



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Grado en Ingeniería Informática



**TFM del Máster Universitario en
Ingeniería Informática**

**Comunicación TCP/IP con
sistemas empotrados**



Presentado por RPC
en Universidad de Burgos — 31 de enero
de 2019
Tutor: AMG



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Grado en Ingeniería Informática



D. tutor, profesor del Departamento de Ingeniería Electromecánica, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Expone:

Que el alumno D. RPC, con DNI 12345678Z, ha realizado el Trabajo final de Máster Universitario en Ingeniería Informática titulado Comunicación TCP/IP con sistemas empotrados.

Y que dicho trabajo ha sido realizado por el alumno bajo la dirección del que suscribe, en virtud de lo cual se autoriza su presentación y defensa.

En Burgos, 31 de enero de 2019

Vº. Bº. del Tutor:

D. AMG

Resumen

Las placas de desarrollo facilitan el estudio y desarrollo de sistemas empuotrados. Un sistema empuotrado conectado a una red de comunicaciones de datos obtiene una nueva vía de interacción con otros sistemas, ya sean empuotrados o convencionales. Un sistema empuotrado conectado permite interactuar de forma remota con él, pudiendo realizar entre otras operaciones la consulta de sus sensores o la activación de sus actuadores.

En este proyecto se muestra como conectar una placa de desarrollo FRDM-K64F a una red de área local usando el conjunto de protocolos TCP/IP. Aprovechando tanto el *hardware* del que dispone la placa como del *hardware* conectado a ella, se ejemplifica la interacción con algunos de sus dispositivos a través de una aplicación web. Como dispositivos configurados para su uso remoto se encuentran el led integrado en la placa, una pantalla LCD y una placa de expansión.

Descriptores

Sistemas embebidos, placa desarrollo, familia de protocolos de internet, aplicación web.

Abstract

Development boards facilitate the study and development of embedded systems. An embedded systems connected to a data network obtains a new way of interaction with other systems, whether embedded or conventional. A connected embedded system allows to interact remotely with it, being able to carry out, among other operations, the query of its sensors or the activation of its actuators.

This project shows how to connect a FRDM-K64F development board to a local area network using the TCP / IP protocol suite. Taking advantage of both the hardware available on the board and the hardware connected to it, the interaction with some of its devices is exemplified through a web application. As devices configured for remote use are the LED integrated in the board, an LCD screen and an expansion board.

Keywords

Embedded systems, development board, Internet protocol suite, web application.

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
Introducción	1
1.1. Estructura de la memoria	2
1.2. Anexos a la memoria	3
1.3. Contenido adjunto	4
Objetivos del proyecto	5
2.1. Objetivos generales	5
2.2. Objetivos técnicos	5
2.3. Objetivos personales	6
Conceptos teóricos	7
3.1. Sistemas empotrados	7
Técnicas y herramientas	13
Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto	15
Trabajos relacionados	17
Conclusiones y Líneas de trabajo futuras	19
Bibliografía	21

Índice de figuras

3.1. Ejemplo de integración de SE. [2]	8
3.2. Diagrama de bloques del HW de un SE	10
3.3. Digrama de bloques del SW de un SE	11

Índice de tablas

Introducción

Los sistemas empotrados o embebidos (SE) son sistemas diseñados para realiza una función específica y, por tanto, solo realizan una o unas pocas tareas concretas. Este hecho les diferencia de otros sistemas de propósito general como son los ordenadores o teléfonos móviles, que son capaces de realizar multitud de tareas de diferente naturaleza.

Como el propio nombre de los SE indica, este tipo de sistemas se suele encontrar integrado en otros sistemas eléctricos o mecánicos de mayor envergadura y que se encargan de controlar. Por esta razón, se requiere que los SE cuenten con ciertas características como son un tamaño reducido, un bajo consumo o un bajo coste. Requisitos que a su vez provocan nuevas características como la menor potencia de cálculo en comparación con otro tipo de sistemas. Además, en función de las condiciones ambientales donde se encuentre el SE, es posible que necesite ser dotado de protección adicional ante situaciones de temperatura, humedad, vibración, etc. no habituales.

Ciertos SE controlan el funcionamiento de otros sistemas que requieren que sus operaciones se realicen de manera determinista. Es decir, una instrucción dada se tiene que realizar de manera inmediata o con un retardo mínimo y conocido de antemano. Para dar soporte a operaciones en tiempo real, los SE cuentan con Sistemas Operativos en Tiempo Real (RTOS) que se encargan de repartir el tiempo de ejecución de cada tarea y asignándolo en función de la prioridad de cada tarea.

A nivel de *hardware*, es un microcontrolador quien se encarga de ejecutar las instrucciones programadas. Un microcontrolador cuenta con un microprocesador, con la memoria y con los periféricos de entrada y salida. Periféricos habituales y que permiten la interacción entre el SE y otros dispositivos son aquellos que usan buses serie de datos. Algunos de los buses

más frecuentes son Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI), o Universal Serial Bus (USB).

Otro medio que emplean los SE para comunicarse son las redes de comunicaciones de datos, a las que se puede conectar tanto por cable como de manera inalámbrica. Existen varios protocolos para comunicarse en red, siendo unos de los más comunes los pertenecientes a la familia de protocolos TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol). Esta familia de protocolos es ampliamente utilizada para comunicar equipos en redes de área local (LAN), en redes de área local inalámbricas (WLAN) y en todo el mundo a través de Internet.

Con el uso de TCP/IP abre un abanico de nuevas funcionalidades permitiendo realizar funciones que antes no eran posible. Por ejemplo, usando el Hypertext Transfer Protocol (HTTP) se pueden transferir páginas web, con File Transfer Protocol (FTP) transferir archivos, con Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) enviar o recibir correo electrónico o con Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) se pueden enviar mensajes bajo el patrón de mensajería de publicar-suscribir.

En este trabajo se muestra como crear un SE conectado usando una placa de desarrollo FRDM-K64F del fabricante NXP. Se parte de la configuración de los componentes *hardware* y *software* necesarios, para terminar demostrando la interacción (de manera remota) de un SE desde una aplicación web. Desde dicha aplicación es posible enviar comandos para realizar alguna de las funciones programadas en la placa.

1.1. Estructura de la memoria

La presente memoria se estructura de la siguiente manera:

- **Introducción:** descripción abreviada de los temas principales abordados en el proyecto tanto los sistemas embebidos como las comunicaciones realizadas mediante la familia de protocolos TCP/IP. La introducción está acompañada de la estructura que toma la memoria y un listado con el contenido adjunto a la misma.
- **Objetivos del proyecto:** declaración de los objetivos que se pretenden conseguir con el desarrollo de este trabajo.
- **Conceptos teóricos:** explicación de los conceptos teóricos más relevantes en la realización del proyecto.

- **Técnicas y herramientas:** descripción de las técnicas y las herramientas que han sido empleadas para el desarrollo del proyecto.
- **Aspectos relevantes del desarrollo:** presentación de los aspectos o facetas que han tomado mayor relevancia durante la ejecución de trabajo.
- **Trabajos relacionados:** estado de la técnica entorno a los sistemas empujados y los protocolos TCP/IP.
- **Conclusiones y líneas de trabajo futuras:** conclusiones extraídas tras la realización del proyecto, así como nuevas líneas de trabajo sobre las que mejorar o ampliar lo presentando en este proyecto.

1.2. Anexos a la memoria

La memoria se presenta acompañada de los siguientes anexos:

- **Plan del proyecto software:** exposición de la planificación temporal y del estudio de viabilidad del proyecto, tanto la económica como la legal.
- **Especificación de requisitos del software:** presentación del catálogo de requisitos, así como la descripción de cada uno de ellos.
- **Especificación de diseño:** descripción de la fase de diseño, el diseño de datos, el diseño procedimental y el diseño arquitectónico, del *firmware* del SE y de la aplicación web.
- **Manual del programador:** explicación en detalle de aquellos aspectos que un programador debe conocer para trabajar con el código fuente del proyecto.
- **Manual de usuario:** explicación para que un usuario interesado en el proyecto sea capaz de instalar, configurar y operar con el SE y con la aplicación web.

1.3. Contenido adjunto

Se adjunta el siguiente contenido a la memoria y los anexos:

- *Firmware* para la placa de desarrollo.
- Aplicación web para interacción remota.
- Documentación del *firmware*.
- Documentación de la aplicación web.
- Repositorio en línea con el código del *firmware*.
- Repositorio en línea con el código de la aplicación web.

Objetivos del proyecto

En este capítulo se detallan los objetivos que se pretenden conseguir con la ejecución del proyecto. Se diferencian tres tipos de objetivos, los generales que dan causa al proyecto, los técnicos inherentes al tipo de proyecto realizado y los personales que se desean conseguir *motu proprio*.

2.1. Objetivos generales

- Configurar un sistema empotrado que sea capaz de conectarse en red.
- Dotar al sistema empotrado de diversas funciones usando algunos de los periféricos de los que dispone.
- Demostrar la ejecución correcta de las funciones implementadas.
- Crear una interfaz web que permita interactuar con el sistema empotrado.

2.2. Objetivos técnicos

- Configurar el *hardware* de una placa de desarrollo FRDM-K64F para poder conectarla a través de su puerto Ethernet a una LAN.
- Utilizar alguno de los buses serie de datos con los que cuenta la placa para crear una funcionalidad que pueda ser ejecutada de manera remota.
- Emplear alguno de los puertos de entrada y salida (digital o analógica), utilizando una alguna de las técnicas de modulación.

- A nivel de *software*, usar la implementación ligera de TCP/IP lwIP para manejar las comunicaciones.
- Crear una aplicación web usando la tecnología JSF capaz de comunicarse con una placa conectada en red.

2.3. Objetivos personales

- Ampliar los conocimientos y la experiencia en el desarrollo de *software* para sistemas empotrados.
- Conocer el conjunto de herramientas de trabajo que proporciona el fabricante de la placa de desarrollo.
- Extender el entendimiento en la familia de protocolos TCP/IP.
- Revisar el proceso de desarrollo de una aplicación web.
- Emplear el sistema de control de versiones distribuido Git a través de la plataforma de desarrollo GitHub.
- Emplear la técnica de desarrollo ágil Scrum en las diferentes fases del desarrollo.
- Aprender a usar el sistema de composición de textos \LaTeX y utilizarlo para realizar la documentación del proyecto.

Conceptos teóricos

En este capítulo se sintetizan algunos de los aspectos tratados en este proyecto para mejorar su comprensión y entendimiento.

3.1. Sistemas empotrados

Parte importante del proyecto se centra en obtener un sistema empotrado capaz de comunicarse usando los protocolos TCP/IP. A continuación se describen los conceptos más relevantes en torno a los SE.

Descripción

Se puede considerar que un sistema empotrado es aquel cuyo *hardware* y *software* se encuentran estrechamente relacionados, está diseñado para cumplir con una función específica, se haya integrado en un sistema mayor, no se espera que el usuario lo modifique y puede trabajar sin interacción o con la mínima interacción humana necesaria. [1]

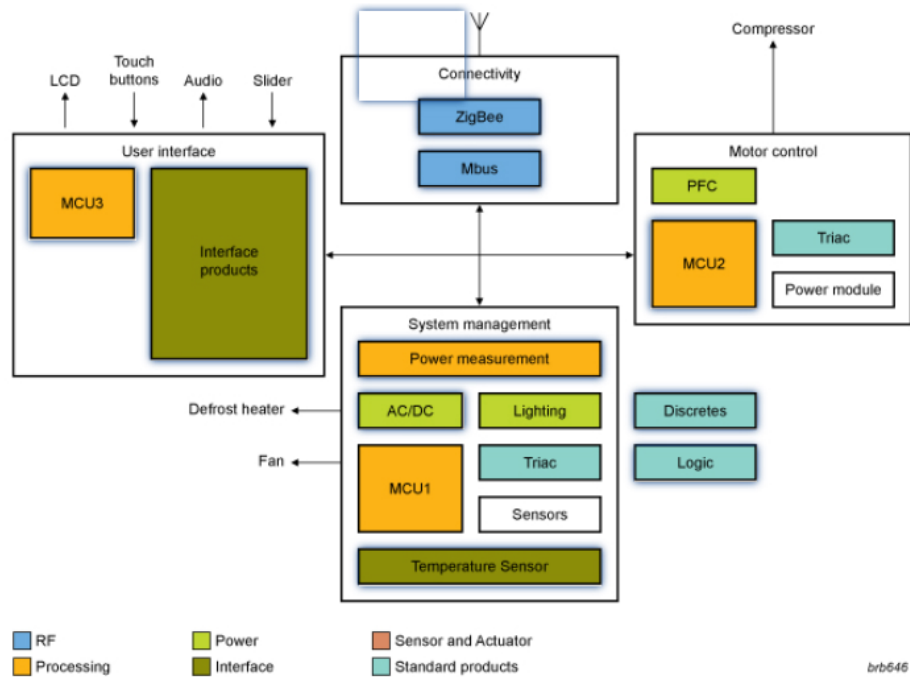


Figura 3.1: Ejemplo de integración de SE. [2]

En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de uso de varios SE dentro de un sistema mayor, en este caso un frigorífico inteligente. El sistema cuenta con varios componentes, la interfaz de usuario, la gestión del sistema, el control del motor o la conectividad. Cada uno de los componentes se ayuda de un SE para realizar su función asignada.

Los SE cuentan con el *hardware* específico para la tarea a realizar. La interfaz de usuario puede contar con pantallas o botones. La gestión del sistema tiene acceso a sensores, el control de la corriente, la iluminación o los ventiladores. El control del motor presenta componentes eléctricos para la regulación del compresor. Un módulo de energía, un triodo para corriente alterna o un módulo de corrección del factor de potencia son componentes que pueden estar presentes en el control del motor. Asimismo, el *software* ejecutado en cada uno de estos SE varía según la función a desempeñar realizando únicamente las tareas necesarias.

Por otra parte, también se puede advertir que los SE no están pensados para que el usuario los modifique o programe, ni requieren que la interacción sea constante por parte del usuario para su correcto funcionamiento.

Los SE y los sistemas que los emplean se encuentran fácilmente. Se

hallan en sistemas de movilidad y transporte, automatización industrial, sector sanitario, edificios inteligentes, redes de suministro inteligentes, investigación científica, seguridad pública, supervisión de salud estructural, recuperación de desastres, robótica, agricultura y ganadería, aplicaciones militares, telecomunicaciones y electrónica de consumo. [3]

Características del *hardware*

Los SE disponen de componentes *hardware* que siendo específicos para la tarea a la que están destinados se pueden generalizar en procesador, memoria y puertos de entrada y salida. El procesador se encarga de ejecutar las instrucciones de los programas que manejan las entradas y las salidas del sistema. Los programas ejecutados y los datos generados se almacenan en la memoria. Y los puertos de entrada y salida, envían y reciben las señales con las que trabaja el procesador.[1]

También existen otros elementos que se encuentran a menudo en los SE:

- Puertos de comunicación serie o paralelo
- Dispositivos de interfaz humana
- Sensores
- Actuadores
- Conversores analógica-digital (ADC)
- Conversores digital-analógica (DAC)
- Componentes de diagnóstico y redundancia
- Componentes de apoyo al sistema
- Otros subsistemas:
 - Circuito integrado para aplicaciones específicas (ASIC)
 - Matriz de puertas programables (FPGA)

En la figura 3.2 se presenta un diagrama de bloques en el que se puede observar de forma general los componentes que forman un SE y su funcionamiento. Las entradas son procesadas por el microcontrolador que a su vez generará las salidas apropiadas.

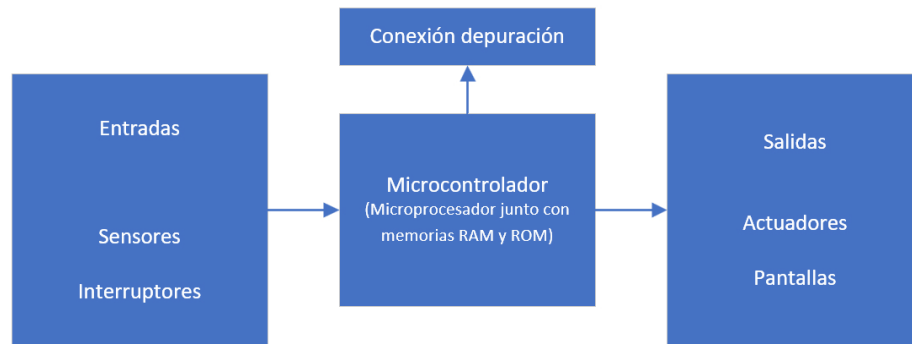


Figura 3.2: Diagrama de bloques del HW de un SE

Características del *software*

En cuanto al *software* presente en los sistemas embebidos, se pueden diferenciar varios grupos. El primero de ellos los *drivers* o controladores encargados de la interacción directa con el *hardware* del SE.

Luego se encuentra el *middleware*, que es aquel *software* que ocupa una posición entre el sistema operativo y los programas. El término se usa con frecuencia en librerías de rutinas de infraestructura que proporcionan servicios a los desarrolladores de los programas. [4]

Junto a lo anterior se puede hallar un Sistema operativo en tiempo real (RTOS). En un sistema operativo de propósito general varias tareas se ejecutan de forma aparentemente simultánea. De este modo se puede repartir el tiempo de ejecución de manera equitativa entre usuarios, por ejemplo. En cambio, en un RTOS se prima la ejecución de las tareas en un tiempo estrictamente limitado. Con un sistema de prioridades se determina la importancia de las tareas y cuales necesitan ser realizadas sin demora. [5]

Por último y funcionando sobre lo anterior se encuentra los programas necesarios para el funcionamiento del SE. En caso de contar con un RTOS será este el que se encargue de ejecutar una tarea u otra. Sino, de forma conocida como *bare-metal* se ejecutan las tareas de forma secuencial. Secuencia que solo es alterada en caso surgir una interrupción.

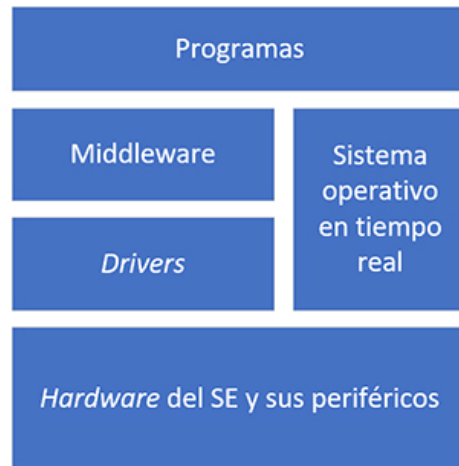


Figura 3.3: Digrama de bloques del SW de un SE

En el diagrama de bloques de la figura 3.3 se observan como se ubican unos componentes sobre otros. Los componentes se comunican con aquellos adyacentes. El RTOS es un componente opcional y que funciona de forma paralela a *drivers* y *middleware*.

Técnicas y herramientas

Esta parte de la memoria tiene como objetivo presentar las técnicas metodológicas y las herramientas de desarrollo que se han utilizado para llevar a cabo el proyecto. Si se han estudiado diferentes alternativas de metodologías, herramientas, bibliotecas se puede hacer un resumen de los aspectos más destacados de cada alternativa, incluyendo comparativas entre las distintas opciones y una justificación de las elecciones realizadas. No se pretende que este apartado se convierta en un capítulo de un libro dedicado a cada una de las alternativas, sino comentar los aspectos más destacados de cada opción, con un repaso somero a los fundamentos esenciales y referencias bibliográficas para que el lector pueda ampliar su conocimiento sobre el tema.

Aspectos relevantes del desarrollo del proyecto

Este apartado pretende recoger los aspectos más interesantes del desarrollo del proyecto, comentados por los autores del mismo. Debe incluir desde la exposición del ciclo de vida utilizado, hasta los detalles de mayor relevancia de las fases de análisis, diseño e implementación. Se busca que no sea una mera operación de copiar y pegar diagramas y extractos del código fuente, sino que realmente se justifiquen los caminos de solución que se han tomado, especialmente aquellos que no sean triviales. Puede ser el lugar más adecuado para documentar los aspectos más interesantes del diseño y de la implementación, con un mayor hincapié en aspectos tales como el tipo de arquitectura elegido, los índices de las tablas de la base de datos, normalización y desnormalización, distribución en ficheros³, reglas de negocio dentro de las bases de datos (EDVHV GH GDWRV DFWLYDV), aspectos de desarrollo relacionados con el WWW... Este apartado, debe convertirse en el resumen de la experiencia práctica del proyecto, y por sí mismo justifica que la memoria se convierta en un documento útil, fuente de referencia para los autores, los tutores y futuros alumnos.

Trabajos relacionados

Este apartado sería parecido a un estado del arte de una tesis o tesina. En un trabajo final grado no parece obligada su presencia, aunque se puede dejar a juicio del tutor el incluir un pequeño resumen comentado de los trabajos y proyectos ya realizados en el campo del proyecto en curso.

Conclusiones y Líneas de trabajo futuras

Todo proyecto debe incluir las conclusiones que se derivan de su desarrollo. Éstas pueden ser de diferente índole, dependiendo de la tipología del proyecto, pero normalmente van a estar presentes un conjunto de conclusiones relacionadas con los resultados del proyecto y un conjunto de conclusiones técnicas. Además, resulta muy útil realizar un informe crítico indicando cómo se puede mejorar el proyecto, o cómo se puede continuar trabajando en la línea del proyecto realizado.

Bibliografía

1. JIMÉNEZ, Manuel; PALOMERA, Rogelio y COUVERTIER, Isidoro. *Introduction to Embedded Systems: Using Microcontrollers and the MSP430*. 1.^a ed. Springer-Verlag New York, 2014. ISBN 978-1-4614-3142-8,978-1-4614-3143-5.
2. NXP SEMICONDUCTORS. *Refrigerator* [<https://www.nxp.com/applications/solutions/internet-of-things/smart-things/smart-home/refrigerator:REFRIGERATOR>]. 2019. [Consulta: 25-1-2019].
3. MARWEDEL, Peter. *Embedded System Design : Embedded Systems, Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things*. 3rd ed. Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2018. Embedded Systems. ISBN 978-3-319-56043-4,3319560433,978-3-319-56045-8,331956045X.
4. BUTTERFIELD, Andrew; EKEMBE NGONDI, Gerard y KERR, Anne. *A Dictionary of Computer Science*. 7.^a ed. Oxford University Press, 2016. Oxford Quick Reference. ISBN 0199688974,9780199688975.
5. AMAZON.COM, INC. *Why RTOS and What is RTOS?* [<https://www.freertos.org/about-RTOS.html>]. 2019. [Consulta: 25-1-2019].