

# Utilización de Buildroot para la enseñanza de Linux Empotrado: Experiencia en asignaturas de grado y postgrado

Mariano Ruiz, Antonio Carpeño, Eduardo Juárez, Juan Manuel López  
Dpto. Sistemas Electrónicos y de Control  
Universidad Politécnica de Madrid  
Madrid  
mariano.ruiz@upm.es

**Resumen**—La utilización de Linux como sistema operativo (SO) para sistemas electrónicos empotrados es cada vez más amplia. Una parte muy importante de los sistemas electrónicos e instrumentos que se comercializan hoy en día están basados en la utilización de algún procesador de propósito general que utiliza Linux. Los programas de las titulaciones de Grado y Postgrado relacionadas con la tecnología electrónica deben de considerar y reflejar el ciclo de desarrollo de aplicaciones con este tipo de tecnologías. Su aplicación en el ámbito educativo no es sencilla por la dificultad inherente del uso de Linux como sistema operativo debido a la gran variedad de herramientas y repositorios que se utilizan para su integración en un sistema electrónico. En este trabajo se presenta una propuesta de contenidos y de prácticas que se está utilizando en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIST).

**Palabras clave**—Linux Empotrado; Buildroot; BeagleBoard

## I. INTRODUCCIÓN

La integración de una distribución de Linux y su optimización para una aplicación concreta se ha convertido en una actividad casi esencial en el desarrollo de productos y sistemas electrónicos embebidos. A nivel académico está ampliamente extendido como herramienta de trabajo para el desarrollo de proyectos [1] [2]. La tendencia actual a utilizar Systems On Chip (SoCs), microcontroladores de 32 bits y FPGAs con procesadores empotrados, para la implementación de aplicaciones, está haciendo que proliferen diferentes herramientas con múltiples versiones que tienen como objetivo común ejecutar aplicaciones que utilizan los recursos que proporciona el núcleo de Linux. La ejecución de una aplicación sobre Linux requiere que el hardware se configure de manera adecuada con la ayuda de los siguientes elementos:

- Un cargador básico (bootloader) que permita cargar una imagen del núcleo del sistema operativo.
- Un núcleo del sistema operativo configurado para la plataforma hardware en uso.

- Un sistema de ficheros adecuado también a los recursos hardware disponibles en el sistema electrónico embebido.
- El conjunto de aplicaciones software que se ejecutarán en la plataforma entre las que se deben incluir los comandos, procesos y scripts esenciales de Linux, más las aplicaciones concretas desarrolladas por el usuario.

Hoy en día se pueden encontrar diferentes entornos de trabajo que permiten generar estos elementos. Su construcción necesita de múltiples herramientas y ficheros fuentes que adecuadamente combinados permitirán construir un sistema que funcione correctamente. El conjunto de todos estos recursos se han agrupado en entornos que están soportados por comunidades libres o por compañías que preparan distribuciones ajustadas, prestando servicios de consultoría, formación, soporte, etc, para ayudar, con el coste económico correspondiente, a los usuarios. Entre las primeras está el conjunto de utilidades incluidas en las herramientas Buildroot o Yocto y entre las segundas podemos destacar casos como MontaVista, Wind River o TimeSys. La solución adoptada en la ETSIST utiliza la herramienta de software libre Buildroot [3] y como plataforma hardware, la tarjeta BeagleBoard basada en un procesador ARM (ver Figura 1). La premisa fundamental a la hora de seleccionar qué herramienta software utilizar ha sido identificar aquella con una mayor capacidad para simplificar el proceso de generación de todos los elementos necesarios para integrar Linux, en el mayor número posible de plataformas hardware. La proliferación de entornos y aplicaciones necesarias para construir los distintos elementos que aparecen en una distribución empotrada del sistema operativo Linux – cargador (se utiliza el termino bootloader), núcleo, *device tree* o descripción del hardware, sistema de ficheros, drivers, etc. - hace que esta tarea sea bastante compleja si no se cuenta con una herramienta que permita automatizar este proceso y estandarizar los procedimientos para las distintas opciones tecnológicas disponibles -microcontroladores, SoCs y FPGAs-.

Buildroot es un entorno de trabajo, que una vez instalado sobre un ordenador con Linux, proporciona la posibilidad de descargar de los repositorios de internet todo el código fuente necesario, para la arquitectura seleccionada.

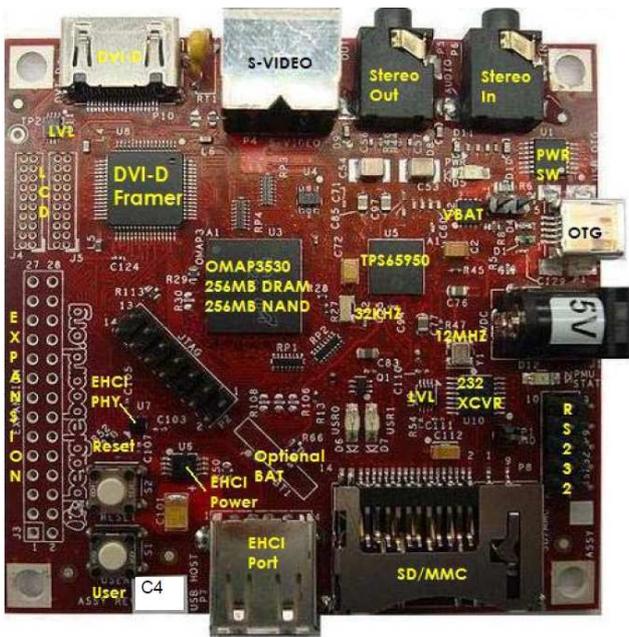


Fig. 1. Tarjeta Beagleboard.

## II. FUNCIONALIDADES BÁSICAS DE BUILDROOT COMO HERRAMIENTA PARA GENERAR UNA DISTRIBUCIÓN DE LINUX EMPOTRADA

La herramienta Buildroot contiene un conjunto de utilidades que permiten generar las imágenes necesarias para ejecutar el sistema operativo Linux en una plataforma empotrada. Todas las utilidades y herramientas de Buildroot se configuran mediante una herramienta con interfaces en modo texto o gráfico. Mediante ésta configuración el usuario puede elegir la arquitectura del procesador, las herramientas de compilación cruzada, las herramientas software a incluir en la distribución, el cargador de Linux a utilizar y los elementos que se incluirán dentro del núcleo de Linux. Una vez realizada esta configuración Buildroot se encarga de realizar la conexión a internet y descargar los paquetes necesarios en el ordenador. De ésta manera el usuario evita uno de los problemas habituales que consiste en localizar las diferentes piezas que componen una solución como ésta. Esto es fundamental para desarrollar las prácticas con los alumnos puesto que se puede acotar los elementos software a utilizar y sobre todo las versiones y las dependencias existentes entre ellos. A grandes rasgos, los elementos que se pueden configurar en Buildroot son:

- La arquitectura del procesador y sus diferentes variantes y modelos.
- El compilador cruzado y las herramientas asociadas para poder compilar el código de todas las aplicaciones y generar el código objeto para la arquitectura seleccionada. A este elemento se le denomina *toolchain*.
- La configuración básica del sistema operativo Linux que se ejecutará en el sistema electrónico (denominado

Target). Esta configuración incluye detalles esenciales como la gestión a utilizar para crear el directorio /dev, el proceso init a utilizar (el proporcionado por Busybox a el de systemV), el esqueleto básico de carpetas y la configuración del proceso que atenderá el terminal por defecto.

- Los paquetes software que incluirá la distribución a utilizar. Por ejemplo, se puede configurar incluir un entorno gráfico X Windows, librerías de compresión, utilidades de red como el ftp, el ssh, etc.
- Las utilidades adicionales a instalar en el ordenador que generalmente se utilizan para construir el sistema de ficheros del target en distintos formatos.
- Las herramientas para configurar el tipo del sistema de ficheros (por ejemplo: ext2, ext3, ext4) y su método de compresión para el target.
- El cargador a utilizar para poder lanzar el núcleo de Linux. Por ejemplo se puede configurar la utilización de uboot como cargador de la imagen del sistema operativo.
- La configuración del núcleo, su versión y el formato de la imagen a generar. La configuración por defecto es extremadamente importante porque incluye las características específicas para un target concreto. En general se puede encontrar una configuración por defecto para un hardware determinado. Suele ser el fabricante del hardware o la comunidad que lo soporta quien proporciona esta configuración.

## III. UTILIZACIÓN DE LINUX EMPOTRADO EN LOS PROGRAMAS DE GRADO.

La herramienta Buildroot se utiliza en una asignatura de grado, denominada Ingeniería de Sistemas Electrónicos que tiene 4,5 ECTS. Esta asignatura está ubicada en el octavo semestre del Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones. Los primeros 3.5 créditos ECTS están dedicados al desarrollo de aplicaciones con microcontroladores de propósito general. Las aplicaciones a desarrollar y las actividades realizadas consisten tanto en el desarrollo del hardware como del software así como su posterior integración para cumplir con los requisitos especificados. Las actividades que se desarrollan en el último crédito ECTS del curso se corresponden con la introducción al uso del sistema operativo Linux empotrado sobre la plataforma BeagleBoard. Las actividades que se realizan en este periodo se presentan en la TABLA I:

TABLA I DISTRIBUCIÓN DE ACTIVIDADES

| Tipo de Actividad               | Horas asignadas | Créditos ECTS |
|---------------------------------|-----------------|---------------|
| Clase magistral                 | 6 horas         | 0,22          |
| Estudio de casos                | 3 horas         | 0,11          |
| Aprendizaje basado en proyectos | 12 horas        | 0,44          |

| Tipo de Actividad       | Horas asignadas | Créditos ECTS |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| Elaboracion de informes | 6 horas         | 0,22          |

El objetivo de las 6 horas de las clases magistrales es presentar el ciclo básico de puesta en marcha del Linux empotrado en la plataforma hardware BeagleBoard utilizando Buildroot. Es esencial en ésta parte describir todos los conceptos que hay detrás de cada uno de los elementos que componen esta herramienta. De manera detallada en las 6 horas de clase se cubren los siguientes puntos [4]:

- Descripción básica de la plataforma hardware BeagleBoard [5].
- Descripción del concepto de Linux empotrado y ejemplos básicos de equipos y productos que lo incluyen.
- Descripción del concepto de herramientas de compilación cruzada (toolchain). En este punto es esencial revisar el concepto de cómo las aplicaciones desarrolladas en Linux se basan en el uso de librerías y de cómo éstas interactúan con el núcleo.
- Descripción de uClibc.
- Descripción de la secuencia de arranque de un sistema. Tipos de bootloaders. Descripción de la función del X-Loader y del U-boot.
- Descripción básica del concepto de Núcleo en Linux, sus características esenciales, como está organizado, dónde están el código fuente disponible, cómo se configura y cómo se compila (tanto de manera nativa como cruzada).
- Descripción del concepto de módulo núcleo. Ventajas de uso.
- Descripción del sistema de ficheros root. Características de los sistemas de ficheros /dev y /proc.
- Descripción de Busybox y la ventaja que supone usarlo en Linux empotrado. Configuración e inclusión en Linux empotrado.
- Descripción de los sistemas básicos de ficheros utilizados en Linux. Descripción del tipo de sistemas que se utilizan habitualmente y que se soportan sobre tarjetas SD/MMC o memorias Flash.
- Presentación de Buildroot, descripción de los pasos necesarios para configurar Buildroot y la relación que tiene con los elementos presentados anteriormente.

Una vez presentados todos estos conceptos de una manera básica se procede a demostrar cómo funciona una aplicación real sobre la tarjeta BeagleBoard. Sobre el sistema que está ejecutando Linux se identifican todos los elementos anteriores para que el alumno tome contacto y relacione los aspectos presentados en las clases magistrales con el funcionamiento de una aplicación real.

Finalizadas estas dos actividades se procede a comenzar la tercera que consiste en realizar el proceso completo de integración del Linux usando Buildroot en la tarjeta BeagleBoard (ver Figura 2). El punto de partida es un documento que guía al alumno en el proceso de configuración de Buildroot para acometer la configuración y puesta en marcha y además le orienta sobre cómo resolver los problemas típicos que pueden presentarse durante la realización de este proceso [6]. También se le proporciona una máquina virtual con sistema operativo Ubuntu 12.03 LTS que incluye todas las herramientas necesarias. Los pasos principales que se realizan son:

1. Descarga y configuración de Buildroot. La configuración se realiza a partir de una configuración descrita en el documento que se les proporciona.
2. Descarga de internet de todos los componentes, compilación y generación de las imágenes de salida.
3. Análisis de las imágenes generadas.
4. Arranque de la tarjeta BeagleBoard.
5. Configuración de los parámetros de arranque de u-boot para el núcleo de Linux.
6. Login en Linux.

La ejecución de estos pasos se completa con la realización de otras actividades que consisten en:

1. Compilar una aplicación sencilla en el host utilizando el compilador cruzado.
2. Configurar la utilización de una segunda línea serie.
3. Configurar el uso de un interfaz USB-Ethernet para dotar a la tarjeta BeagleBoard de conectividad. Esta interfaz es un módulo comercial que se pone a disposición de los alumnos.
4. Configurar el entorno Eclipse en el ordenador y depurar utilizando las herramientas de depuración de GNU (gdb and gdbserver).

Por último el alumno debe preparar un informe dónde explique los distintos pasos que ha seguido para conseguir que el Linux empotrado y una aplicación sencilla funcione sobre la plataforma BeagleBoard

#### IV. UTILIZACIÓN EN EL PROGRAMA DE POSGRADO.

La ETSIST tiene en la actualidad un postgrado *en Ingeniería de Sistemas y Servicios para la Sociedad de la Información* que ofrece una formación tanto de máster como de doctorado. La enseñanza de las tres tecnologías utilizadas para el desarrollo de sistemas empotrados - procesadores de propósito general (GPP), procesadores digitales de señal (DSP) y FPGAs - se ha repartido en dos asignaturas. Mientras que en la formación de máster, una de ellas es obligatoria, y la otra optativa, en la de doctorado ambas son optativas.

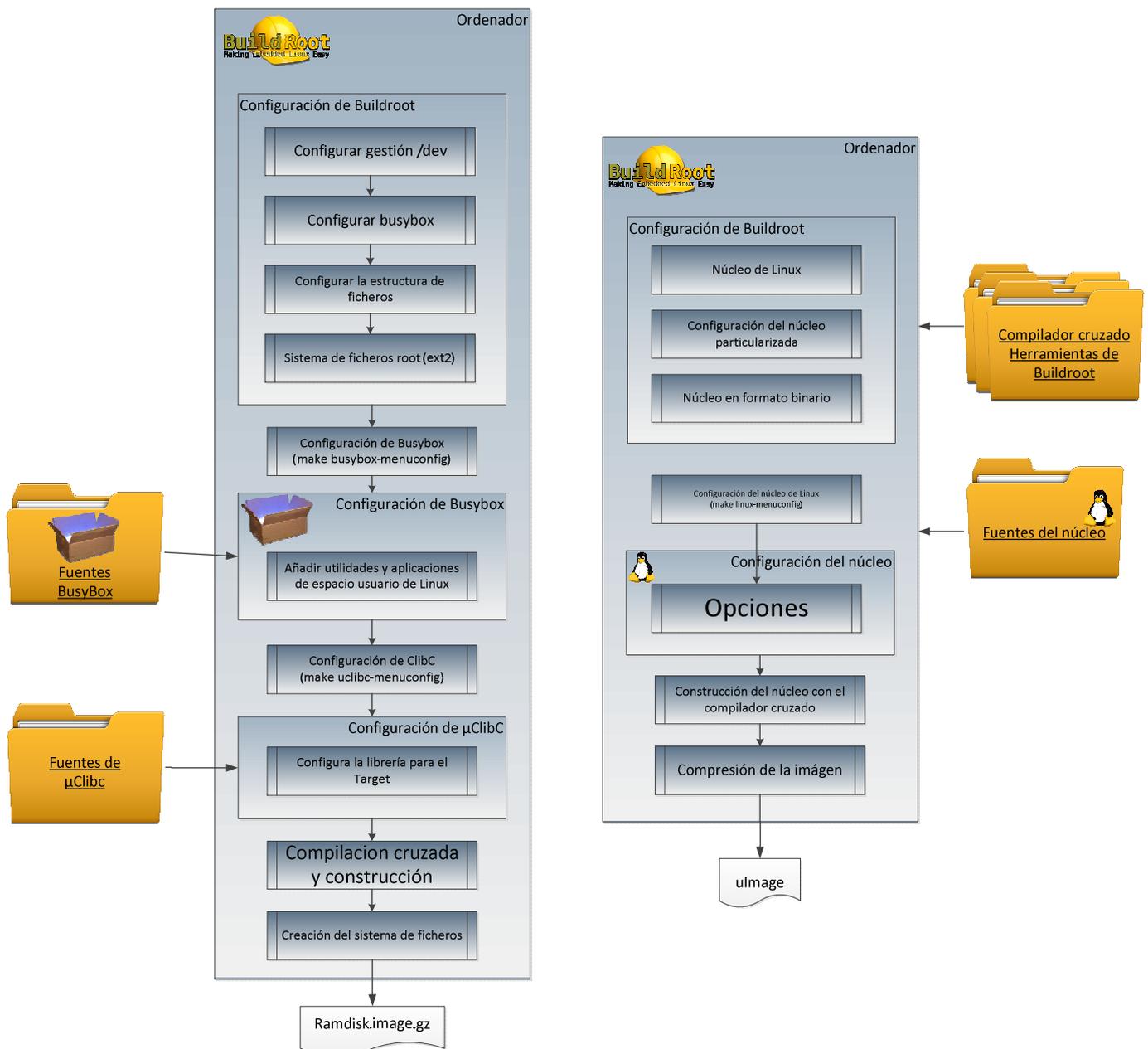


Fig. 2. Esquemización de los pasos a ejecutar utilizando Buildroot para construir el sistema operativo Linux.

En la asignatura obligatoria, la primera de la serie, denominada Arquitecturas Digitales Avanzadas, de los 5 ECTS asignados, 3 ECTS se dedican a introducir las características generales que diferencian los sistemas empotrados, a explicar la arquitectura del procesador ARM Cortex-A8 de la tarjeta BeagleBoard, a exponer los conceptos fundamentales de los sistemas operativos empotrados así como a revisar los diferentes elementos que componen una distribución de Linux empotrado. Estas actividades relacionadas con la adquisición de conceptos básicos se complementan con una actividad de desarrollo de habilidades

en la que se guía a los estudiantes para que generen una distribución del Linux empotrado mediante Buildroot con el objeto de que el núcleo del sistema operativo monte tanto un sistema de ficheros utilizando una partición de la tarjeta SD/MMC como la memoria RAM de la BeagleBoard. En versiones anteriores del curso, el desarrollo de estas habilidades se hacía compilando cada componente por separado sin la ayuda de Buildroot. La experiencia nos ha mostrado que el uso de la herramienta Buildroot mejora la comprensión del proceso global. Los otros dos créditos ECTS de esta asignatura están dedicados al estudio de las

características básicas de los procesadores digitales de señal. En este caso se aprovecha el hecho de que el OMAP3530 incluye un procesador DSP 64x+. El uso de este procesador requiere utilizar aplicaciones que se ejecutan en espacio de usuario en el Linux que se ejecuta en el ARM. La última actividad del curso está orientada a desarrollar una aplicación en C en la que el alumno utiliza los dos procesadores disponibles en el OMAP3530. Para ello se introduce al estudiante los conceptos básicos relacionados con la herramienta DSPLink. Esta aplicación permite conectar ambos procesadores y demostrar a los estudiantes cómo se puede abordar aplicaciones complejas utilizando un procesador de propósito general y un DSP.

## V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

El objetivo de la experiencia puesta en marcha en el curso 2012-2013 no era otro que intentar acercar a los estudiantes el uso de un conjunto de herramientas cada vez más extendidas en la industria. La experiencia se ha mostrado muy positiva tanto en el caso del grado como del posgrado. En el primero, utilizando un periodo de carga de trabajo de 1 ECTS, se consigue obtener una primera aproximación al uso de Linux empotrado de una manera muy guiada y que tiene como resultado de aprendizaje poner en marcha un sistema en un hardware determinado. La experiencia permite afirmar que los alumnos son capaces de identificar las características esenciales de cada uno de los bloques implicados en la construcción de una distribución del sistema operativo Linux creada a medida. En el curso 2012-2013, el primero de la promoción del Grado en Ingeniería en Electrónica de Comunicaciones, el total de alumnos matriculados completó el total de las actividades propuestas en un tiempo medio de 25 horas (en la Universidad Politécnica de Madrid 1 ECTS se ha definido con 27 horas). La nota media obtenida en la evaluación fue de 7 puntos. Ésta se realizó en base a comprobar el funcionamiento de la imagen de Linux obtenida (mensajes de error al arrancar, periféricos detectados, conexión a la red, funcionamiento de la depuración cruzada) y del análisis del informe realizado por los alumnos en el que se detallaban todos los pasos y pruebas realizadas.

En el caso del posgrado los resultados obtenidos son muy similares a los del grado. El total de alumnos matriculados, siete en este caso, completaron las actividades en un tiempo medio similar al programado. La experiencia también permite afirmar que los alumnos identifican la funcionalidad y las características, ya con más detalle, de todos los elementos necesarios para poner en marcha una distribución de Linux y cómo se pueden desarrollar aplicaciones sencillas.

Las conclusiones más importantes que se han extraído de la utilización de Buildroot son:

- Sistematización y estandarización de tareas de generación del sistema operativo Linux empotrado con un elevado grado de automatización que reduce el riesgo de realizar las operaciones de manera incorrecta. El uso de Buildroot sistematiza la generación de los diferentes elementos acortando el tiempo de puesta en marcha de aplicaciones sobre hardware en comparación con otras herramientas como OpenEmbedded o Yocto.
- Uso de la misma herramienta para diferentes plataformas hardware. Por ejemplo, las modificaciones para hacer que Buildroot genere una imagen que se pueda ejecutar sobre la plataforma Zedboard [7] (basada en Zynq de Xilinx) o sobre la Sockit (basada en Cyclone V SoC de Altera) son bastante reducidas [8].
- El número de horas necesario para generar una imagen de un target concreto es de 8.
- Simplificación en el manejo de las herramientas para, descargar, configurar, compilar, etc.
- Versatilidad y potencia de la distribución de Linux que se puede generar que permite abordar aplicaciones muy variadas.

## REFERENCIAS

- [1] A. García y A. Barriga, (2012) "Curso práctico de sistemas empotrados basado en placas de desarrollo XUPV2P", IEEE-RITA Vol. 7, Núm. 4, Nov 2012, pp 231-237
- [2] M. Rodriguez, M. Gutierrez, A. Cardell, A. Ayala, J. J. Diaz, C. Sobota, E. Magdaleno(2010) "Web server empotrado en FPGA para monitorización de una red de sensores inalámbricos", Congreso TAEE Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica 2010
- [3] Buildroot. <http://buildroot.uclibc.org/>
- [4] Free electrons. "Embedded Linux system development course". Slides at <http://free-electrons.com/doc/training/embedded-linux/>
- [5] BeagleBoard organization. "Beagleboard reference" <http://elinux.org/BeagleBoard>.
- [6] M. Ruiz. "Using Buildroot for building Embedded Linux Systems". Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/14930/>
- [7] A. Bustos. "Development of embeddedLinux applications using ZedBoard". Proyecto Final de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid. <http://oa.upm.es/21488/>
- [8] Steven Kravatsky. "Using Yocto on the Sockit platform". <http://www.rocketboards.org/foswiki/Documentation/GSRDGettingStart edYoctoCopyArrowSoCKitEdition>