

INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONÁUTICO  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS



ENTORNOS INALÁMBRICOS

---

## Trabajos Prácticos

---

*Alumno:*

Luis Alberto GUANUCO  
Santiago Nicolás NOLASCO  
Sebastian AGÜERO  
Franco BOCALON

*Docentes:*

Víctor FRISON  
Julio ECHEVARRÍA  
José DUCLOUX

Septiembre 2016

## 1. Introducción

Se realizarán ejercitaciones sobre plataformas XBee con el objetivo de entender los *Entornos Inalámbricos*. Se trabajará con los modos *AT* y *API* a fin de comprar las ventajas y desventajas de estos. Estos ejemplos prácticos servirán, además, alcanzar la resolución del *Trabajo Final*.

### 1.1. Módulos XBee S2C

Para el establecimiento de una red basado en los estándares 802.15.4 se plantea como requisito la disponibilidad de módulos que implementen dicho estándar. En nuestro caso se utilizarán los módulos *XBee S2C*<sup>1</sup>. Las principales características de estos dispositivos son:

- Velocidades de datos
  - RF 250 Kbps
  - Comunicación serial hasta 1 Mbps
- Alcances
  - *Indoor* 60 metros
  - *Outdoor* 1200 metros
- Potencia de transmisión 3.1 mW (+5 dBm). En modo *Boost* 6.3 mW (+8 dBm)
- Sensibilidad de recepción -100 dBm. EN modo *Boost* -102 dBm
- Banda de frecuencia 2.4 GHz (16 canales)
- 15 puertos digitales I/O (4 entradas analógicas)
- Alimentación 2.1V a 3.6V. Consumos:
  - En la transmisión 33 mA @ 3.3 VDC. En modo *Boost* 45 mA
  - En la recepción 28 mA @ 3.3 VDC. En modo *Boost* 31 mA

Los puntos anteriores solo describen las principales características de los módulos XBee S2C. Para conocer más en detalle se puede acceder a la hoja de datos disponible en el sitio web del fabricante [1].

### 1.2. Plataformas adicionales

Se utilizará *hardware* adicional que permita establecer la comunicación de los módulos XBee con una computadora. Sí bien el Laboratorio de Sistemas embebidos pone a disposición las plataformas XBoard<sup>2</sup> se necesita adaptar la comunicación serial del módulo XBee con la computadora mediante un puerto USB. Para esto se desarrolló la placa *XBee-MCP Adapter* (Figura 1). Sobre esta placa se montarán dos módulos, una

---

<sup>1</sup><http://www.digi.com/support/productdetail?pid=4838>

<sup>2</sup><http://www.cika.com/soporte/Information/Digi-RF/XBee/>

es el módulo XBee y el otro es la placa *MCP2200 Breakout Module*<sup>3</sup>. Este último proporciona una comunicación serial USB-UART. Además se agregaron dos LEDs conectados a los puertos AD1/DI01 y AD2/DI02. Opcionalmente se puede conectar un potenciómetro al conector K1 que se encuentra mapeado al puerto analógico de la XBee, AD0/DI00.

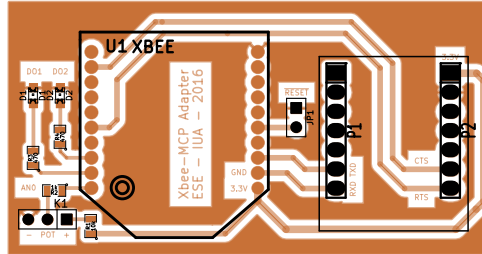


Figura 1: Placa XBee-MCP Adapter.

La Xboard, anteriormente mencionada, es una plataforma desarrollada por la empresa Cika Electrónica SRL. La XBoard permite interconectar los módulos XBee con dispositivos externos [2]. En la Figura 2 se presenta una vista superior de la XBoard. Se puede ver que esta placa tiene un conector hembra con las señales de comunicación serial, niveles de tensión y otras más. Para conectar la XBoard a una computadora se utiliza la placa MCP2200 Breakout Module. Al no requerir componentes externos, se utilizan simplemente cables que realicen la interconexión de las señales de comunicación serial.

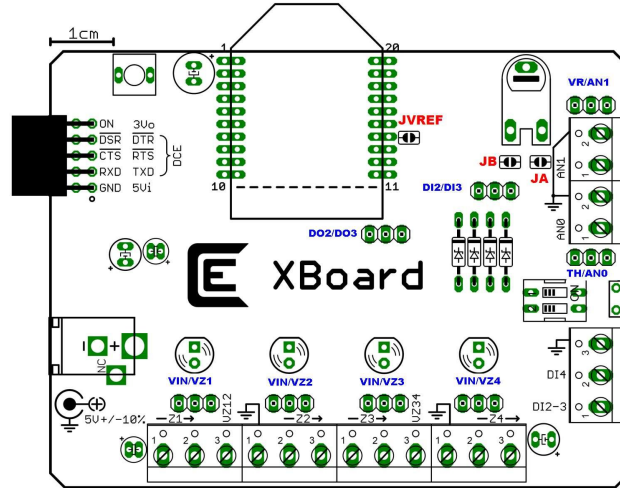


Figura 2: Placa XBoard.

Todas las características y configuraciones de las diferentes plataformas comerciales se encuentran en la bibliografía referenciada al final de este documento.

Se desarrollarán tres tipos de ejercitaciones. La primera sobre los alcances de RF que proporcionan estos dispositivos. La segunda parte sobre el manejo de los módulos en modo AT. Y por último se trabajará en modo API con los módulos sobre una red ZigBee

<sup>3</sup><http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=adm00393>

completa. Se documentarán todos las implementaciones y por último se presentará una conclusión sobre lo hecho.

## 2. Cálculo de enlace y modelos de propagación

El diseño de un radioenlace implica toda una serie de cálculos que pueden resultar sencillos o complicados, dependiendo de las características del sistema y del tipo de problema al que nos enfrentemos.

Es por ello que podemos dividir la propagación de la señal de acuerdo al entorno donde esta viaje:

- Espacios abiertos
- Entornos cerrados

### 2.1. Distancia máxima en espacios abiertos

La comunicación .outdoor.<sup>en</sup> este problema se asume en un entorno de propagación libre, donde no existen pérdidas atmosféricas, de polarización y de desadaptación de impedancias, es decir, operamos en regiones descubiertas.

Modo de funcionamiento	Normal	Boost
Potencia de Tx	+5dBm(3.1mW)	+8dBm(6.3mW)
Sensibilidad de Rx	-100dBm	-102dBm

Cuadro 1: Technical review Xbee ZB

Para los cálculos siguientes se tomarán los datos de funcionamiento en modo "Normal".

Partiendo de la ecuación de Friis

$$Pr = \frac{PtGtGr\lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

Siendo Pr (Potencia recibida), Pt(Potencia transmitida), Gt(Ganancia de antena tx), Gr(Ganancia de antena rx),  $\lambda$ (longitud de onda) y d(distancia radial entre antenas).

Podemos despejar la atenuación de espacio libre, también conocida como pérdida de trayectoria.

$$P_{Loss}[dB] = 94,4 + 20 \log_{10} d[Km] + 20 \log_{10} f[GHz] - Gt[dBi] - Gr[dBi]$$

Y de esta despejar la máxima distancia

$$d[Km] = 10^{\frac{P_{Loss} + Gt + Gr - 20 \log_{10} f - 92,4}{20}}$$

$P_{Loss} = Gt[dBm] - Gr[dBm] = +5dBm - (-100dBm) = 105dBm$   $f = 2,4[GHz]$  Las ganancias Gr[dBi] y Gt[dBi] se toman como valor cero por ser antenas omnidireccionales.

$$d[Km] = 10^{\frac{105dBm - 20 \log_{10} 2,4 - 92,4}{20}} = 1,77[Km] = 1770m$$

Con la máxima distancia  $d$  del radioenlace, calculamos la altura  $r$  de las antenas. Para ello nos valemos de las fórmulas del primer elipsoide de Fresnel, esto es determinando la zona libre de obstaculos.

$$r = F1(m) = 17,32 \sqrt{\frac{(d[Km]/2)^2}{d[Km]f[GHz]}} = 17,32 \sqrt{\frac{(1,77Km/2)^2}{1,77Km \cdot 2,4GHz}} = 7,43m$$

Por lo tanto la altura de las antenas, es decir para establecer una comunicación punto a punto a distancia máxima  $d = 1,77Km$  entre 2 XBee es de  $r = 7,43$  en la zona libre de obstaculos.

## 2.2. Distancia máxima en entornos cerrados

La propagación "indoor" difiere respecto a los sistemas "outdoor". Para asegurar una eficiente comunicación interior, la ITU a llevado una serie de propuestas para el caso de comunicaciones punto a punto. Debido a que en una comunicación en entornos cerrados esta muy influenciada por la geometría del lugar y los objetos en ella. Tanto estos objetos y la construcción de la misma, ocasionan pérdidas por reflexiones, dispersión y absorción de las señales RF.

Figura 3: Figure caption

### 2.2.1. Cálculo Planta alta

Para el cálculo de máxima distancia, como lo indica la figura. Nos valdremos de la fórmula de "path loss"

$$L_{Loss}[dB] = L_{do}[dB] + N \log_{10} d/do + Lf_n[dB]$$

Donde  $N$ (Coef. de pérdida),  $f$ (Frecuencia en Mhz),  $d$ (Distancia entre base y terminal),  $L_{do}$ (Pérdida a do),  $L_f$ (Atenuación través del piso),  $d0$ (distancia de ref=1m) y  $n$ (nro de pisos entre terminal y base). En nuestro caso particular al igual que en el caso anterior, calculamos la máxima atenuación:  $L_{Loss} = Gt - Gr = +5dBm - (-100dBm) = 105dBm$   $N = 28$  Por dato de tabla (Espacio residencial a 2.4GHz).  $L_{do} = 20 \log_{10} f[MHz] - 28 = 39,6dB$   $Lf_n = 0$  Por ser un mismo piso. Despejando  $d$

$$d[m] = 10^{\frac{L_{Loss}[dB] - L_{do}[dB] - Lf_n[dB]}{N}} d[m] = 10^{\frac{105dBm - 39,6dB - 0}{28}} = 216,62m$$

Entonces en un piso la distancia máxima de transmisión es  $d = 216,62m$

### 2.2.2. Cálculo de comunicación entre Planta alta y baja

En este caso la máxima distancia  $d$ , será influenciada por la atenuación del piso, como separación de los dos ambientes. Por lo tanto  $L_f[dB] = 5$  dado por el cuadro. La distancia máxima será.

$$d[m] = 10^{\frac{L_{Loss}[dB] - L_{do}[dB] - Lf_n[dB]}{N}} d[m] = 10^{\frac{105dBm - 39,6dB - 5}{28}} = 143,59m$$

Se puede notar aquí, que el valor de  $d$  distancia máxima es reducido por esta atenuación. Siendo el valor de  $d = 143,59m$  para comunicaciones entre dos pisos.

### 3. Ejercitación en modo AT

El set de comandos AT, también conocidos como set de comandos Hayes, fue originalmente desarrollado para usar con los modem de Hayes en la década de 1980. Muchos modems modernos todavía utilizan este estándar. EL término *comando AT* viene de usar los caracteres ASCII para notificar al *host* que un le sigue un comando.

En el caso de los módulos XBee desarrollados por Digi, implementa un set de comandos propietarios para interactuar con los módulos de Digi a través de una comunicación serial. Basado en el set de comandos AT, Dii usa los caracteres **AT** antes de cada comando enviado al modem. Un ejemplo de un comando utilizado por el radio Digi XBee podría ser **ATCH**. Este comando es usado para leer o setear el canal que un radio XBee es configurado[3].

#### 3.1. Configuración de puertos GPIO

La configuración de los diferentes canales de propósitos generales se puede realizar utilizando el software XCTU en modo gráfico pero el objetivo es realizarlo mediante el set de comandos AT.

##### 3.1.1. Comando ATIS

El comando **ATIS** fuerza la lectura de todos los canales habilitados. Analógicos como digitales. En nuestro caso tenemos la siguiente salida a la petición.

```
1  +++
2  OK
3  ATIS
4  01
5  0006
6  01
7  0000
8  0219
```

La respuesta que entrega el módulo comienza en la línea **4** hasta la **8**. El primer byte **01** es la cantidad de muestra recibidas. En la línea **5** se tiene configuración de los canales digitales y la línea **6** canales analógicos. Para entender se debe analizar a nivel de bits cada una de las respuestas. Recuerde que los valores representados están en hexadecimal. En el primer se tiene  $0006_{HEX} = 000000000000110_{BIN}$  por lo los canales **DI01** y **DI02** se encuentran habilitados y configurados como salidas digitales. Mientras que para los canales analógicos tenemos  $01_{HEX} = 0001_{BIN}$  solo el puerto **AD0** habilitado. Para terminar el análisis de la respuesta al comando **ATIS**, las líneas **7** y **8** son el estado de los canales digitales y analógicos respectivamente. Como se mencionó anteriormente, puede visualizarse la configuración de los canales de I/O en forma gráfica desde el software XCTU. En la Figura 4 se puede ver la misma información que proporciona el comando **ATIS**.

Para dar comienzo con la ejercitación pedida por los docentes, se deshabilitarán todos los canales de forma tal que el módulo quede sin ningún GPIO en uso. Sí la configuración es tal como la descrita anteriormente, se deben aplicar los comandos siguientes.



Figura 4: Configuración de los GPIO en modo gráfico.

```

1  +++OK
2  ATD00
3  OK
4  ATD10
5  OK
6  ATD20
7  OK
8  ATAC
9  OK
10 ATWR
11 OK
12 ATIS
13 ERROR

```

Para deshabilitar un canal digital/analógico se debe simplemente pasar como último argumento el valor 0. Esto se aplica a los canales DIO0, DIO1 y DIO2. Los comandos que le siguen son para aplicar los cambios y liberar los *buffers* (ATAC) y escribir la memoria no-volatil del módulo (ATWR). Al finalizar los cambios se envía el comando ATIS y se tiene como respuesta ERROR esto no se debe a un problema de comunicación sino que al no existir ningún canal habilitado, no puede ofrecer información alguna.

A continuación se presentan diferentes configuraciones sobre el módulo XBee montado en la placa XBoard.

### 3.1.2. Configurar canales analógicos

Código 1: Canales analógicos.

```

1  +++OK
2  ATD02
3  OK
4  ATD12
5  OK
6  ATAC
7  OK
8  ATWR
9  OK
10 ATIS
11 01
12 0000
13 03
14 0268
15 0208

```

En el código 1 se configuran los canales DIO0 y DIO1 como analógicos. El último parámetro define este comportamiento. Luego de guardar la configuración se envía el comando ATIS para tener la configuración final de todos los canales. Aquí se puede ver en la línea 13 no se tiene ningún canal digital. y en las líneas 15 y 16 se ven los valores de los ADC correspondientes a los canales DIO0 y DIO1.

### 3.1.3. Configurar canales digitales

En el caso del código 2 se configuran los canales DI02 y DI05 como salida. La elección de estos canales se debe al circuito implementado por la placa XBoard. El parámetro adicional en los comandos **3** y **5** es el estado digital que se le asignará. El número 4 aplica un valor *bajo* mientras que el valor 5 define un estado en *alto*. Al igual que en el caso anterior, el comando ATIS muestra los estados de los puertos habilitados, en este caso no tenemos entradas analógicas por lo tanto en la línea 14 tenemos 0.

El código 3 muestra la configuración de dos canales digitales de entrada. La diferencia con el caso anterior es el parámetro asignado. En las líneas **3** y **5** el parámetro es 3 que configura los canales DI02 y DI04 como entradas digitales.

Código 2: Dos salidas en alto.

```

1      +++OK
2      ATD25
3      OK
4      ATD55
5      OK
6      ATAC
7      OK
8      ATWR
9      OK
10     ATIS
11     01
12     0024
13     00
14     0024

```

Código 3: Dos entradas

```

1      +++OK
2      ATD23
3      OK
4      ATD43
5      OK
6      ATAC
7      OK
8      ATWR
9      OK
10     ATIS
11     01
12     0014
13     00
14     0014

```



### 3.1.4. Configuración combinada de la XBoard

Código 4: GPIO de la placa XBoard.

```
1    +++OK
2    ATD02
3    OK
4    ATD12
5    OK
6    ATD25
7    OK
8    ATD55
9    OK
10   ATD33
11   OK
12   ATD43
13   OK
14   ATAC
15   OK
16   ATWR
17   OK
18   ATIS
19   01
20   003C
21   02
22   003C
23   0264
```

Finalmente configuraremos la placa XBoard con todos los modos anteriormente vistos. Los comandos aplicados desde la línea **2** hasta la **12** ya fueron descritos. Como respuesta al comando **ATIS** se puede ver todos los canales digitales habilitados (**003C**). Mientras que se tiene dos canales analógicos **02** y sus respectivos valores en las líneas **22** y **23**.

## 4. Ejercitación en modo API

## 5. Enlaces entre módulos XBee

Ya se mostraron en las secciones anteriores las diferentes formas de manipular los módulos XBee. En esta sección se desarrollarán pruebas de enlace de los módulos. Las características de radio frecuencia no son objeto de estudio, se busca evaluar las virtudes en la red que implementa el estándar 802.15.4. Se utilizará la topología más sencilla del alcance de las redes Zigbee. Se implementará un *Coordinador* y los demás serán configurados como *Dispositivos finales*. En la Figura ?? se presenta una red de módulos XBee en las que se puede ver las diferentes roles que pueden asumir estos dispositivos. A parte de los dos modos anteriormente nombrados se puede configurar en modo *router* que permite extender la red.

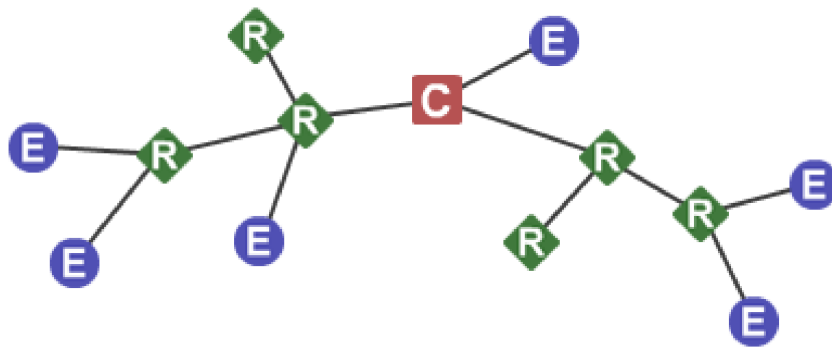


Figura 5: Red de módulos XBee con sus diferentes configuraciones.

### 5.1. Asignación de Identificador y Función de los módulos

Antes de comenzar con la configuración de la red, se definirá a uno de los módulos como coordinador y los demás como dispositivos finales. Además proporcionaremos un nombre para identificarlos a cada uno ellos. En la línea 4 del código 6 se habilita el modo coordinador y luego se asigna el nombre `COORDINADOR` al módulo (línea 8. Como en los casos anteriores, siempre se debe aplicar los cambios (`ATAC`) y finalmente escribir en la memoria no-volatil (`ATWR`).

Código 5: Obtención del *seral number*.

```

1  +++OK
2  ATCE
3  0
4  ATCE1
5  OK
6  ATCE
7  1
8  ATNICOORDINADOR
9  OK
10 ATNI
11 COORDINADOR
12 ATAC

```

```

13 OK
14 ATWR
15 OK

```

## 5.2. Configuración de la red de área personal

Las redes ZigBee se las llaman PANs (*Personal Area Networks*). Cada red es definida con un único identificador PAN, por lo que todos los dispositivos que quieran pertenecer a la red deben tener el mismo ID PAN.

ZigBee soporta tanto PAN ID de 16 a 64 bits. Ambos PAN IDs son utilizados como único identificador de la red. Los dispositivos que quieran integrar la misma red deberán compartir el mismo PAN IDs.

En el código ?? se asigna el PAN ID 260816 al módulo coordinador y será el mismo que utilizarán los demás dispositivos para conectarse a la red ZigBee. En la línea 2 se solicita el actual PAN ID y el módulo responde 0. Luego se aplica el identificador 260816, se utilizan solo 24 de los 64 bits disponibles.

Código 6: Obtención del *serial number*.

```

1 +++OK
2 ATID
3 0
4 ATID260816
5 OK
6 ATID
7 260816
8 ATAC
9 OK
10 ATWR
11 OK

```

## 5.3. Número de serie (identificador) los módulos

Cada módulo XBee tiene un número de serie de 64 bits (*extended address*) grabado en el *hardware* por el fabricante<sup>4</sup>. Mediante los comandos AT se puede obtener esta dirección en dos partes. Los comandos ATSH y ATSL devuelven la parte alta y baja respectivamente. Estos valores se utilizan para la configuración de la red Zigbee (junto a los valores de los demás módulos). En el código 7 se muestra cómo obtener el número de serie del dispositivo al que se encuentra conectado el terminal serial.

Código 7: Obtener el *serial number* del módulo XBee

```

1 +++OK
2 ATSH
3 13A200
4 ATSL
5 41257816

```

---

<sup>4</sup>Recuerde que también los XBee tienen un direccionamiento de 16 bits. Para mayor información ver la bibliografía.

## 5.4. Configuración de direccionamiento de los dispositivos en una red ZigBee

En la sección anterior se mostró como obtener las identificaciones de cada módulo. Esta información se utiliza para mapear la red a implementar. Se recuerda que la topología utilizada en estos prácticos, se tendrá un coordinador y varios dispositivos finales que proporcionarán información al primero. En este caso el coordinador configura su dirección de destino al único (por el momento) dispositivo conectado, código 8. Se cargan la parte alta (ATDH13A200) y la baja (ATDL4125768A) con los valores propios del dispositivo final al que se conectará el coordinador. En forma recíproca se debe cargar el identificador del coordinador como dirección de destino del único dispositivo final conectado a la red. Esto último se muestra en el código 9. Para mejor entendimiento de los códigos de configuración se solicita antes a los módulos responder el nombre que identifica a los módulos y sus respectivos números de serie. Al final se guardan todos los cambios realizados.

Código 8: Destino del coordinador.

```

1  +++OK
2  ATNI
3  COORDINADOR
4  ATSH
5  13A200
6  ATSL
7  41257816
8  ATDH13A200
9  OK
10 ATDL4125768A
11 OK
12 ATAC
13 OK
14 ATWR
15 OK

```

Código 9: Destino del coordinador.

```

1  +++OK
2  ATNI
3  DISPOSITIVO1
4  ATSH
5  13A200
6  ATSL
7  4125768A
8  ATDH13A200
9  OK
10 ATDL41257816
11 OK
12 ATAC
13 OK
14 ATWR
15 OK

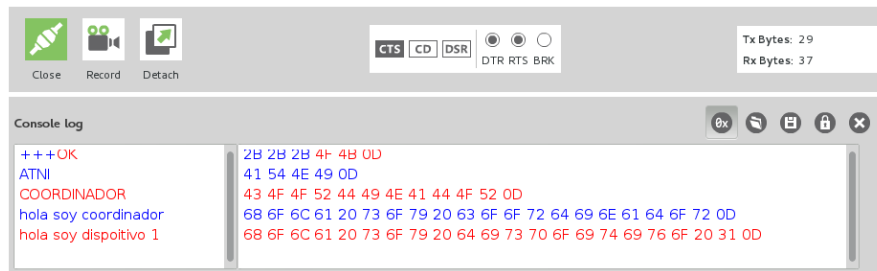
```

## 5.5. Comunicación entre computadoras mediante módulos XBee

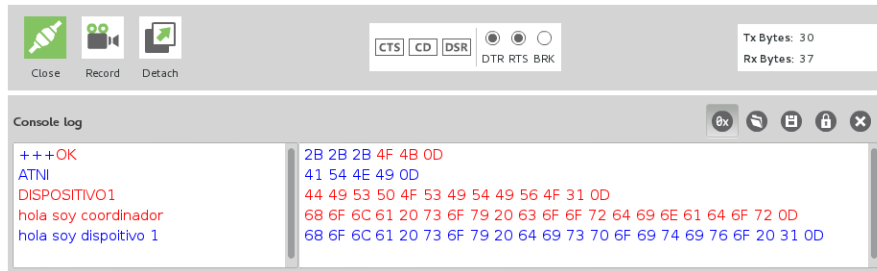
Con los módulos configurados anteriormente para establecer una comunicación punto a punto, se probará el enlace entre los módulos comunicando ambos módulos entre sí mediante un terminal de computadora. Es decir, se utilizarán dos computadoras conectando sus respectivos puertos seriales (RS232) a cada módulo XBee ya configurados. A continuación se presentan las capturas de pantalla de dos terminales. En la Figura 6a se muestran la consola de XCTU del coordinador. Mientras que en la Figura 6b se ven los mensajes recibidos desde el terminal del dispositivo conectado a la red ZigBee (DISPOSITIVO 1).

## 6. Control remoto de los módulos XBee

En modo API las opciones



(a) Consola con el módulo coordinador.



(b) Consola con el módulo conectado a la red.

Figura 6: Captura de pantalla de las consolas utilizando XCTU.

## 7. Conclusiones

La implementación de este RTOS tan específico y novedoso, por lo menos para nosotros, nos ha permitido ampliar la concepción de sistemas operativos en tiempo real. A la vez que se ha podido interactuar con profesionales de la región que están en pleno desarrollo y aportes para mejorar el código utilizado (freeOSEK).

## Referencias

- [1] Digi International, *XBee®/XBee-PRO ZigBee® RF Module – User Guide*. 2016.
- [2] Cika Electrónica SRL., *XBoard [-W]*. [http://www.cika.com/soporte/Information/Digi-RF/XBee/XBoard\\_doc.pdf](http://www.cika.com/soporte/Information/Digi-RF/XBee/XBoard_doc.pdf).
- [3] Digi International, *Knowledge Base – The AT Command Set*. [http://knowledge.digi.com/articles/Knowledge\\_Base\\_Article/The-AT-Command-Set](http://knowledge.digi.com/articles/Knowledge_Base_Article/The-AT-Command-Set).