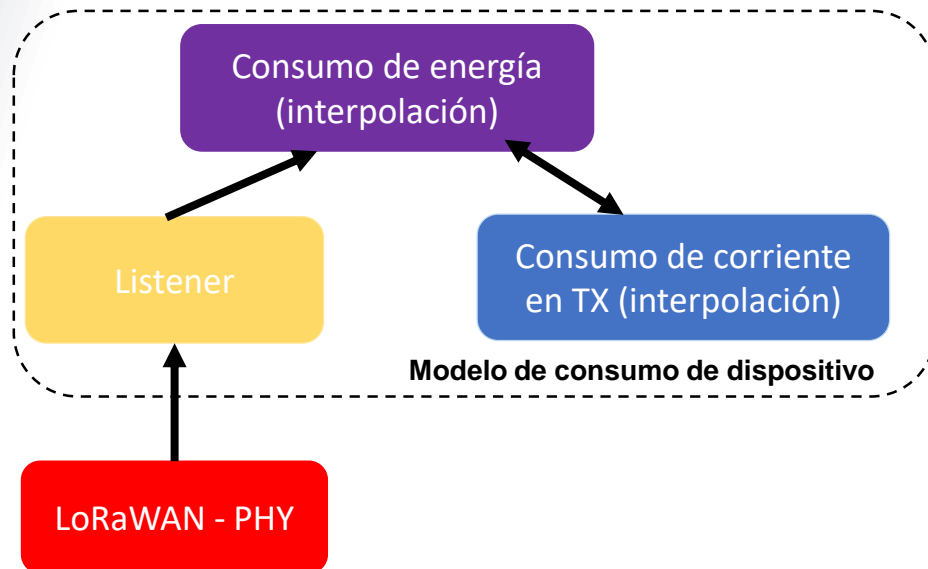
En el **modo de transmisión TX**, se lleva a cabo un modelo de cálculo de consumo de corriente en función de la potencia de transmisión, basado en **interpolación**.

Integración del modelo de energía

❑ Modelo de consumo de energía de dispositivo

• Diseño de software

Basado en la interconexión de diferentes submódulos derivados del *framework* de energía de NS-3, bajo los cuales se lleva a cabo el proceso de monitorización del **estado de operación** del dispositivo (*listener* de PHY de LoRa) y el **cálculo de energía asociada** (consumo de corriente y consumo de energía), proporcionando una serie de interfaces que proporcionan:

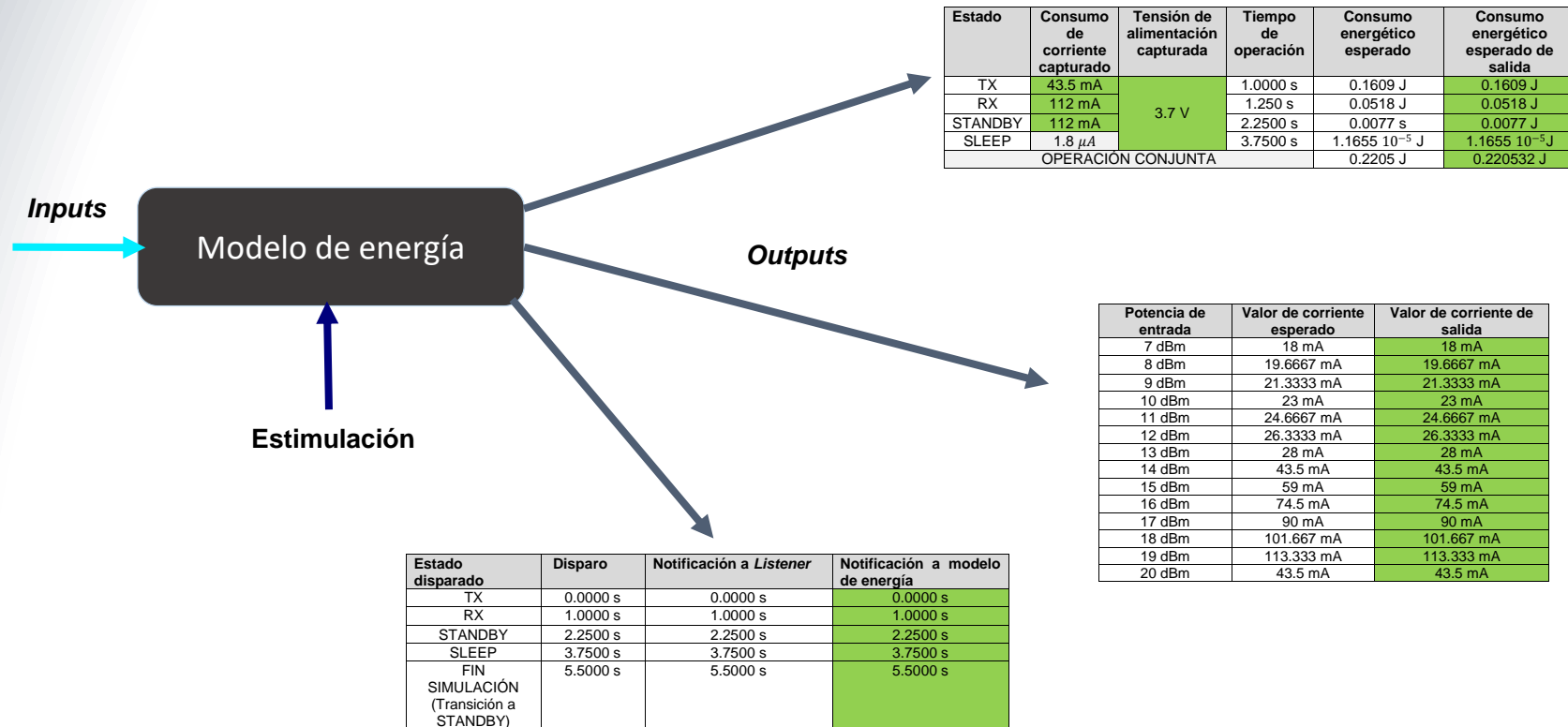


- Configuración de los parámetros de consumo del dispositivo.
- Tiempo de los diferentes modos de operación.
- Consumo total y consumo específico de los modos de operación.
- Acoplamiento con el modelo de fuente de energía.

Integración del modelo de energía

Proceso de validación

Con el fin de validar el modelo energético se lleva a cabo un protocolo de validación en el cual se estimula al modelo haciendo uso de una serie de entradas específicas para generar valores de salida y compararlos con los esperados:

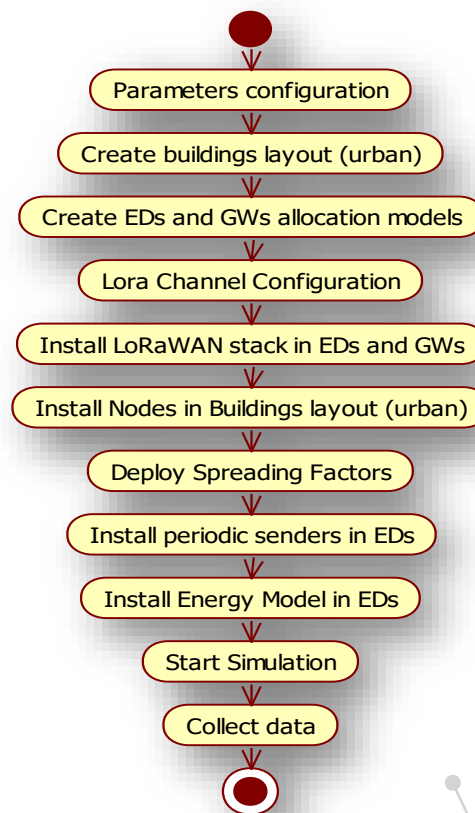


Escenarios

Para llevar a cabo la simulación del modelo de energía implementado se ha modelado un **escenario de área abierta (LOS)** y un **escenario urbano (NLOS)**, mediante los cuales:

- Se establecen unos parámetros de configuración:
 - **Topología.**
 - **Número de nodos.**
 - **Localización de nodos.**
 - **Frecuencia de envío de paquetes.**
- Se lleva a cabo una **captura de datos** a través de clases auxiliares implementadas específicamente para tal fin, que permiten comparar los resultados con una **métricas** establecidas.
- Se generan **scripts** de generación de gráficas mediante **GNUPlot** para llevar a cabo análisis de datos de alto nivel.

Proceso de despliegue de escenarios

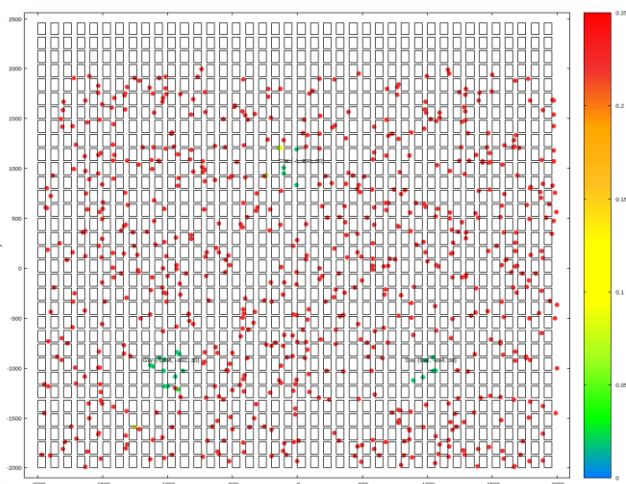
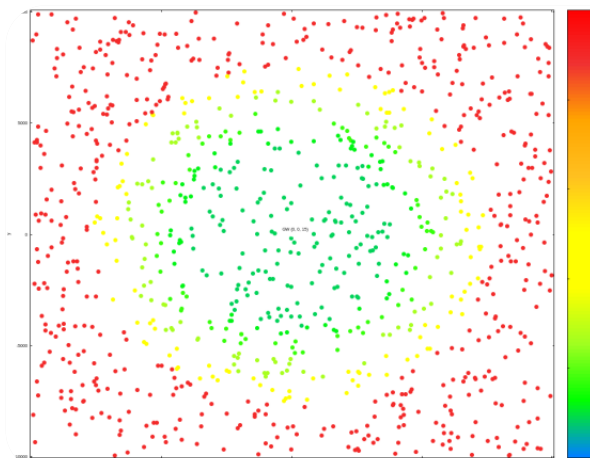


Escenarios

Parámetros de los escenarios simulados:

□ Escenario LOS

- Área abierta : 400 Km^2
- Altura ED : 1.5 m
- Altura GW: 15 m
- Topología estrella y “estrella de estrellas”
- Número de ED: 300 / 1000
- Ciclo de envío: 5 / 60 minutos.



□ Escenario NLOS

- Área cubierta de edificios: 16 Km^2
- Altura sensores
 - Exteriores [1.5 m, 5 m]
 - Interiores [0, 40 m]
- Altura GW: 30 m / 40 m
- Topología “estrella de estrellas”
- Número de ED: 700
- Ciclo de envío: 60 minutos.



Resultados

De los datos capturados en las simulaciones subyacen varios aspectos susceptibles de analizar, entre los cuales cabe destacar el **radio de eficiencia energética** y el **consumo de los dispositivos**.

□ Radio de eficiencia energética

Como cabe esperar, los escenarios **LOS** poseen un radio mayor de eficiencia energética dado que disponen de condiciones de propagación más favorables y por ende un mayor número de dispositivos que operan bajo **spreading factors** de menor valor asociados a un menor consumo.

Escenario	Radio de eficiencia energética
LOS – Estrella	5000 m
LOS – Estrella de estrellas	> 7500 m
NLOS – Localización externa de ED, altura variable [1.5m, 5m]	200 m
NLOS – Localización de ED en el interior de edificios, altura variable [0m, 40m]	> 200 m

Resultados

Consumo de los dispositivos

El consumo de los dispositivos ante ciclos de paquetes de envío de 5 y 60 minutos es mayor de lo que se indica en la literatura debido a las limitaciones de los escenarios simulados.

SF	Consumo diario [mAh]	Consumo anual [mAh]
7	0.0582	21.26
8	0.07308	26.6742
9	0.09702	35.4123
10	0.1388	50.6809
11	0.2344	85.5545
12	0.4253	155.2491

LOS, ciclo 60 minutos

SF	Consumo diario [mAh]	Consumo anual [mAh]
7	0.27702	101.1123
8	0.47306	172.6701
9	0.8312	303.4117
10	1.8018	657.6576
11	2.5428	928.1357
12	5.1985	1897.4817

LOS, ciclo 5 minutos

Estas limitaciones son ajenas al modelo de energía, y una vez subsanadas, el acoplo con el modelo será automático debido a la independencia de los modelos de energía y *stack* LoRaWAN, con un único punto de acoplo en la parte de bajo nivel (capa PHY)

Conclusiones

❑ Objetivos cumplidos de acuerdo al alcance inicial

- Contextualización del problema. Análisis de redes LPWAN y LoRaWAN.
- Estudio y manejo de NS-3.
- Análisis del módulo LoRaWAN en NS-3.
- Diseño e implementación del módulo de energía. Acoplo con el módulo LoRaWAN. Validación y métricas.
- Implementación y despliegue de escenarios. Análisis de resultados.

❑ Puntos a destacar

- Incidencias en los procesos de diseño y desarrollo de software que han requerido de una carga mucho mayor de la asumida inicialmente.
- Desviaciones en los datos de consumo debido a las limitaciones de los escenarios simulados.
- Lecciones aprendidas como consecuencia de las incidencias acontecidas en el desarrollo del TFM. A destacar la necesidad de un análisis en detalle de la infraestructura de base disponible.

❑ Líneas futuras

- Implementar la infraestructura necesaria para permitir transmisiones en el enlace descendente (DL) y subsanar con ello las limitaciones de medida de consumo en los escenarios.
- Agregar a la capa MAC los modelos de dispositivos de clase B y C.
- Estudio de la eficiencia bajo otros parámetros en la simulación de los diferentes escenarios.



Gracias por su atención.

Gabriel Dobato Ingalature
gdobato@uoc.edu
www.uoc.edu

