



HOW
Universidad Zaragoza

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Y COMUNICACIONES, ÁREA DE
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

**SISTEMA SMARTMETERING CONTROLABLE
INALÁMBRICAMENTE
(Zpeta Power Energy Monitor 1.0.)**

AUTOR: NÉSTOR CARRUESCO BRETOS

DIRECTOR: RUBÉN BLASCO MARÍN

PONENTE: ANTONIO BONO NUEZ

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

CURSO 2011 - 2012

SISTEMA SMARTMETERING CONTROLABLE INALÁMBRICAMENTE

(Zpeta Power Energy Monitor 1.0.)

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fin de carrera (PFC) es desarrollar un sistema inalámbrico para la medición inteligente (smartmeter) de la energía consumida en una vivienda, proporcionando en tiempo real las variables que permiten monitorizar los valores de consumo eléctrico, para poder gestionarlo. Además permitirá la desconexión a distancia de los aparatos conectados al sistema.

Tabla de contenido

1.	CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	8
1.1	Marco de desarrollo del proyecto	8
1.2	Objetivos y alcance del proyecto.....	8
1.3	Estructura de la memoria	9
2	CAPITULO 2: MEDIDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO	11
2.1	Necesidad de gestionar activamente la energía.....	11
2.1.1	Tipos de medidores inteligentes domésticos.....	13
2.2	Telegestión para los distribuidores españoles	14
2.2.1	Legislación relativa a los contadores electrónicos	15
2.3	Unidades a medir	16
2.3.1	Ondas sinusoidales	16
2.3.2	Potencia	19
2.3.3	Potencia activa.....	19
2.3.4	Potencia reactiva	20
2.3.5	Potencia aparente	20
2.3.6	Factor de potencia FP y $\cos(\varphi)$	20
2.3.7	Métodos numéricos de cálculo	22
3	CAPITULO 3: DISEÑO DEL HARDWARE	24
3.1	Diagrama de Bloques	24
3.2	Etapa de medida	25
3.2.1	Dispositivos disponibles en el mercado	25
3.2.2	Características del Cirrus CS5463	26
3.3	Acondicionamiento de V (Sensor de tensión)	28
3.3.1	Alternativas y motivación de la solución adoptada	28
3.3.2	Diseño de la etapa de medida de tensión	29
3.4	Acondicionamiento de I (Sensor de corriente).....	30
3.4.1	Alternativas y motivación de la solución.....	30
3.4.2	Diseño del circuito	31
3.5	Control de la carga	33
3.5.1	Alternativas y características.....	33
3.5.2	Características del EMR seleccionado	34

3.5.3	Diseño del circuito	35
3.6	Módulo de comunicación	35
3.6.1	Comparativa de las tecnologías inalámbricas	36
3.6.2	Módulo ZigBee, Telegesis ETRX3	36
3.7	Memoria externa	37
3.7.1	Características de la memoria 24LC512	38
3.8	Microcontrolador	38
3.8.1	Criterios de selección del microcontrolador	38
3.8.2	Selección de componentes.....	40
3.9	Fuente de alimentación	41
3.9.1	Prestaciones de la FA.....	42
3.9.2	Alternativas posibles	42
4	CAPITULO 4: DISEÑO DEL FIRMWARE	45
4.1	Planteamiento del diseño	45
4.1.1	Grafo de estados.....	45
4.1.2	Definición de capas de la estructura firmware	51
4.1.3	Librerías y firmware desarrollado	52
4.2	Protocolo de comunicaciones.....	60
4.2.1	Comandos implementados.....	61
5	CAPITULO 5: DISEÑO DE LA PCB	64
5.1	Criterios del diseño	64
5.2	Costes de fabricación	65
5.3	Planos SMARMETER.....	66
6	CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	69
7	BIBLIOGRAFÍA	71
8	ÍNDICE DE FIGURAS.....	73
9	ÍNDICE DE TABLAS.....	74
ANEXO A	Legislación relativa a los contadores electrónicos	76
	Principales características de los contadores según RD 1110/2007	78
ANEXO B	FUENTE DE ALIMENTACIÓN CAPACITIVA.....	79
	Diseño de la Fuente de Alimentación.....	81
ANEXO C	Cirrus CS5463	84

Métodos numéricos de cálculo	84
Lista de registros del Cirrus	85
ANEXO D Librería ZigBee	87
ANEXO E Comandos PC >> Nodo implementados	88
ANEXO F CÓDIGO FIRMWARE	95
Código librería Cirrus CS5463	95
Código Funciones Inteligentes.....	103
Código protocolo de comunicaciones (CCP)	106
Función principal	108

1. CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este proyecto fin de carrera (PFC) es desarrollar un sistema inalámbrico para la medición inteligente (smartmeter) de la energía consumida en una vivienda, proporcionando en tiempo real las variables que permiten monitorizar los valores de consumo eléctrico, para poder gestionarlo. Además permitirá la desconexión a distancia de los aparatos conectados al sistema.

1.1 Marco de desarrollo del proyecto

El PFC se ha desarrollado bajo la tutorización del grupo de investigación HOWLab (Human Openware Research Lab) (1) de la universidad de Zaragoza, cuyo objetivo principal es la investigación y el desarrollo de tecnologías centradas en las personas y sus entornos.

Está encuadrado dentro de las tecnologías de la información y la comunicación para la eficiencia energética y la sostenibilidad, ITCs. El objetivo de ésta línea de investigación, es el desarrollo de nuevos sistemas para la monitorización automática (mediante sensores pequeños y de bajo consumo) del consumo de energía (electricidad, agua,...) y la medida de variables ambientales (temperatura, humedad,...)

En el presente PFC se centrará concretamente en la medición del consumo de energía eléctrica, para desarrollar nuevos servicios y dispositivos para la gestión inteligente de la demanda de energía en aplicaciones domésticas.

Además, el resultado del mismo se liberará bajo el nombre Zpeta Power Energy Monitor 1.0, junto con el resto de proyectos del “Zeta Project”, como hardware libre por medio de OPENLAB (2) (web para la promoción del hardware y software libre del grupo HOWLab), con la finalidad de que todo el conocimiento desarrollado quede a disposición de la comunidad.

1.2 Objetivos y alcance del proyecto.

El objetivo que se plantea en este proyecto, dentro de la línea explicada anteriormente, es el diseño e implementación de un sistema de medición del consumo eléctrico de forma inalámbrica para poder instalarlo en el cuadro general de distribución de la vivienda. Este dispositivo estará integrado dentro del protocolo de comunicación entre nodos ZigBee utilizado por HOWLab.

Dado que no se parte de trabajo previo, se definen los siguientes objetivos parciales que deberá cumplir el diseño junto a las especificaciones establecidas:

- 1) Estudio de las magnitudes a medir y del funcionamiento de un dispositivo smartmeter, tras lo cual, se han fijado los principales requerimientos:
 - Diseño del sistema para red monofásica AC, de 2 cables (fase y neutro).
 - Como mínimo debe poder medir la potencia activa, reactiva y el factor de potencia del aparato conectado al sistema.
 - Las magnitudes medidas deben visualizarse en las unidades que permitan una fácil y rápida interpretación por parte del usuario.
 - Posibilidad de actuar electrónicamente, sobre el sistema conectado (control ON/OFF)
- 2) Establecimiento de un diagrama básico de bloques del sistema.
- 3) Diseño de la fuente de alimentación.
 - Alimentación directamente de la red eléctrica.
- 4) Desarrollo del firmware del sistema, principalmente las librerías de control del dispositivo de medida.
 - La toma de medidas debe realizarse automáticamente, con la periodicidad que fije el usuario.
 - Debe poder ser controlado inalámbricamente.
 - Disponibilidad del resto de magnitudes medidas (V_{rms} , I_{rms} , S ,...) bajo demanda.
 - Deberá incluir la posibilidad de desconexión inalámbrica de la carga conectada al sistema.
- 5) Montaje y prueba del sistema en placa de inserción.
- 6) (Opcional) Diseño de la PCB con los requerimientos:
 - El equipo deberá estar situado en el cuadro de control.
 - El sistema se encontrará encapsulado en una caja con “carril DIN”
 - El diseño deberá ser de las menores dimensiones posibles, con el fin de que la caja utilizada sea de un único módulo.
- 7) (Opcional) Fabricación, montaje y verificación de la PCB.

1.3 Estructura de la memoria

En este apartado se va a explicar cómo se ha estructurado la memoria dando una pequeña introducción de lo que se puede encontrar en cada uno de los capítulos y anexos.

La memoria dispone de 6 capítulos:

- El capítulo 1, introducción, se da una visión general del proyecto situándolo en el contexto y exponiendo lo que en él se va a desarrollar, con sus objetivos, alcance y especificaciones.
- En el capítulo 2, medida del consumo eléctrico, se trata el tema de la telegestión, los hechos que han llevado su necesidad y la normativa reguladora actual. También se explican los parámetros característicos de la red eléctrica, necesarios para su medida y por tanto, del consumo eléctrico.
- En el capítulo 3, diseño del hardware, se aborda el diseño del mismo, partiendo de las especificaciones (capítulo 1.3). En el proceso de selección de cada componente, se comentan otras soluciones analizadas, las motivaciones de cada selección y el cálculo del valor de los componentes necesarios.
- Para el capítulo 4, diseño del firmware, se comienza con la explicación del diagrama de flujo principal del sistema, para después comentar el software desarrollado para cada elemento del hardware, es decir las librerías. Finalmente se explicará el protocolo de comunicaciones utilizado, basado en el desarrollado por HOWLab.
- En el capítulo 5, diseño de la PCB, primero se fijan los criterios físicos, por normativa, del diseño. Después se irá explicando todo el proceso necesario, incluyendo los esquemáticos e imágenes de la placa, junto con el coste de fabricación para una unidad y la estimación para 10, 100 y 1000 unidades en base a precios de proveedor.
- Por último, en el capítulo 6, conclusiones, se hace una valoración global de todo el trabajo realizado. Se sacarán las conclusiones finales obtenidas y las perspectivas de continuidad del PFC.

En los anexos, se encuentra la información complementaria de la memoria, organizada según en el orden en que va apareciendo en la misma.

- Anexo A: Información relativa a normativa sobre contadores en España.
- Anexo B: Fuente de alimentación capacitiva, incluyendo el principio de funcionamiento de la misma, proceso de diseño y los cálculos necesarios.
- Anexo C: Documentación y contenido desarrollado para el integrado CS5463 de Cirrus Logic (método numérico de cálculo, lista de registros y librería desarrollada)
- Anexo D: Librería ZigBee desarrollada por HOWLab y utilizada en el proyecto.
- Anexo E: Lista de comandos implementados en el CCP (Cluster-Based Communication Protocol)
- Anexo F: Código del firmware desarrollado.

2 CAPITULO 2: MEDIDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO

En este capítulo se va a tratar el tema de los medidores inteligentes y la telegestión, partiendo de los hechos que han llevado a la necesidad de usar este tipo de sistemas para después comentar sus beneficios. También se explicará la normativa reguladora actual y por último, los parámetros característicos de la red eléctrica, que permiten su medida y por tanto la del consumo eléctrico.

2.1 Necesidad de gestionar activamente la energía

Son varios los motivos que han llevado a la necesidad de la gestión de forma efectiva la demanda de energía eléctrica en España, en especial dos:

1) El problema del sector energético español:

Actualmente, el sector eléctrico español es capaz de generar la energía necesaria para abastecer la creciente demanda, pero sigue dependiendo en un 80% de energía externa (principalmente petróleo).

Por otro lado, se han producido varios factores que han hecho que en los últimos años el precio de la electricidad haya ido aumentando progresivamente, como la inestabilidad regulatoria, con continuos cambios normativos, la liberalización del mercado eléctrico, impulsada por la normativa europea, el déficit tarifario y el incremento de los costes regulados con el fin de que las operadoras cubriesen los costes de generación, que desde hace años subvencionaba el estado.

Conclusión: Aumento del precio de la electricidad.

2) Punto de vista ECOLÓGICO

En enero de 2008 todos los jefes de Estado y de Gobierno de la Unión Europea se comprometieron en la lucha contra el cambio climático con tres objetivos denominados 20/20/20 para el año 2020:

- Reducir un 20% las emisiones de CO₂.
- Apostar por las fuentes de energía renovable para que representen un 20%.
- Mejorar la eficiencia energética en un 20%.

En materia de energías renovables, España se encuentra muy a la cabeza con un 13%, aunque queda mucho camino por recorrer para lograr el objetivo del 20%, como podemos ver en la siguiente imagen:

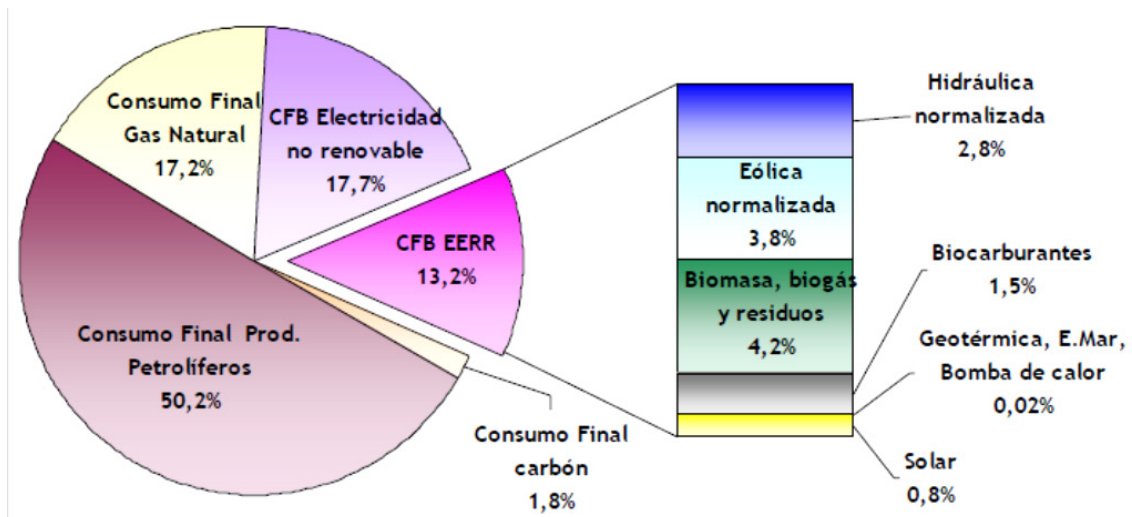


Fig. 2-1 Consumo final bruto de energía en 2010

Fuente: Resumen del Plan de Energías Renovables 2011-20 del Ministerio de industria.

Por otro lado, en materia de eficiencia energética, agencias estatales como el IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) promueven reformas y subvenciones, que todavía son insuficientes para el segmento residencial.

Conclusión: Mayor concienciación ciudadana sobre el cuidado del medio ambiente.

3) Beneficios los medidores inteligentes:

Llegados a este punto, la pregunta sería, ¿cómo pueden ayudar los medidores inteligentes a ahorrar energía? Bien gracias al feedback (realimentación). Esto consiste en que el usuario tenga acceso a los datos de consumo mientras este se produce y pueda reflexionar sobre ellos de forma más eficaz. Hay disponibles varios estudios que demuestran la importancia del feedback para reducir el consumo, el más completo es el realizado por el instituto para el cambio climático de la universidad de Oxford: "The effectiveness of feedback on energy consumption" (3).

Por ello, se hace necesaria una solución sencilla y económica que ayude a los usuarios a ahorrar energía en su vivienda y esto se consigue modificando su comportamiento, con el objetivo de consumir solo la energía necesaria. Aquí es donde entran los beneficios del feedback que proporcionan los medidores inteligentes:

- Conocer en cualquier momento la información gasto eléctrico, lleva a cambiar los hábitos de consumo, como muestra el estudio citado anteriormente, pudiendo conseguir un ahorro de un 5-15% en la factura.
- Mejorar la eficiencia de los aparatos. Disponer consumo de un aparato en concreto, puede reflejar la importancia de sustituirlo por otro nuevo, más eficiente, como por ejemplo sustituir las bombillas de incandescentes por lámparas fluorescentes compactas (CFLs).

- Algunos medidores, mediante la desconexión de circuitos prescindibles automáticamente, permitirían reducir el término de potencia contratada al mínimo necesario.
- Permiten aprovechar las Tarifas de Discriminación Horaria (TDH), programando los electrodomésticos de alto consumo en las horas más baratas (valle) establecidas por las compañías eléctricas.
- Apagando los aparatos en standby. En el siguiente gráfico se puede observar el gasto de diferentes electrodomésticos en este modo de funcionamiento. Los números muestran la potencia media consumida anualmente, en kwh y su coste aproximado, en dólares. Las líneas rojas se refieren a un modo standby pasivo y las azules a un modo standby activo.

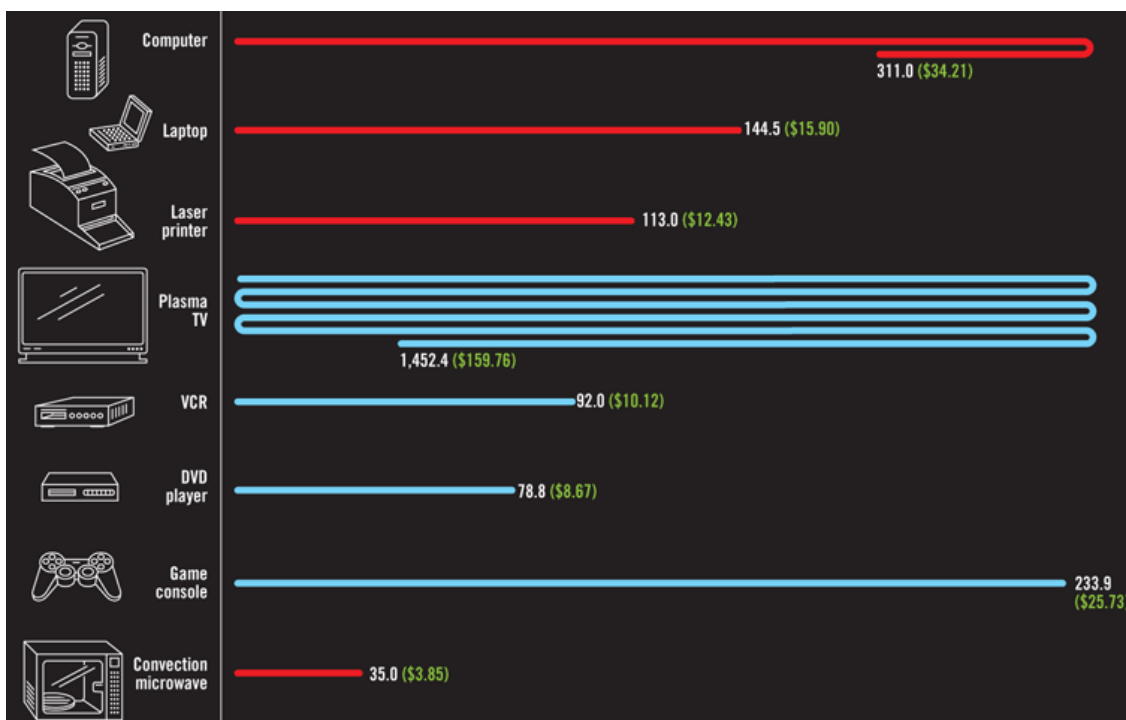


Fig. 2-2 Consumo en espera (standby)

Fuente: *Intrusive Residential Standby Service Report. Department of Energy, EEUU.*

2.1.1 Tipos de medidores inteligentes domésticos

Hemos visto pues, que conocer en todo momento el coste económico real de lo que estamos consumiendo, puede ayudar a concienciar a las personas de que es necesario cambiar nuestro modelo de consumo, consiguiendo un ahorro considerable en la factura eléctrica y para ello, se necesitan los medidores eléctricos. Básicamente hay 2 tipos:

- Medidores individuales con conexión para enchufe, los cuales permiten medir el consumo de un aparato (electrodoméstico) concreto.

- Medidores ubicados en el cuadro de control, que permiten monitorizar el consumo total de la vivienda.

Dentro de ellos, sus características pueden variar bastante según su precio. Las funciones que ofrecen, desde las más básicas a las más completas son éstas:

- 1) Inalámbricos con visualización en display. Miden los valores instantáneos y visualizan la potencia consumida y el coste económico en un display.
- 2) El siguiente paso sería almacenar el histórico de datos y poder visualizarlo, lo que equivaldría a una interface más completa.
- 3) Comunicación del medidor directamente a un PC, con todos los beneficios que ello puede suponer con un software adecuado.
- 4) Por último, podríamos añadir la posibilidad de compartir la información por internet, con alternativas como el retirado Google PowerMeter o Holm de Microsoft.

2.2 Telegestión para los distribuidores españoles

El término telegestión designa el conjunto de productos basados en las tecnologías informáticas, electrónicas y de telecomunicaciones, que permiten el control a distancia de instalaciones técnicas aisladas o distribuidas geográficamente, cuyo fin principal es registrar las informaciones obtenidas con el fin de analizarlas y optimizarlas.

Nuestro proyecto se centra exclusivamente en la medición de magnitudes relacionadas con el consumo eléctrico, dejando la gestión o telegestión de dichas medidas para proyectos futuros ya que el campo de aplicación es muy amplio.

En base a esto, se comentan esquemáticamente, las ventajas que ofrece la telegestión del consumo eléctrico para las compañías.

Telegestión para las compañías eléctricas
La lectura del consumo se realiza a distancia.
Minimización de errores.
La facturación se realiza sobre lecturas reales, evitando así las facturas estimadas.
Las operaciones relacionadas con el suministro (alta, baja, modificación de potencia o tarifa, etc.) se realizan de forma remota.
Ejecución de las operaciones remotas en menos de 24 horas, en la mayoría de los casos.
Mayor rapidez en la detección e identificación de incidencias.
Mayor información sobre el consumo de energía, lo que favorecerá el aprovechamiento y eficiencia de la red eléctrica.

Tabla 2.1 Telegestión para las compañías eléctricas

Actualmente todas están instalando contadores con capacidad de telegestión, siguiendo la normativa vigente, como se verá en el apartado siguiente aunque como

inconveniente, destacar que el distribuidor tiene que asumir el coste de los nuevos contadores, lo que ha creado reticencias dentro del sector.

También está por ver si estas mejoras suponen un feedback para el usuario y si contribuyen a un consumo más eficiente.

2.2.1 Legislación relativa a los contadores electrónicos

Se comentará de forma muy resumida, la legislación relativa a los contadores electrónicos aunque puede consultarse de forma más detallada en el anexo A.

En el **Real Decreto (RD) 809/2006, de 30 Junio** (1). Primera referencia al contador electrónico, la cual establece que los contadores eléctricos en nuevos suministros (potencia contratada <15 kW) deberán permitir la discriminación horaria de las medidas, así como la telegestión.

Después, en el **RD1634/2006,29 Diciembre**. Mandato a la CNE del plan de instalación de equipos de medida y el plan para la sustitución a nivel nacional de contadores, con las características anteriores. En el mencionado plan se recogerán los criterios para la sustitución de dichos equipos de medida, así como el número de equipos a instalar anualmente.

Real Decreto **RD 1110/2007, 24 Agosto**. Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico español: Establece toda la normativa relacionada con los equipos de medida (Normas generales, equipos de medida, verificación e inspección, sistemas y protocolos de comunicaciones,...). Se fijan unas funciones mínimas que quedan resumidas en la siguiente tabla:

FUNCIONES MÍNIMAS
Lectura remota de la potencia activa, reactiva y máxima
Control de la potencia contratada
Programación remota de parámetros del contrato, como la potencia máxima
Interruptor integrado para operaciones remotas de conexión/desconexión
Lectura remota de parámetros de calidad de la red
Sincronización remota del tiempo
Capacidad de gestión de la carga, para reducir la demanda en momentos críticos
Seguridad y control de acceso a los datos
Alarma y registro de eventos

Tabla 2.2 Resumen funciones mínimas de los contadores

2.3 Unidades a medir

En línea con lo establecido, en éste apartado va se va a explicar de forma básica los parámetros característicos de corriente alterna, necesarios para la medida del consumo eléctrico.

Se denomina corriente alterna, CA (AC en inglés, de alternating current) a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente cada periodo T , al contrario que en DC, donde la corriente solo tiene una dirección. La forma de onda de alterna más comúnmente utilizada es la senoidal, puesto que se consigue una transmisión más eficiente de la energía.

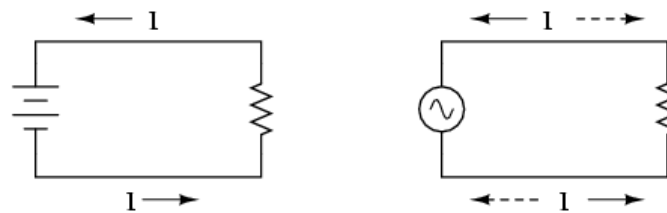


Fig. 2-3 Circuitos DC (izquierda) y AC (derecha)

2.3.1 Ondas sinusoidales

Una señal sinusoidal, $f(t)$, se puede expresar matemáticamente según sus parámetros característicos, como una función del tiempo por medio de la siguiente ecuación:

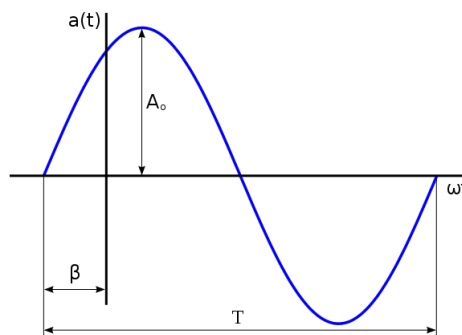


Fig. 2-4 Onda Sinusoidal

$$f(t) = A_0 \times \sin(\omega t + \beta) \quad (0.1)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (0.2)$$

Parámetros: A_0 es la amplitud (también llamada valor de pico), ω la velocidad angular en radianes/segundo, t el tiempo en segundos, β el ángulo de fase inicial en radianes, f es la frecuencia de la onda, típicamente 50Hz de red y T el periodo (red de 50Hz, 20 ms.)

Sin embargo, en AC nos encontramos con el problema de cuantificar lo “grande” o “pequeña” que es una magnitud, al contrario que en DC, donde las magnitudes de V e I son normalmente fijas en todo el circuito. Por ello, para expresar numéricamente en

una única magnitud el valor de una onda AC, disponemos de diversos valores significativos, pudiéndose definir para las ondas de tensión y corriente:

- **Valor de PICO (A_o):** Se define como la altura máxima de la onda desde el punto cero, dando lugar al valor de pico o amplitud (A_o).

Si la onda que medimos es de tensión tendremos el voltaje de pico (V_p) y si es de intensidad la corriente de pico (I_p) y lo mismo tendremos para el resto de valores significativos.

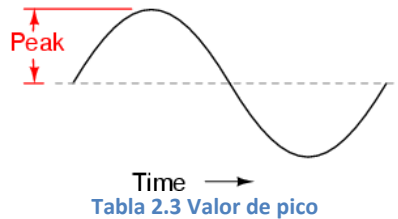


Tabla 2.3 Valor de pico

- **Valor de Pico a Pico (A_{pp}):** Diferencia entre el pico o máximo y el mínimo. Dado que el valor máximo de una función seno es +1 y el valor mínimo es -1, una señal sinusoidal que oscila entre $+A_o$ y $-A_o$, el valor de A_{pp} , será por tanto $(+A_o) - (-A_o) = 2 \times A_o$.

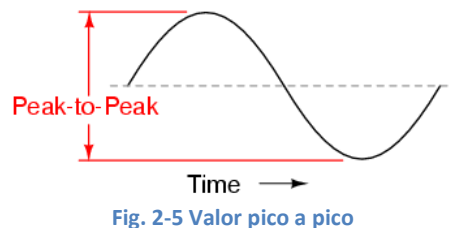


Fig. 2-5 Valor pico a pico

- **Valor medio (AVG):** Valor del área que forma la onda con el eje de abscisas partido por su período, considerada positiva si está por encima del eje de abscisas y negativa si está por debajo. Se suele interpretar como la componente continua DC de la onda sinusoidal. Como en una señal sinusoidal el semiciclo positivo es idéntico al negativo, su valor medio es nulo, como vemos en la figura:

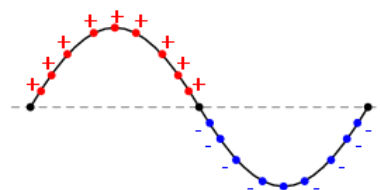


Fig. 2-6 Valor medio NULO

Por otro lado, refiriendo el valor medio de una onda sinusoidal a un semiciclo (la mitad del periodo) y realizando la integral nos queda la siguiente expresión:

$$Valor_{AVG} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{2A_0}{\pi} \quad (0.3)$$

- **Valor eficaz (RMS):** Matemáticamente, el valor eficaz de una magnitud variable con el tiempo, se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un período (en inglés rms, root mean square) y se corresponde con el valor de una corriente continua DC, que al circular por una determinada resistencia produce la misma potencia disipada que dicha corriente alterna AC.

El valor eficaz se utiliza habitualmente ya que es la mejor manera de relacionar los valores AC y DC u otros valores AC de diferentes formas de ondas.

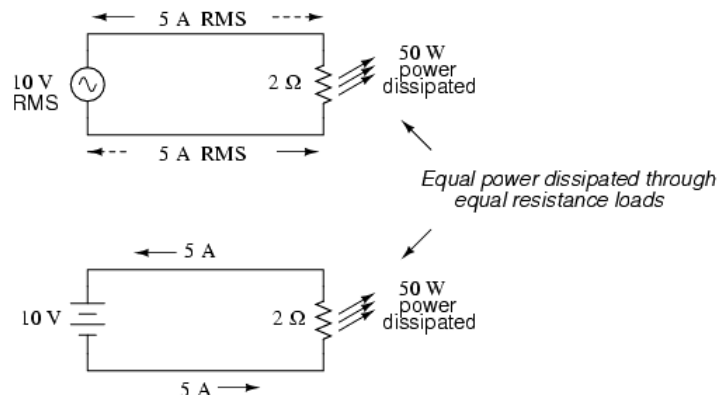


Fig. 2-7 Misma potencia disipada

Matemáticamente se demuestra que para una corriente alterna senoidal el valor eficaz viene dado por la expresión:

$$Valor_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \frac{Ap}{\sqrt{2}} \quad (0.4)$$

Y resolviendo la integral (1.4) para una onda de tensión o corriente, nos quedarían las siguientes expresiones:

$$I_{RMS} = \frac{ip}{\sqrt{2}} \quad V_{RMS} = \frac{Vp}{\sqrt{2}} = 0,707 \times Vp \quad (0.5)$$

Como parámetro interesante, comentar el denominado **factor de forma**, el cual, no es unívoco a la forma de onda (existen infinitas formas de onda con el mismo factor de forma) y no depende de la frecuencia. Para una onda sinusoidal como la de la Fig. 7:

$$\text{Factor de forma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (0.6)$$

Como resumen, para una onda sinusoidal como la de la figura tendremos:

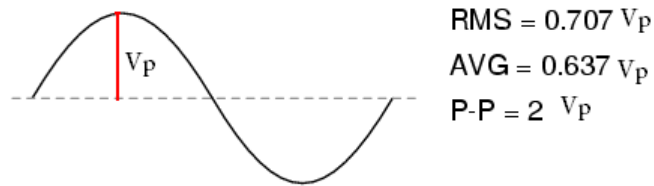


Fig. 2-8 Valores RMS, AVG(1 semiciclo) y V_{pp} de una senoide

2.3.2 Potencia

La potencia eléctrica es la energía proporcionada por una fuente a una carga por unidad de tiempo y se mide en vatios [W]

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \left(\frac{dW}{dq} \right) \left(\frac{dq}{dt} \right) = v(t) \times i(t) \text{ [W]} \quad (0.7)$$

Como operaremos en régimen permanente sinusoidal, consideraremos una tensión periódica $v(t)$ de amplitud V_p aplicada a una carga y su correspondiente corriente $i(t)$ de amplitud i_p y desfase $V - I = \phi$:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_p \times \text{sen}(\omega t) \\ i(t) &= i_p \times \text{sen}(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (0.8)$$

Entonces, la **potencia instantánea** vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$p(t) = v(t) \times i(t) = i_p \times v_p \times \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (0.9)$$

La frecuencia de $p(t)$ será por tanto el doble de la tensión (ó corriente) y su signo algebraico se interpreta así:

- Si $p(t) > 0$ se está entregando potencia al circuito.
- Si $p(t) < 0$ se está extrayendo potencia del circuito.

2.3.3 Potencia activa

También llamada potencia media es la energía que necesita la carga para realizar un trabajo en una unidad de tiempo y la calculamos como la media aritmética de todos los valores instantáneos de dicha magnitud, medidos en un cierto intervalo de tiempo. Es la potencia que realmente consume el circuito. Unidad de medida, vatios [W].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (0.10)$$

$$P = \frac{1}{2} \times V_p \times i_p \times \cos \phi = V_{ef} \times I_{ef} \times \cos \phi \quad [W] \quad (0.11)$$

2.3.4 Potencia reactiva

Se utiliza en la producción de los campos eléctricos y magnéticos en bobinas y condensadores. Esta potencia nunca se convierte a potencia no eléctrica, su unidad es el voltio amperio reactivo [VAR] y se expresa de la siguiente forma:

$$Q = \frac{1}{2} \times V_p \times i_p \times \text{sen} \phi = V_{ef} \times I_{ef} \times \text{sen} \phi \quad [VAR] \quad (0.12)$$

2.3.5 Potencia aparente

Es una magnitud compleja, matemáticamente hablando, resultante de la suma de otras dos componentes vectoriales y se expresa en voltio amperios [VA]. Matemáticamente, la potencia aparente se define mediante la raíz cuadrada de la suma de la potencia activa, P y la reactiva, Q.

$$S = \frac{1}{2} V_p \times I_p = V_{ef} \times I_{ef} \quad [VA] \quad (0.13)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (0.14)$$

Todas ellas forman el triángulo de potencias:

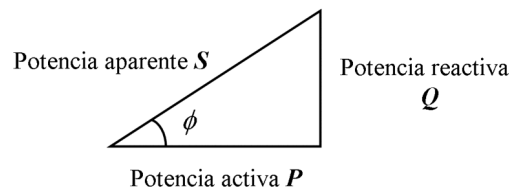


Fig. 2-9 Triángulo de potencias

2.3.6 Factor de potencia FP y cos (φ)

El factor de potencia se define como el cociente (ratio) entre la potencia activa P y la aparente S, por lo que se trata de una magnitud adimensional que varía entre 0 y 1.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) \times dt}{V_{RMS} \times I_{RMS}} \quad (0.15)$$

- 1) Con carga **LINEAL**, tenemos operación senoidal por lo que las ondas no se deforman:

- Tensión = senoide, $v(t) = V_p \times \text{sen}(\omega t)$ (0.16)

- Corriente = senoide, $i(t) = \frac{V_p}{Z\omega} \times \text{sen}(\omega t + \phi)$ (0.17)

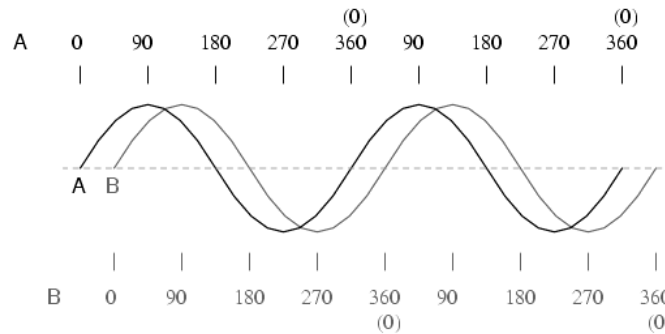


Fig. 2-10 Desfase entre $v(t)=A$ e $i(t)=B$

En estas condiciones, el $FP = \text{Cos } \phi$ no es más que el desfase entre las ondas de tensión y corriente que circulan por la carga y nos indica como es ésta. Gráficamente lo calculamos mediante coseno del ángulo ϕ que forman la potencia activa P y la aparente S en el triángulo de potencias Fig. 8.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_p \times i_p \times \cos \phi}{V_p \times i_p} = \cos \phi \quad (\text{Válida en rég. perm. sinusoidal}) \quad (0.18)$$

Por ejemplo, el caso especial de $FP = \text{Cos } \phi = 1$ para el cual las formas de V e I son iguales por lo que tenemos carga puramente resistiva.

- 2) Con cargas NO LINEALES, ondas deformadas y aparecen componentes armónicas, por lo que tendríamos que tener en cuenta todos los armónicos para calcular las potencias y por tanto, el FP.

$$v(t) = \bar{V} \times \sum_{n=1}^{\infty} V_n(\omega_n) \quad (0.19)$$

$$i(t) = \bar{I} \times \sum_{n=1}^{\infty} I_n(\omega_n) \quad (0.20)$$

$$FP = \frac{P}{S} \neq \cos \phi \quad (0.21)$$

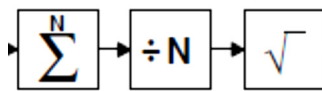
El factor de potencia es un aspecto muy importante a considerar ya que cualquier $FP < 1$ implica que el circuito consume mayor corriente, disipando la misma potencia activa en la carga, que otro con $FP = 1$.

2.3.7 Métodos numéricos de cálculo

A lo largo de este apartado, se ha ido explicando la forma matemática de calcular las magnitudes comentadas. Sin embargo, en este punto se va a explicar, como realizar dichos cálculos mediante un sistema digital.

Para ello nos basaremos en el datasheet de un circuito integrado específico de medida, el Cirrus CS5463 (2), donde se encuentra explicado con bastante claridad, aunque obviamente es extrapolable a cualquier otro sistema.

1) Cálculo de los valores eficaces (RMS):

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n}{N}}$$


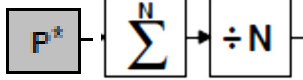
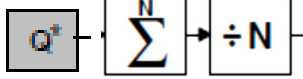
Los cálculos a realizar por el integrado elegido serán:

- Tomar N muestras de los valores instantáneos de tensión y corriente.
- Realizar el sumatorio de dichos valores y dividirlos para el número de muestras tomadas N.
- Ahora se calcula la raíz cuadrada de los valores obtenidos anteriormente y tendremos el valor eficaz V_{rms} e I_{rms} .

Como se ha visto, los cálculos son similares a los que realizaríamos a mano, con la salvedad de que no necesita integrar, al poder dividir entre N muestras, el sumatorio de valores instantáneos de $i(t)$ y $v(t)$.

2) Cálculo de POTENCIAS:

Para hallar las potencias activa y reactiva, los pasos a seguir serán los dos primeros del apartado anterior, ya que al ser el valor medio no hay que realizar la raíz cuadrada.

Pactive	
Qavg	 $Q_{AVG} = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{N}$

En el resto de magnitudes, la forma de cálculo será la misma que la utilizada en el cálculo manual y por tanto ya está explicado en puntos anteriores, así que lo resumiremos en la siguiente tabla:

S	$S = V_{RMS} \times I_{RMS}$
PF	$PF = \frac{P_{ACTIVA}}{S}$
Qtrig	$Q_{Trig} = \sqrt{S^2 - P_{Activa}^2}$

3) Cálculo de valores de PICO (Peak):

Los valores de corriente de pico (Ipeak) y voltaje de pico (Vpeak) serán los valores máximos de corriente y tensión instantáneos respectivamente, detectados durante cada ciclo de cálculo.

Como se ha comentado al principio de éste apartado, en el datasheet del CS5463 el esquema de cálculo se encuentra explicado muy visualmente o también puede verse un resumen en el anexo C.

3 CAPITULO 3: DISEÑO DEL HARDWARE

En el presente capítulo, se van a exponer los elementos del hardware del sistema. Partiendo de las especificaciones técnicas del diseño, se detallará el proceso de selección de cada componente, comentando diferentes soluciones analizadas, las motivaciones de cada selección y el cálculo del valor de los componentes necesarios.

Para plantear la solución adoptada, se van a considerar las acciones a realizar para cumplir las especificaciones vistas en el apartado 1.2 (Objetivos y alcance del proyecto), teniendo en cuenta que el propósito principal es proporcionar al sistema, la medida en tiempo real de los valores de tensión y corriente del circuito al que lo conectemos.

- 1) Sensado y acondicionamiento de $v(t)$ e $i(t)$.
- 2) Cuantificado y procesado de ambas.
- 3) Control del sistema y transmisión de datos.

3.1 Diagrama de Bloques

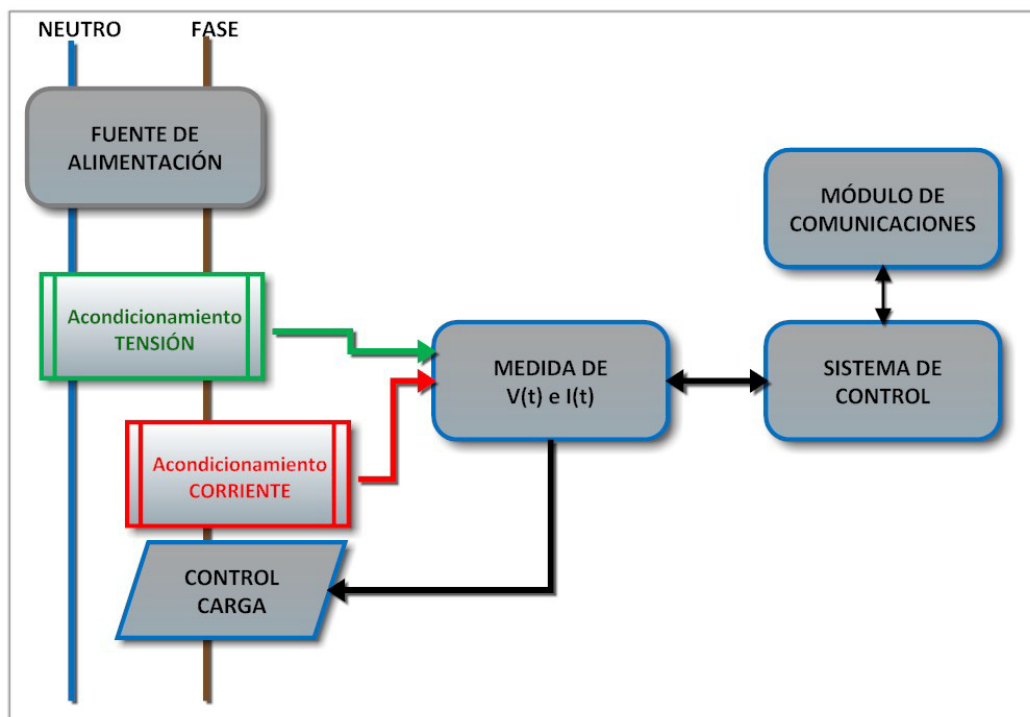


Fig. 3-1 Diagrama de bloques

Se ha dividido el diseño en los bloques mostrados, con el fin de simplificarlo. De forma básica, cuenta con dos bloques que adaptan las magnitudes a medir a valores admisibles para el sistema. También contará con un elemento para el control del estado de la carga y un módulo de comunicaciones para el envío de datos. Por último para la gestión de los diferentes bloques de se dispondrá de un sistema de control y obviamente una fuente de alimentación para el conjunto.

3.2 Etapa de medida

La primera etapa a considerar será como abordar la medida de la tensión y corriente instantáneas, variables a partir de las cuales se calculan las demás. Para ello se tendrán que realizar las operaciones de acondicionamiento, sensado y la cuantificación (conversión analógico-digital y procesamiento de la señal). Se plantean dos alternativas de diseño base:

- 1.) Basados en microcontrolador o DSP:
Requiere de la conversión A/D de ambas señales y del cálculo matemático de todas las variables que necesitemos conocer.
- 2.) Basados en circuitos integrados (CI) específicos de medida:
Estos equipos incorporan la conversión, muestreo y cálculo de las variables necesarias.

Las dos alternativas son válidas, pero los circuitos integrados de medida ofrecen una exactitud mayor que la que se conseguiría al realizar la conversión A/D y el cálculo matemático mediante un microcontrolador/DSP. Además su coste es relativamente bajo (ver tabla 3.1.) y así se consigue simplificar en gran medida, el diseño completo del sistema, por lo que se elige esta solución.

3.2.1 Dispositivos disponibles en el mercado

Analizado los CI específicos de medida comerciales, se ha restringido la búsqueda a los que permitan medir una red monofásica convencional de 2 hilos (fase y neutro) y analizado las especificaciones de éstos en base a las requeridas en el proyecto.

Dispositivo	Fabri- cante	Parámetros medidos	Otras Características	Coste unitario	1000 unidades
ADE7753	Analog Devices	P,Q,S,I _{rms} ,V _{rms}	Puerto serie Conversión E-F	4.3€	2,43€
CS5463	Cirrus Logic	P,Q,S,FP,I _{rms} ,V _{rms}	Puerto serie Conversión E-F	3,09€	1,54€
STPM01	ST	P,Q,S,I _{rms} ,V _{rms}	Conversión E-F Puerto serie Medición trifásica	4.9€	2,81€
MCP3909	Microchip	P,Q	Conversión E-F	2,37€	1,50€
71M6511	Teridian	P,Q,FP,I _{rms} ,V _{rms}	Puerto serie Salida LCD Memoria Flash	4.34€	1,92€

Tabla 3.1. Comparativa CI

Nota 1: El precio indicado en la tabla, es el menor comparando entre los distribuidores Farnell (4) y Mouser (5), para una unidad y para cantidades mayores de cara a una fabricación en serie.

Nota 2: conversión E-F es una operación que realiza el CI en la que convierte la energía medida en una frecuencia proporcional a dicha energía, y cuyo valor saca por una patilla del mismo.

Las medidas indispensables que nos tiene que proporcionar el CI, son la tensión y la corriente instantáneas del circuito al que se encuentre conectado, pero cuantas más medidas pueda proporcionar (potencia activa, reactiva, FP,...), mejor. Éstas últimas no son imprescindibles porque mediante el microcontrolador se pueden calcular, pero si se hiciera así, desde el microcontrolador se estarían solicitando valores y realizando operaciones constantemente, con lo que el uso de cpu aumentaría considerablemente y podría ser necesario utilizar un DSP (cuyo precio es mayor). Por ello se buscará seleccionar un integrado que incluya la medida de todas las variables requeridas.

Como podemos ver en la comparativa de la tabla, la mayor parte de los CI cumplen las especificaciones necesarias y sus prestaciones son similares, excepto el MCP3909 de Microchip que es más simple y de menor precio, pero lo descartaríamos frente al resto por carecer de puerto serie. De los restantes los más interesantes son el Cirrus CS5463, por su bajo precio, y el Teridian 71M6511 porque ofrece las mayores prestaciones.

Finalmente se ha optado por el Cirrus CS5463 ya que, en base a las características del proyecto, en el cual los datos recogidos serán enviados mediante el módulo ZigBee al PC, resultan innecesarias las características adicionales que ofrece el Teridian frente al Cirrus. A continuación desarrollaremos las características del mismo.

3.2.2 Características del Cirrus CS5463

Las principales funciones incluidas en el chip, importantes para este proyecto, son la linealidad en la medida alrededor del $\pm 0.1\%$ y la disponibilidad de puerto serie (SPI). Además realiza el cálculo de más magnitudes de las necesarias. Para más información, ver el datasheet del CS5463 (3).

Primero se muestra el diagrama de bloques completo del dispositivo, para tener una visión general de éste, analizando los bloques más importantes:

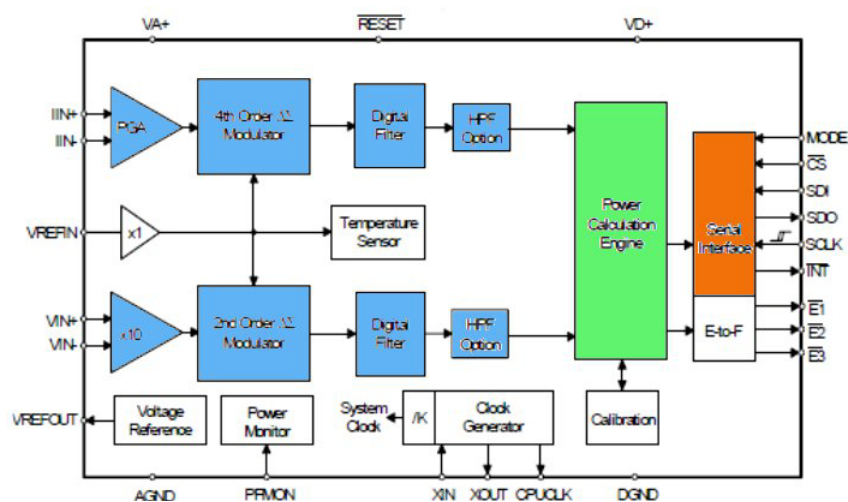


Fig. 3-2 Diagrama de funcionamiento (Imagen extraída del datasheet)

- 1) En azul tenemos los bloques de adquisición de la medida formados por:
 - Amplificador de Ganancia Programable (PGA) y Fija x10.
 - Conversor Sigma-Delta de orden 4 y 2.
 - Filtro digital, fija el ratio de datos y compensa la pendiente del filtro paso bajo.
- 2) En naranja tenemos los bloques la comunicación:
 - SPI (Serial Peripheral Interface Bus) a 3 hilos.
 - Dispone otros 3 pines de control, los cuales pueden ser prescindibles.
- 3) En verde tenemos el bloque de cálculo de las magnitudes, está explicado con detalle en el datasheet del mismo.

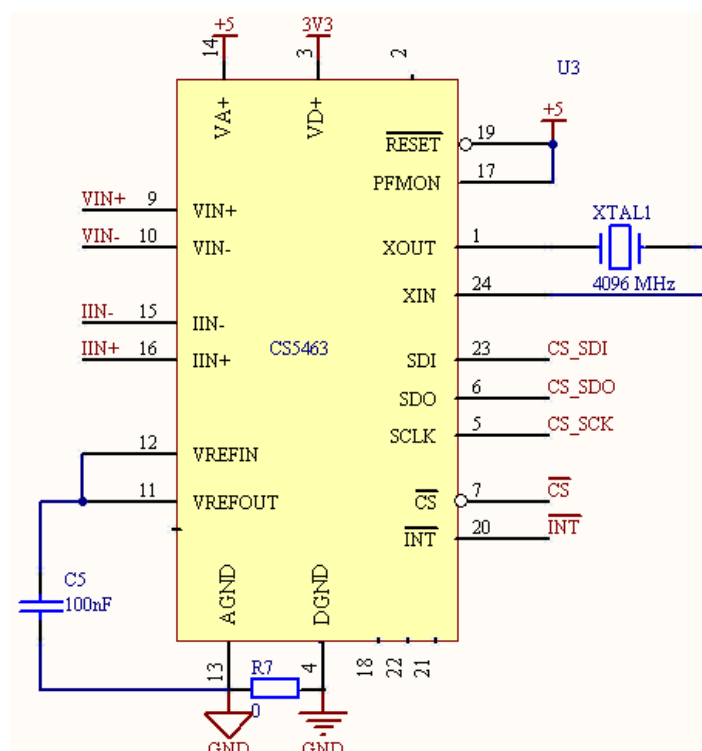


Fig. 3-3 Esquema Cirrus CS5463

- 4) Para la selección de los componentes del CS5463, siguiendo los valores recomendados en el datasheet se ha elegido un cristal de 4096 Mhz, para obtener un ciclo de computación de 1Hz y un condensador 100 nF, para fijar la tensión de referencia.
- 5) Consumo del CS5463: El inconveniente de este integrado, es que la entrada analógica VA tiene que alimentarse obligatoriamente a 5V, siendo opcional para la entrada digital que puede alimentarse a 3V3 lo que conlleva un menor consumo de potencia. Por ello en el diseño de la fuente de alimentación, se tendrá que tener en cuenta.

En principio, utilizando la configuración de tensiones de alimentación comentada, el datasheet proporciona un consumo de corriente en modo de 1,1 mA para la entrada analógica (IA+) y de 1,7 mA para la entrada digital (ID+). Como se puede observar, el consumo de éste integrado es muy bajo.

Consumo de POTENCIA	
Modo ACTIVO	11,6 mW (2,8 mA)
Modo STAND-BY	8 mW
Modo SLEEP	10 mW

Tabla 3.2 Consumo P del CS5463

3.3 Acondicionamiento de V (Sensor de tensión)

Antes de que las señales a medir V e I, sean muestreadas, éstas deben ser acondicionadas al nivel apropiado que requiera el CI, para que no se destruya, por lo que éste será un bloque común a cualquier dispositivo de medida de energía eléctrica.

En concreto, para el CS5463, se tendrá que atenuar, para que la tensión diferencial entre las entradas (VIN±) sea menor que el valor máximo que aceptan ($\cong 500\text{mV}$).

3.3.1 Alternativas y motivación de la solución adoptada

Se dispone de dos formas de realizar el acondicionamiento de la tensión, mediante un transformador o con un divisor resistivo.

El **transformador** aporta principalmente aislamiento galvánico entre la red y el sistema aunque como inconvenientes tiene unas dimensiones considerables y un precio elevado, comparado con un divisor resistivo. Por el contrario, la utilización de un **divisor resistivo** proporciona un precio y dimensiones pequeñas pero sin aislamiento galvánico.

La selección de una de las dos soluciones, condicionará radicalmente el diseño. La ventaja y gran diferencia de ambas, es el aislamiento galvánico entre el sistema y la red eléctrica. Un sistema aislado, proporcionará grandes ventajas de cara a la seguridad de los usuarios y protegerá los dispositivos de cara a posibles fallos. Por el contrario, para la carga (sistema), no es necesario dicho aislamiento por lo que es posible diseñar el sistema sin aislamiento y luego meterlo en una caja inaccesible para el usuario. Con ello se conseguirá reducir en gran medida el tamaño de nuestro sistema con un coste muy bajo.

Finalmente se ha optado por el divisor resistivo, teniendo en cuenta que se está trabajando sin aislamiento entre la red y el sistema, con todo lo que ello conlleva.

3.3.2 Diseño de la etapa de medida de tensión

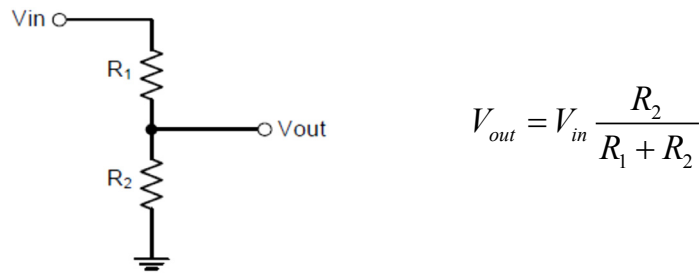


Fig. 3-4 Acondicionamiento Tensión

El valor máximo diferencial de entrada según el datasheet del CS5463 teniendo en cuenta que la entrada de VIN está equipada con un amplificador de ganancia fija 10x es de 500 mV del pico máximo al mínimo. $V_{IN+} - V_{IN-} = 500 \text{ mV}$

Por lo que la tensión máxima que puede ser aplicada al canal de tensión es de $\pm 250 \text{ mV}$. Por ello, si la señal de entrada es una onda sinusoidal de tensión de red, la máxima tensión eficaz (RMS) será:

$$\frac{250 \text{ mV}_p}{\sqrt{2}} \cong 176,78 \text{ mV}_{RMS}$$

Ahora tendremos que calcular el ratio del divisor de tensión, para que cumpla la condición anterior.

$$V_{in_{max}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \leq 176 \text{ mV}_{RMS}$$

Para dejar un margen de seguridad, se ha seleccionado como máxima tensión de entrada a VIN, $\cong 150 \text{ mV}_{RMS}$.

$$V_{red} = 230 \text{ V}_{RMS}$$

$$V_0 = V_{in+} - V_{in-} = V_{red} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \leq 150 \text{ mV}_{RMS}$$

$$R_1 \leq 653 \cdot 10^{-6} R_2$$

Opción 1	Opción 2
R2 = 1MΩ	R2 = 1688kΩ
R1 = 653Ω	R1 = 1kΩ

Tabla 3.3 Posibles configuraciones

Para la simulación se ha utilizado el programa LTspice IV (2), ajustando los resultados a valores comerciales de resistencias (R1=470Ω), para obtener aproximadamente el valor deseado a la salida $\cong 150 \text{ mV}$ y valores bajos de potencia disipada por el elevado valor de R2.

Finalmente se eligió la segunda opción, pero dividiendo R2 en cuatro resistencias de 430k, como muestra la figura 8. Con ello se consigue asegurar que un voltaje transitorio elevado no evite pasar a través de la resistencia, lo que podría ocurrir en caso de tener solo una. Al dividir R2 también se reducirá el potencial en dichas resistencias, lo que disminuye la posibilidad de un arco eléctrico y reduciremos la capacidad equivalente de la resistencia.

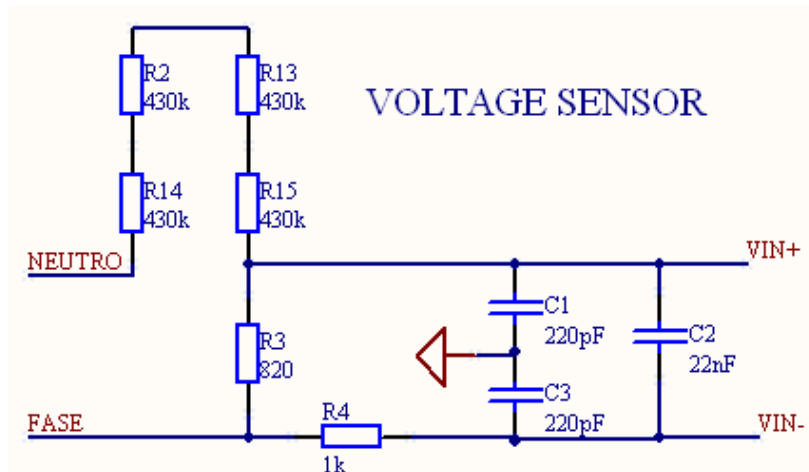


Fig. 3-5 Sensor de voltaje

Por último comentar que para los valores del filtro de entrada se seleccionaron los valores proporcionados por el fabricante, ya que va a ser utilizado en las mismas condiciones.

3.4 Acondicionamiento de I (Sensor de corriente)

La medida de la corriente resulta más difícil que la tensión por dos razones, la primera y más evidente es el mayor rango dinámico de medida, pero también tiene que medir correctamente en un rango de frecuencias mayor, por el alto contenido armónico que pueda tener la onda de corriente.

Igual que en el caso anterior, para el acondicionamiento de la corriente a medir al integrado de medida CS5463, se tiene que convertir la corriente en una tensión diferencial baja, para que entre las entradas (IIN±) se tenga menos tensión que el valor máximo que aceptan y así evitar que se destruyan.

3.4.1 Alternativas y motivación de la solución

Actualmente, las formas típicas de medir corriente son tres. Para un análisis detallado de éstas se recomienda consultar el documento “Current sensing for energy metering” de William Koon para Analog Devices, Inc. (7)

- 1) Una resistencia de muy bajo valor, Rshunt.
- 2) Un transformador de corriente.
- 3) Un sensor basado en el efecto Hall.

Ventajas y Desventajas
Ventajas de utilizar Rshunt
Considerablemente más pequeña que el resto de soluciones.
Mucho más barata.
Buena precisión y fiabilidad.
Es lineal por cual, fácil de dimensionar.
Desventajas de utilizar Rshunt
La Rshunt no está aislada de la RED, lo cual puede dar problemas.
Para medidas de alta precisión, hay que considerar la inductancia parásita.

Tabla 3.4 Ventajas y desventajas Rshunt

La elección de una Rshunt es típica en la mayor parte de aplicaciones de medida de corriente dado que es barata, pequeña, lineal y además no suele introducir desfase. Además siguiendo el criterio anterior, como no se va a aislar galvánicamente el sistema, para disminuir las dimensiones del sistema, no tiene sentido usarlo ahora. Por ello se optará por la Rshunt para el acondicionamiento de la corriente, lo cual repercutirá también en un menor coste del sistema.

Para un análisis más detallado del comportamiento de la Rshunt como sensor de corriente ver el apartado correspondiente en el mismo anexos C.

3.4.2 Diseño del circuito

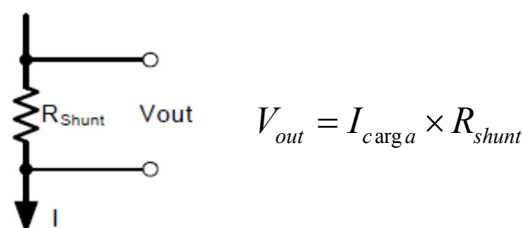


Fig. 3-6 Vout con Rshunt

Para acomodar el sistema a diferentes elementos de medida de corriente, el canal de medida de corriente IIN del Cirrus, incorpora un amplificador de ganancia programable (PGA) con dos valores de ganancia, según el valor del bit Igain del registro de configuración. Por tanto, los valores máximos diferenciales de entrada indicados en el datasheet según la ganancia seleccionada son:

Rango de entrada Diferencial	Igain	Ganancia	Ruido
± 250 mV	0	10x	22,5 uV rms
± 50 mV	1	50x	4,5 uV rms

Tabla 3.5 Valores máximos de entrada Cirrus

Para seleccionar el valor de la ganancia de entrada y del valor de Rshunt hay que tener en cuenta varios factores y el primero será la configuración de Igain a utilizar.

Como se puede ver en la tabla, el ruido respecto a la entrada, será menor con una ganancia mayor, por lo que conviene una ganancia de 50x. Otra ventaja asociada, es un valor menor de Rshunt, consiguiendo así disipación de potencia también menor.

El valor de resistencia de Rshunt ahora vendrá determinado por la corriente máxima de pico (Ipeak) que vaya a circular por la carga y el valor máximo de tensión aplicable a las entradas IIN $\cong 50mVp$. Como valor máximo de corriente, seleccionaremos (Irms=16A) \cong (Ipeak=23A), que es la máxima intensidad admisible para instalaciones interiores según la norma UNE 20.460 -5 -523 y la guía de aplicación ITC-BT-19.

Por lo tanto se tendrá que satisfacer la ecuación siguiente, con dichos condicionantes:

$$V_{out} \geq I_{peak} \times R_{shunt} \quad \gg \quad R_{shunt} \leq \frac{50mVp}{23} = 2,17m\Omega$$

Hay que tener muy en cuenta que al ser un elemento resistivo el calor generado por efecto Joule podrá ser muy elevado si la I carga es elevada. La potencia nominal de la Rshunt, se seleccionara de por lo menos de doble de la potencia disipada por esta con la máxima corriente continua por la carga.

$$P_{Rshunt} = I_{RMS}^2 \times R_{shunt} = 16^2 A \times 2m\Omega = 0,512W$$

Por comparar, se va a calcular la Rshunt para ganancia 10x y compararla con la seleccionada.

$$R_{shunt} \leq \frac{250mVp}{23} = 10,87m\Omega$$

$$P_{Rshunt} = I_{RMS}^2 \times R_{shunt} = 16^2 A \times 10m\Omega = 2,56W$$

Nos quedaría una Rshunt = 10m Ω , muy pequeña también y de precio similar. Por el contrario, la potencia disipada es bastante mayor en este caso lo que implica una resistencia más grande y cara, lo cual no nos conviene.

Resumiendo, para medir un máximo de 16A RMS se utilizará una Rshunt = 2m Ω , 2W, en concreto la que vemos en la tabla 7, comparada en Farnell (3).

Rshunt	Potencia disipada	Precio unitario	Descripción
2 mΩ	0,512 W	0,51 €	Resistencia, R002 2W 1%
10 mΩ	2,56 W	1,38 €	Resistencia, R01, 1%, 3W

Tabla 3.6 Comparativa valores Rshunt

Los valores calculados, se han comprobado mediante simulación, utilizando el programa LTspice IV (2), obteniendo valores esperados a la entrada del Cirrus $\cong 46mV \leq 50mV$.

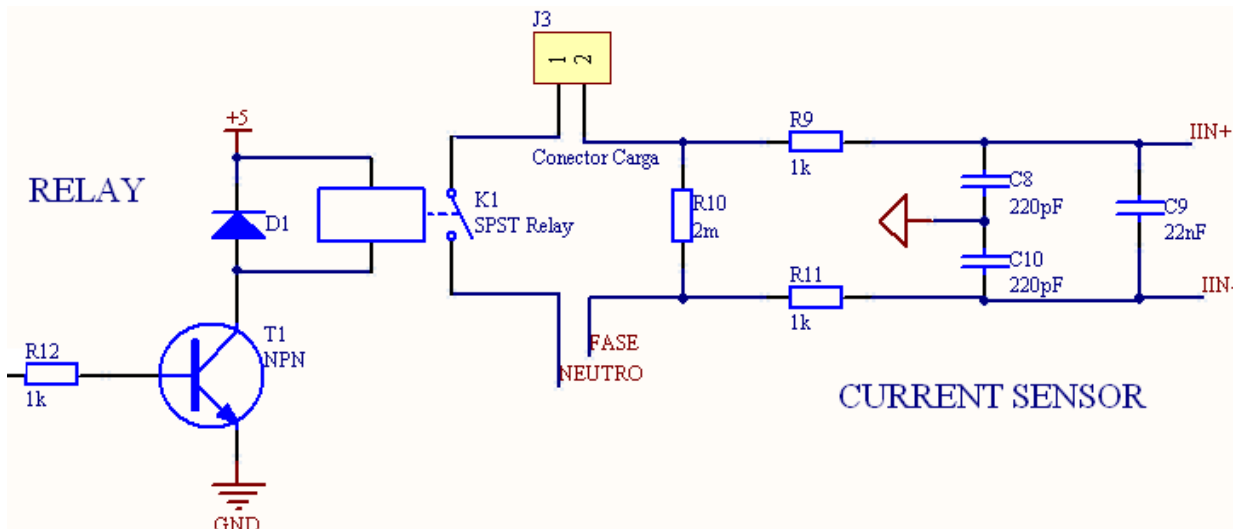


Fig. 3-7 Sensor corriente + Relé

En la imagen anterior se puede observar la etapa completa, con la carga, Rshunt (R10) y relé en serie, el cual se selecciona en el punto siguiente 3.5, control de carga.

Al igual que en el acondicionamiento de tensión, se han seleccionado los valores del filtro de entrada proporcionados por el fabricante, por ser utilizado en las mismas condiciones.

3.5 Control de la carga

Otra característica importante es la posibilidad de controlar el estado (conectada o desconectada) de la carga. La ventaja que se busca en este sistema es actuar sobre la misma inalámbricamente, a través del ordenador, pudiendo desconectarla en caso de fallo, sobrecorriente o simplemente cambiar su estado cuando se desee.

3.5.1 Alternativas y características

- 1) Relé (electro-mechanical relay, EMR)
- 2) Optoacoplador (solid-state relay, SSR)

En principio, podremos utilizar cualquiera de las dos soluciones, aunque se van a analizar esquemáticamente las ventajas y desventajas de ambos tipos de actuador. Básicamente todas ellas provienen de la construcción del EMR, que como su propio nombre indica, dispone de partes mecánicas y el SSR no.

Ventajas y Desventajas
Ventajas de utilizar EMR
Resistencia en conducción considerablemente menor ($m\Omega$)
Menor capacidad equivalente en conducción
Tipo de fallo (preferible al abrir que al cerrar)
PRECIO menor para aplicaciones que requieran tensiones y potencias elevadas.

Ventajas de utilizar SSR
Mayor velocidad de funcionamiento
Mayor vida útil y fiabilidad
Mayor tensión de aislamiento E/S
Dimensiones considerablemente menores
La conmutación no es audible

Tabla 3.7 Comparativa EMR - SSR

La motivación de la solución adoptada, está basada en la resistencia en conducción y el precio. El EMR tiene una resistencia en conducción en el rango de $100\text{m}\Omega$, mientras que los SSR de $10\ \Omega$. Con lo que gana con diferencia el EMR, lo que garantiza la posibilidad de mayores corrientes por la carga con una menor atenuación de la señal. Respecto al precio, para tensiones y potencias elevadas también es más barato el EMR.

- **Conclusión:** En este caso, como la salida conmutará en pocas ocasiones, estará la mayor parte del tiempo en conducción y tendrá capacidad de manejar corrientes importantes, un EMR será mejor opción. Además para los niveles de potencia exigidos su precio también lo será, por lo cual se elegirá un EMR para controlar la carga.

3.5.2 Características del EMR seleccionado

Se ha elegido este modelo en concreto por sus buenas características y disponibilidad, ya que en HOWLab disponían de varios relés de este modelo, aunque no cumple la totalidad de requisitos del proyecto, es válido para un primer prototipo. Esto se debe a que la corriente nominal que puede cortar es de 10A y la R_{shunt} se ha diseñado para aguantar 16A . Por ello, para futuros desarrollos esta característica debería mejorarse. Otra característica es que tiene que alimentarse a 5VDC , al contrario que la mayor parte de componentes del circuito, pero como se vio en el punto 3.2.2 de características del CS5463, éste también necesita una tensión de 5V , por lo que se encontrará disponible en el circuito.

Por otra parte, la resistencia del contacto es baja ($100\text{m}\Omega$ como máximo) por lo que es adecuado. Para las características completas, ver datasheet (7).

El consumo máximo del relé, dada una resistencia de la bobina $69,4\Omega$ y una tensión de alimentación de 5V , será de 72mA o expresado en vatios de 360mW .

3.5.3 Diseño del circuito

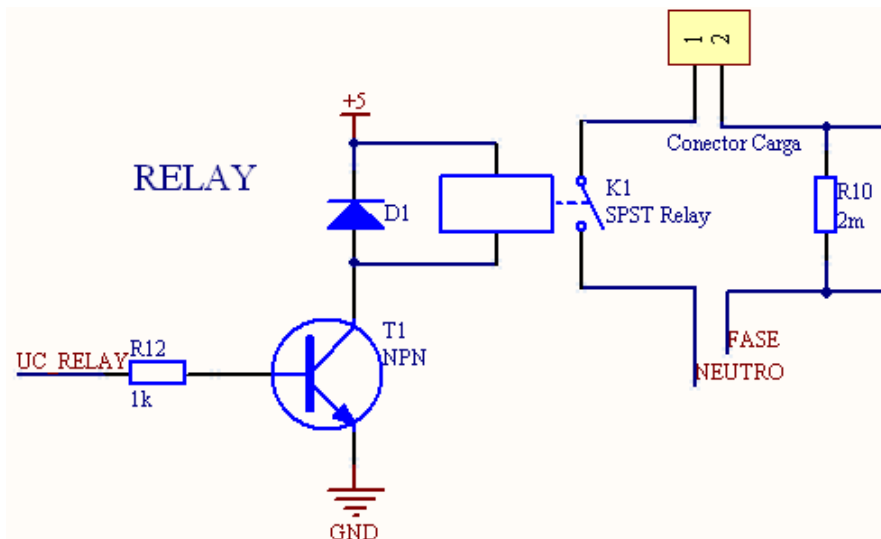


Fig. 3-8 Esquema conexiones Relé

Condición de saturación de T1: Ahora se calcula la resistencia necesaria (R12), para asegurar la saturación del transistor T1. Para ello necesitaremos las características del relé y el transistor.

$$I_C = \frac{5V - (V_{CE})_{SAT}}{R_{coil}} \cong \frac{5V}{69,4\Omega} \cong 72mA$$

$$I_B = \frac{V_{uC_Relay} - V_{BE}}{R_B} = \frac{3,3 - 0,6V}{R_B} = \frac{2,7V}{R_B}$$

$$I_B \times \beta > I_C \quad \gg \quad R_B < \frac{\cong 250 \times 2,7V}{72mA} = 9375\Omega$$

3.6 Módulo de comunicación

Este bloque está compuesto por el módulo ETRX3 de Telegesis. Tiene como misión establecer las comunicaciones entre los diferentes elementos de la red.

Una funcionalidad muy importante del sistema es la capacidad de integrarse en el sistema domótico de una vivienda, en concreto en el cuadro general de protección. Por ello se hace necesario que los datos recogidos se envíen a un PC o similar para que puedan ser analizados y esto se realizará de forma inalámbrica.

Parámetro	Definición
802.15.4	La IEEE 802.15.4-2003 define las especificaciones MAC y físicas PHY usadas en todas las comunicaciones ZigBee
dBm	Indica el nivel de potencia absoluta en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 mW.

3.6.1 Comparativa de las tecnologías inalámbricas

Así pues, se van a comparar las principales características de las diferentes tecnologías inalámbricas, basándonos en el estudio “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi” (8), aunque últimamente están apareciendo nuevas versiones, aportando mejores especificaciones.

Estándar	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi
Especificación IEEE	802.15.1	802.15.4	802.11 a/b/g
Banda de frecuencia	2,4 GHz	868/915MHz 2.4 GHz	2,4 GHz 5 GHz
Ratio de datos	1 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Rango nominal	1-100 m	10-100 m	100 m
Potencia de transmisión	0 - 10 dBm	(-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Número máx. de nodos	8	>65000	2007

Tabla 3.8 Comparativa de tecnologías inalámbricas

Estándar	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi
Dispositivo	BlueCore2	Telegesis ETRX3	CX53111
Vcc (alimentación)	1,8V	3V	3,3V
Transmisión TX	57 mA	31 mA	219 mA
Recepción RX	47 mA	25 mA	215 mA

Tabla 3.9 Comparativa de dispositivos

En resumen, Bluetooth y ZigBee son adecuados para aplicaciones con un consumo de corriente bajo, por lo que su ratio de datos es menor que en redes Wi-Fi. Por otra parte, los tres estándares tienen protocolos de encriptación de datos y mecanismos de autenticación.

Finalmente se ha seleccionado ZigBee por su bajo consumo y porque admite hasta 65000 nodos. Además, dado que el sistema smartmetering tiene que integrarse en la red de HOWLab y utilizan el estándar ZigBee se seleccionará dicho protocolo. Concretamente se utilizará el módulo hardware de Telegesis ETRX3.

3.6.2 Módulo ZigBee, Telegesis ETRX3



Fig. 3-9 Módulo ETRX3

El módulo seleccionado cumple las características deseadas y además ofrece un funcionamiento robusto coexistiendo con redes Wi-Fi y Bluetooth, algo importante dado que el sistema está pensado para ser instalado en viviendas y soporta encriptación (AES-128).

Respecto a la alimentación, permite un amplio rango de tensiones (2,1-3,6V), con un consumo, según datos del fabricante, de 25mA en recepción y 31mA en transmisión pero pueden configurarse múltiples modos de bajo consumo < 1uA.

Por último comentar que este dispositivo es muy versátil, ya que puede configurarse como dispositivo final, Router o Coordinador.

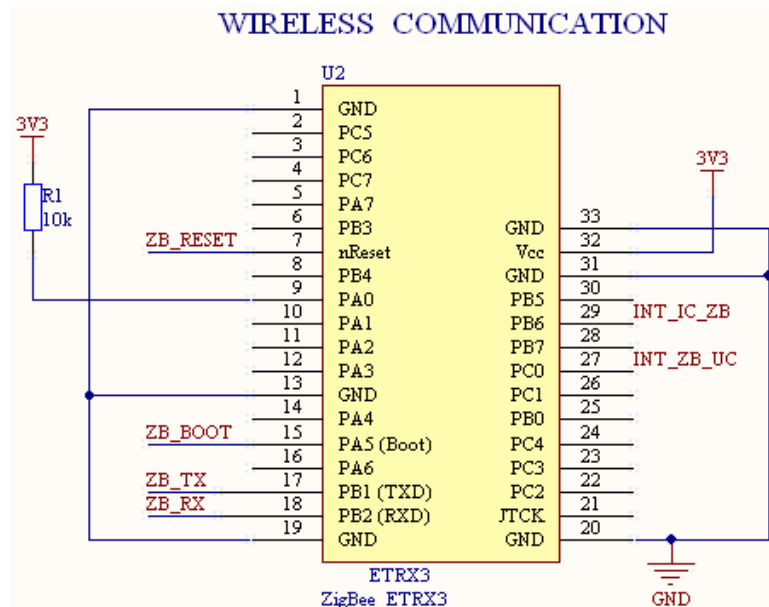


Fig. 3-10 Módulo ZigBee ETRX3

3.7 Memoria externa

La mayor parte de microcontroladores únicamente tienen memoria de programa (no volátil) y RAM (volátil). En la primera se almacena el programa a ejecutar y las variables (datos) en RAM, pero no de una forma permanente.

Tal y como se verá en el apartado 3.8.1 de selección del microcontrolador y concretamente en la figura 3-15 (Resultados de la aplicación MPS), se ha seleccionado un dispositivo que carece de EEPROM, dado que se ha preferido un microcontrolador con pines remapeables para dar mayor versatilidad futura. De todas formas, habría sido recomendable utilizar una memoria externa, ya que por cuestiones de tamaño, la cantidad de memoria EEPROM que tienen los microcontroladores que disponen de ella es baja $\leq 1\text{KB}$.

Por tanto, para almacenar los datos recogidos por el Cirrus de forma permanente, en caso de que no hubiera ningún PC almacenando las medidas y que éstas puedan ser descargadas periódicamente, será necesario un módulo externo de memoria.

Esta especificación tampoco está implementada en el prototipo pero se incorpora en el diseño de la PCB, para facilitar en gran medida el futuro desarrollo del smartmeter.

La única característica necesaria es que la memoria disponga de comunicación y preferiblemente I2C, por lo que se ha seleccionado una memoria del mismo fabricante que el microcontrolador (Microchip), con I2C, que además, tiene desarrolladas sus propias librerías en el software de programación utilizado, CCS, por lo que su implementación será muy sencilla.

3.7.1 Características de la memoria 24LC512

Memoria 24LC512 de tipo E2PROM de 64K x 8 (512 Kbit), con encapsulador SOIC8, compatible con I2C™ y más de un millón de ciclos de escritura/borrado. Otra característica interesante es que se pueden conectar hasta 8 memorias en cascada si fuera necesario, mediante los pines A0-A2.

Respecto al consumo, dispone de tecnología CMOS de bajo consumo, 400uA en modo activo y 100nA en standby.

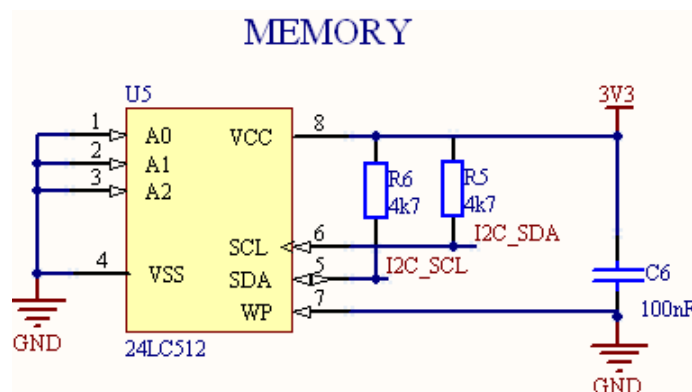


Fig. 3-11 Esquema memoria E2PROM

3.8 Microcontrolador

Hoy en día existen numerosas compañías que fabrican microcontroladores y todos ellos con similares características. Para este proyecto, el factor determinante a la hora de seleccionar el fabricante del microcontrolador, es la disponibilidad, ya que el grupo de investigación HOWLab, utiliza Microchip y estos han proporcionado los kits de desarrollo y el hardware de programación.

Por ejemplo, para el desarrollo del prototipo se ha utilizado el PICKit Demo Board, junto con el programador ICD3.

3.8.1 Criterios de selección del microcontrolador

- 1) **Tipo de aplicación:** Dado que el muestreo y cálculo de variables lo realiza el Cirrus, no serán necesarias elevadas potencias de cálculo, por lo que se seleccionará un microcontrolador frente a un DSP o microprocesador.
- 2) **Familia (Número de bits):** De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que el uC solo se encarga de la gestión del sistema, dado que las operaciones de cálculo las realiza en CS5463, seleccionaremos un uC de 8bits.

3) Elementos integrados:

- UART para comunicación ZigBee
- Módulo SPI para comunicación CS5463
- Módulo I2C para posible (futura) memoria E2PROM
- Real Time Clock (RTC)
- Módulo Timer
- Memoria FLASH
- Pines remapeables
- Siete pines para control del relé, ZigBee, Cirrus y dos LEDs de indicación.

4) **Velocidad y consumo:** Respecto a estas características, no se hacen necesarios requerimientos especiales. En cuanto al consumo, aunque el sistema se encuentra conectado a la red, dado que la finalidad es medir el gasto eléctrico con vistas a reducirlo, elegiremos un uC de bajo consumo.

5) **Precio:** Se pretende diseñar un sistema de bajo coste, por lo que el precio por cada 1000 unidades será un factor muy importante.

6) **Disponibilidad y familiaridad:** Este ha sido el factor determinante a la hora de seleccionar el fabricante del microcontrolador, ya que como ya se ha comentado, en el grupo de investigación HOWLab, utilizan Microchip.

7) Herramientas de desarrollo

Como resumen de las características necesarias, podemos ver la siguiente tabla:

Fabricante	Microchip
Familia	8bits
Comunicaciones	UART, SPI e I2C
Timers	8bits y RTC
Pines I/O	Remapeables. Siete

Tabla 3.10 Resumen de características

A partir de lo anterior y utilizando la aplicación web, Microcontroller Product Selector (9), se obtienen los siguientes resultados:

Product Family	Architecture	5K\$ Pricing	Flash (KB)	EEPROM (Bytes)	RAM (KB)	CPU Speed (MHz, MIPS)	LowPower	Comparators	ADC Channels	ADC Bits	Total UART	SPI	I2C	USB	Ethernet	LIN	CAN	Total Timers	Input Capture	PWM Channels	Parallel Port	Segment LCD
PIC18F46J50	8	2.58	64	0	3.7	[48,12]	XLP	2	13	10	2	2	2	Device				5	2	2	PMP	0
PIC18F46J11	8	2.37	64	0	3.7	[48,12]	XLP	2	13	10	2	2	2					5	2	2	PMP	0
PIC18F26J11	8	2.07	64	0	3.7	[48,12]	XLP	2	10	10	2	2	2					5	2	2		0
PIC18F26J50	8	2.28	64	0	3.7	[48,12]	XLP	2	10	10	2	2	2	Device				5	2	2		0
PIC18F25J11	8	1.79	32	0	3.7	[48,12]	XLP	2	10	10	2	2	2					5	2	2		0
PIC18F45J50	8	2.30	32	0	3.7	[48,12]	XLP	2	13	10	2	2	2	Device				5	2	2	PMP	0
PIC18F25J50	8	2.00	32	0	3.7	[48,12]	XLP	2	10	10	2	2	2	Device				5	2	2		0
PIC18F45J11	8	2.09	32	0	3.7	[48,12]	XLP	2	13	10	2	2	2					5	2	2	PMP	0

Fig. 3-12 Resultados de la aplicación MPS

La aplicación proporciona 8 posibles micros y se ha elegido de entre los de mayor memoria de programa (64KB), el más barato, con el fin de permitir la evolución del firmware en futuros desarrollos. Concretamente, el PIC18F26J11, con el encapsulado SOIC28, ya que es más fácil de soldar de cara al diseño de la PCB.

3.8.2 Selección de componentes

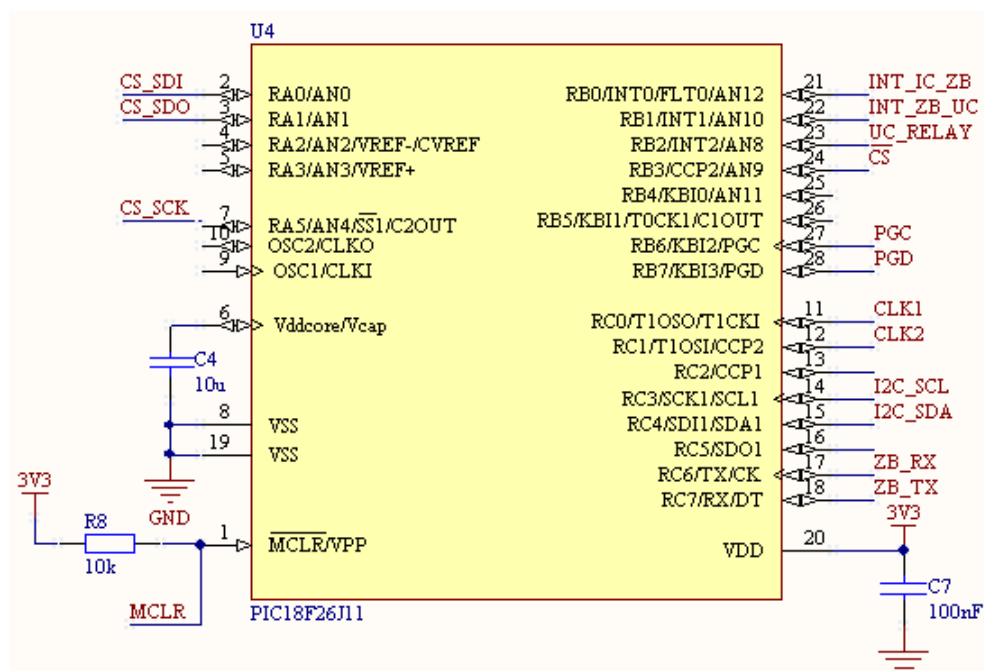


Fig. 3-13 Esquema PIC18F26J11

Se utilizarán dos condensadores, uno de ellos de desacoplo de la alimentación, el cual seleccionaremos de 100nF y el segundo, C4 (External Filter Capacitor Value) tiene como función fijar la tensión del regulador de voltaje interno cuyo valor típico recomendado en el datasheet es CEFC = 10uF.

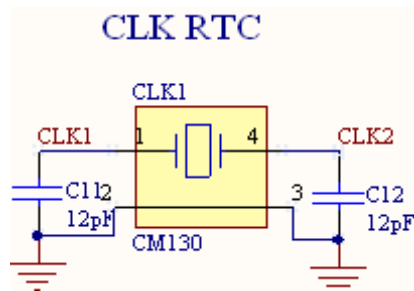


Fig. 3-14 Real Time Clock

Con el fin de permitir la evolución del proyecto, también se ha dotado al sistema de un reloj en tiempo real, con el fin de que sea posible enviar los datos recogidos, junto con la fecha y hora permitiendo una visualización más completa del consumo energético de la vivienda.

El reloj utilizado es un cristal SMD de 32.768KHZ, concretamente el CM130 de Citizen America (10). Como valor de los condensadores a colocar, se ha utilizado un valor similar al recomendado por el fabricante.

3.9 Fuente de alimentación

Dado que se ha elegido desde el principio, por cuestiones de tamaño y coste, el diseño sin transformadores y por tanto sin aislamiento, no tendría sentido seleccionarlo para la fuente de alimentación (FA), por lo que en principio se buscará un tipo de fuente sin transformador. Ahora se comentarán las prestaciones de la fuente y las diferentes alternativas.

Características de corriente de salida: Primero se ha calculado el consumo estimado de todos los componentes del sistema, para a partir de ahí, diseñar la fuente de alimentación.

CONSUMOS		
Componente	Modo ACTIVO	BAJO consumo
Microcontrolador	23 mA	2 mA y menor
Cirrus CS5463	2,8 mA	1,93 mA
Módulo ZigBee	35,5 mA	1,5 uA
Relé	72 mA (ON)	0 mA (OFF)
Memoria	400 uA	100 nA
LEDs indicadores	20 mA	20 mA
TOTAL	≈158 mA	≈24 mA

Tabla 3.11 Consumos del sistema

3.9.1 Prestaciones de la FA

En base a los elementos comentados anteriormente, se establecen una serie de prestaciones necesarias para el diseño de la FA:

- Es necesario que se alimente de la red eléctrica de 230V, 50Hz
- Proporcione dos salidas de 3,3v y 5v
- Demanda de corriente de 158 mA, más un 10% por seguridad.
- Pequeñas dimensiones
- Protección de la misma mediante fusible y varistor.

3.9.2 Alternativas posibles

De las múltiples soluciones posibles, se ha dirigido la búsqueda principalmente a fuentes de alimentación sin transformador por cuestiones de coherencia con la selección del acondicionamiento de tensión y corriente, dando como resultado las siguientes configuraciones:

- 1) **Topología Capacitiva:** Las ventajas de una FA capacitiva son claras, es significativamente más pequeña y rentable que una solución basada en transformador. Por otro lado, también es más eficiente, comparada con la topología resistiva que se verá ahora, aunque algo más cara. Obviamente, como ya se ha comentado, las desventajas de este tipo de FA es que no están aisladas de la red, lo que introduce problemas de seguridad.

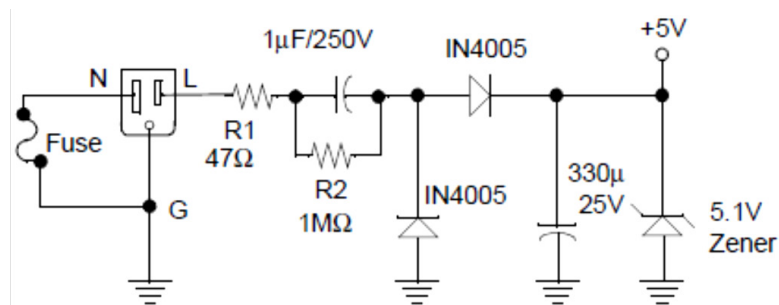


Fig. 3-15 FA capacitiva (11)

- 2) **Topología Resistiva:** Aquí tendríamos dos posibilidades, en media onda (Fig. 30) y onda completa. En principio entre ambas se elegiría la segunda opción ya que al rectificar la señal en onda completa puede proporcionar un 141% más de corriente, la tensión de salida V_o es más estable y además es más eficiente, pero la tensión de salida no está referida al terminal de fase/neutro, por lo que este tipo de diseño no es apto para el sistema.

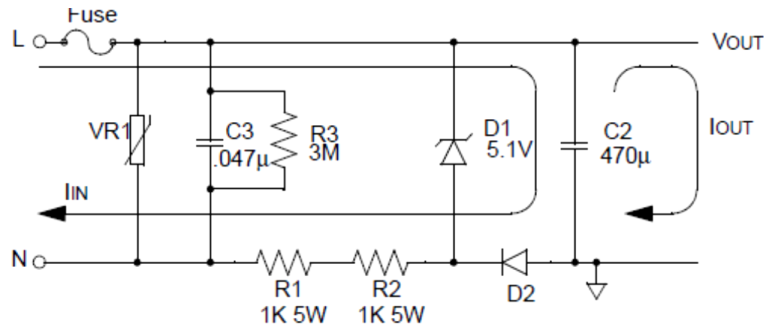


Fig. 3-16 FA resistiva en media onda (11)

El problema de estas FA es que la potencia disipada en las resistencias es muy alta para demandas de corriente medias, lo que puede dar problemas de calentamiento.

- 3) **Convertidor AC/DC integrados:** En ingles, switched-mode power supply (SMPS) y pueden incluir transformador o no, según la topología. En todo caso, aunque la solución incluya transformador, éste es de menor tamaño y peso por lo que podrá ser válido para el diseño. Además tienen una alta eficiencia lo que implica menor calentamiento.

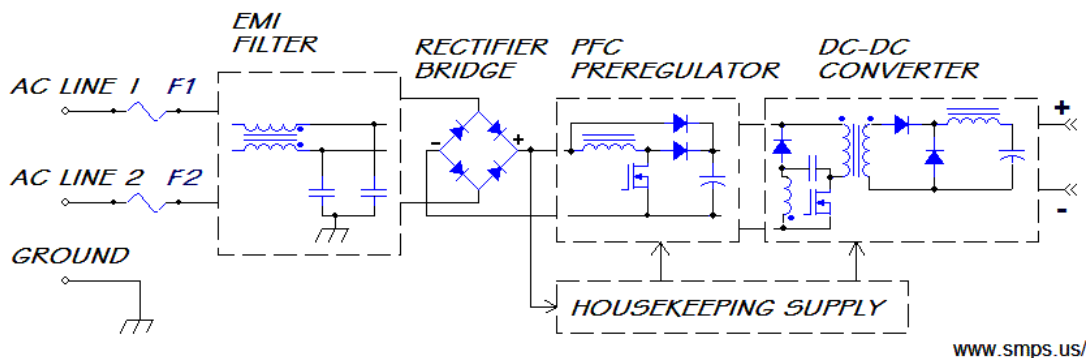


Fig. 3-17 Diagrama de bloques de una SMPS (Fuente: smeps) (12)

Las desventajas comparándolas con fuentes lineales es que son más complejas y generan ruido eléctrico de alta frecuencia que debe ser cuidadosamente minimizado para no causar interferencias a equipos próximos a estas fuentes.

Ventajas y Desventajas
Ventajas de una FA conmutada
Algo más pequeña que una FA capacitiva
Capacidad de suministro de I alta
La FA conmutada es mucho más eficiente
Desventajas de una FA Conmutada
El coste es mayor que en el resto
Puede estar aislada de la tensión de red o no, según la topología utilizada
Generan ruido eléctrico de alta frecuencia
Diseño complejo

Tabla 3.12 Ventajas y desventajas FA conmutada

- 4) **Motivación de la solución:** Respecto alternativas a las anteriormente comentadas, se ha seleccionado como criterio principal el tamaño y el coste, especialmente para el caso de una futura fabricación en serie de unidades. En las dos tablas siguientes, podemos ver el coste final de la FA capacitiva y del convertor AC/DC conmutado.

Fuente de alimentación	Precio una unidad	Precio 100 unidades
Capacitiva	7,57 €	6,3 €
Conmutada (TRACO)	15,60 €	13,38 €

Tabla 3.13 Comparativa precios FA

El diseño y cálculo de componentes de la fuente capacitiva, puede consultarse en el anexo B, obteniendo los resultados mostrados en la figura:

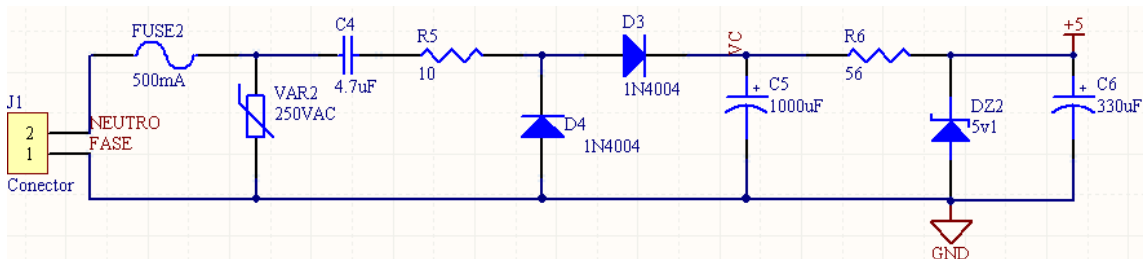


Fig. 3-18 Diseño FA capacitiva

En principio, la FA capacitiva es de un tamaño algo mayor, dado el que son necesarios bastantes componentes y los condensadores ocupan bastante espacio pero por el contrario el precio es considerablemente menor.

De todas formas, para el primer prototipo, por motivos de seguridad utilizaremos una fuente de alimentación conmutada integrada, en concreto una Traco ya que dentro de este tipo de FA ofrece unas buenas prestaciones y el precio más bajo. Concretamente se utilizará el modelo TMLM 04253, porque dispone de dos salidas (5V y 3V3).

Potencia	Salida 1	Salida 2	Eficiencia	Tamaño
3.5W	5VDC/600mA	3.3VDC/150mA	72%	36.5x27mm

Tabla 3.14 Características Traco TMLM 04253

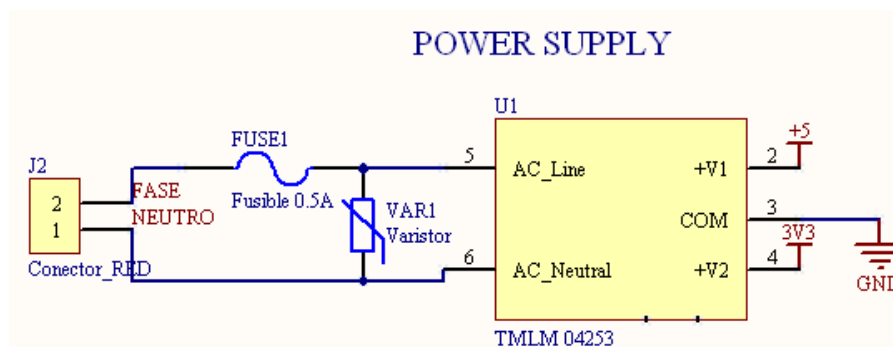


Fig. 3-19 Esquema FA Traco

Para ver el esquemático completo, ir al capítulo 5, diseño de la PCB.

4 CAPITULO 4: DISEÑO DEL FIRMWARE

En este capítulo se va a detallar el proceso global de diseño del firmware. Primero se explicará el diagrama de flujo principal del sistema, para tener una visión general del funcionamiento del sistema. Después se planteará una división inicial del software a partir de los elementos del hardware, para luego ir detallando cada bloque y las diversas librerías desarrolladas. Finalmente se explicará el protocolo de comunicaciones utilizado, basado en el protocolo de comunicaciones de HOWLab.

Para el desarrollo del firmware, se han utilizado los siguientes programas:

- CCS (Custom Computer Services) (11) versión demo de 45 días, con funcionalidad completa aunque requiere estar conectado a internet para ejecutar el compilador.
- MPLAB versión 8.60, de Microchip (12).

4.1 Planteamiento del diseño

Inicialmente se parte del grafo de estados para poco a poco ir explicando el funcionamiento global del sistema, es decir, la configuración e inicialización de los periféricos, las librerías y las funciones desarrolladas.

4.1.1 Grafo de estados

Con el fin de simplificar el grafo de estados del sistema, se han agrupando bloques que realizan funciones similares.

El primer bloque no realiza ninguna función y únicamente se pasa por él al alimentar el sistema o tras un reset. Después se produce la inicialización del hardware del sistema que así lo requieran (microcontrolador, ZigBee, CS5463 y la memoria) y se pasa al estado inactivo. Ahí permanecerá hasta que se reciba un mensaje por ZigBee o hasta que se llegue al tiempo establecido, con el CS5463 funcionando correctamente y se proceda a la lectura y envío de magnitudes. Tras alguna de estas operaciones, el sistema volvería al estado inactivo.

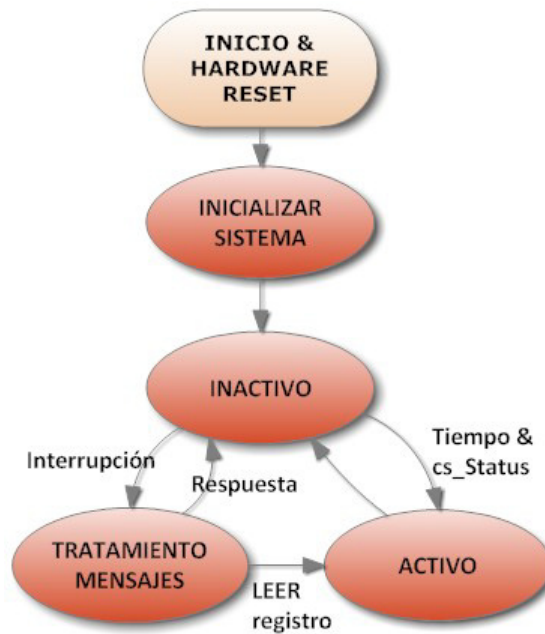


Fig. 4-1 Diagrama de bloques principal

A continuación se ampliará cada uno de los bloques anteriores, con todas las funciones que realizan. Para más información, consultar el código y la documentación realizada mediante Doxygen, en el anexo D.

- 1) **INICIALIZAR SISTEMA:** Primero se produce la inicialización de variables y registros de todo el hardware del sistema.

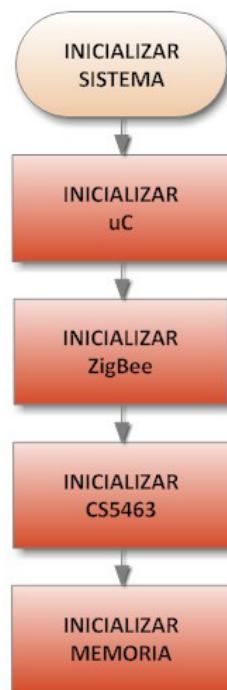


Fig. 4-2 Diagrama bloques inicialización

- Iniciar uC:** Se encuentra dividido en dos funciones. La primera habilita y configura los elementos hardware del microcontrolador y la segunda borra los flags de interrupción indicados y habilita las interrupciones. La primera función, `Initiate_uC`, habilita los módulos de comunicación RS232 (ZigBee), SPI (Cirrus) e I2C (memoria E2PROM), el timer 0 y el watchdog timer (WDT) y por último el oscilador interno. En la segunda función habilitamos las interrupciones de RS232 (dato recibido, RDA) y el timer 0 (para temporizar el envío de datos por ZigBee).
- Inicializar ZigBee:** Como se puede ver en el capítulo anterior, el dispositivo ZigBee elegido es el ETRX3 del fabricante Telegesis. Por ello para su manejo deberán utilizarse el conjunto de comandos “Telegesis AT-Commandset” basados en las características de ZigBee® PRO. Para más información sobre los comandos AT ver la documentación del fabricante (14).

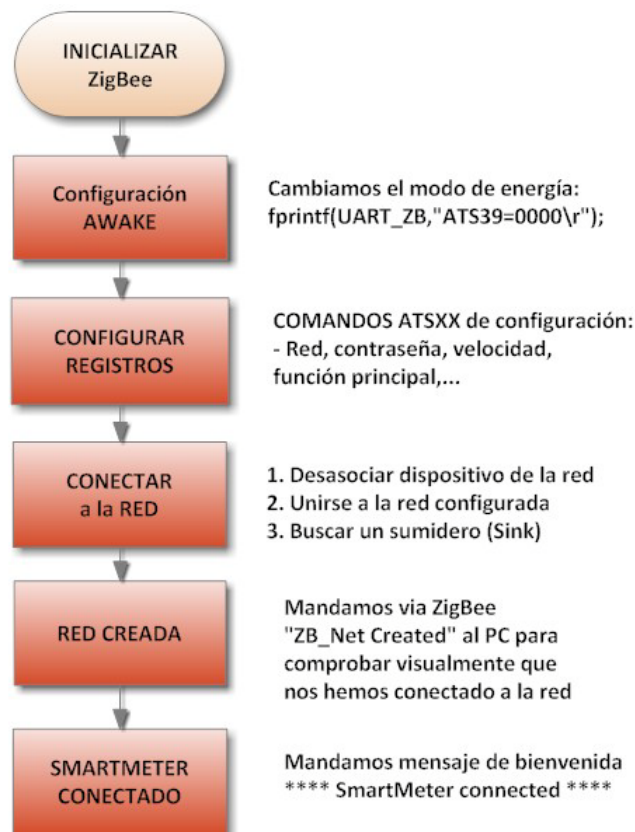


Fig. 4-3 Diagrama bloques inicialización ZigBee

- Inicializar CS5463:** El Cirrus se configura y maneja mediante comandos, principalmente de lectura y escritura, mediante los cuales se leen o modifican registros (de configuración, variables calculadas, estado del mismo,...) para más información ver datasheet, páginas 23-36 (3). Así pues, para inicializarlo tendremos que escribir los datos propios de configuración y calibración en los

registros correspondientes y para ello se utiliza el protocolo SPI. Entonces el primer paso será sincronizar la comunicación uC >> Cirrus, para después escribir los parámetros de configuración (ganancias, HPF,...) tal y como se muestra en el diagrama siguiente:

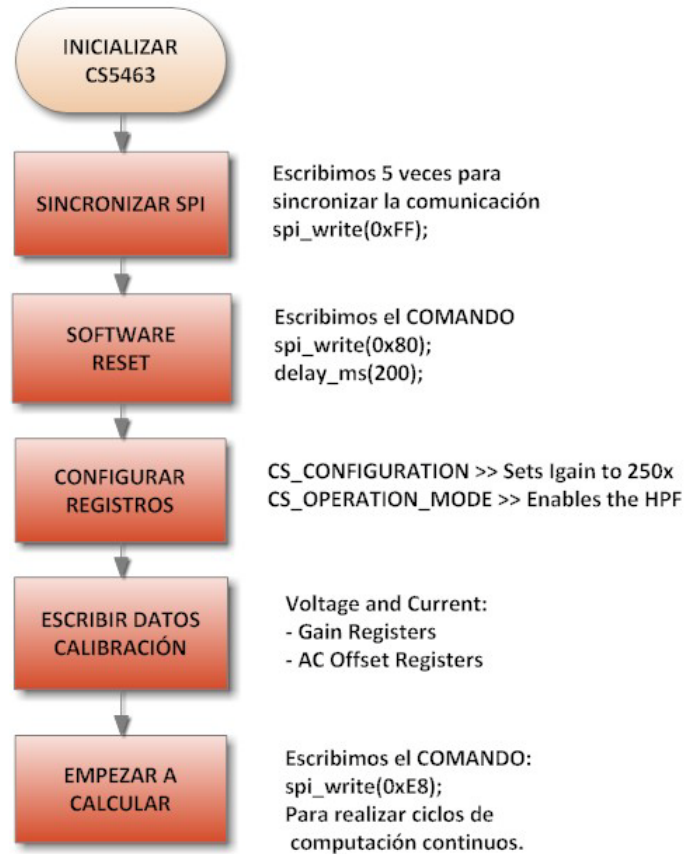


Fig. 4-4 Diagrama bloques inicialización Cirrus

- **Inicializar MEMORIA (24LC512):** Como se comentó en el apartado 3.7. de selección de la memoria externa, ésta ya dispone de librerías (drivers) desarrollados por CCS, por lo que para iniciarla, únicamente habrá que llamar a la función `init_ext_eeprom()` antes de llamar a cualquier otra función de la misma.
- 2) **Estado ACTIVO:** En este estado, se procede a la lectura y envío de datos periódicamente vía ZigBee, o a la lectura del registro pedido vía mensaje. Para ello serán necesarias las funciones explicadas en el punto 4.1.3.1 Librerías Cirrus CS5463.



Fig. 4-5 Estado ACTIVO

- 3) **Estado INACTIVO:** En este estado se comprueba que ha pasado un tiempo fijado y que el Cirrus está operando correctamente, para proceder a la lectura de la potencia consumida. Para comprobar el correcto funcionamiento del Cirrus, se testea un bit específico del registro CS_STATUS del mismo y si no está activo, se resetea.

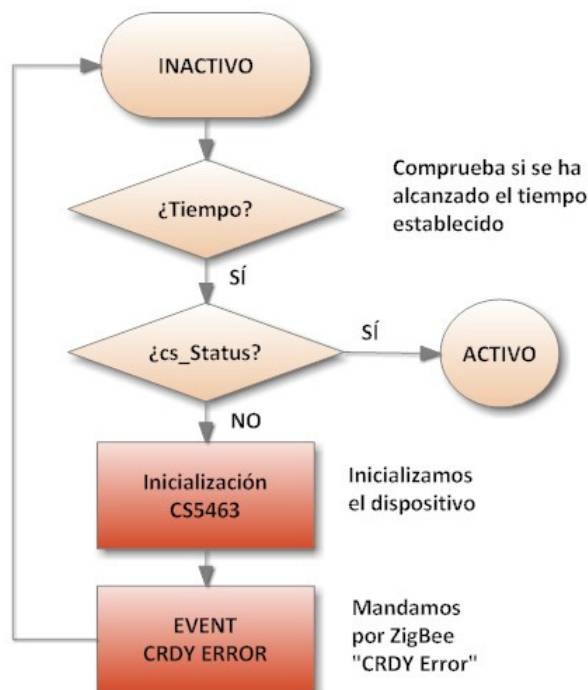


Fig. 4-6 Estado INACTIVO

- 4) **TRATAMIENTO MENSAJES:** Al recibir un mensaje, estando en el estado inactivo, se salta al de tratamiento de mensajes, en el cual se descodifica el mismo según el protocolo de comunicación utilizado (ver apartado 4.2)

Mediante un mensaje enviado desde el PC, se podrán modificar todos los registros, además de llamar a todas las funciones programadas, gracias a la función siguiente del CCP:

```
void SelectFunction (void)
This function checks if the incoming message is correct
You have to use the command at+ucastb:XX,000D6F0000354A07
XX=Number in hex of data bytes to be sent
Then you send the data in HEX. Example: 10F10001.
```

Tabla 4.1 Tratamiento de mensajes, CCP.

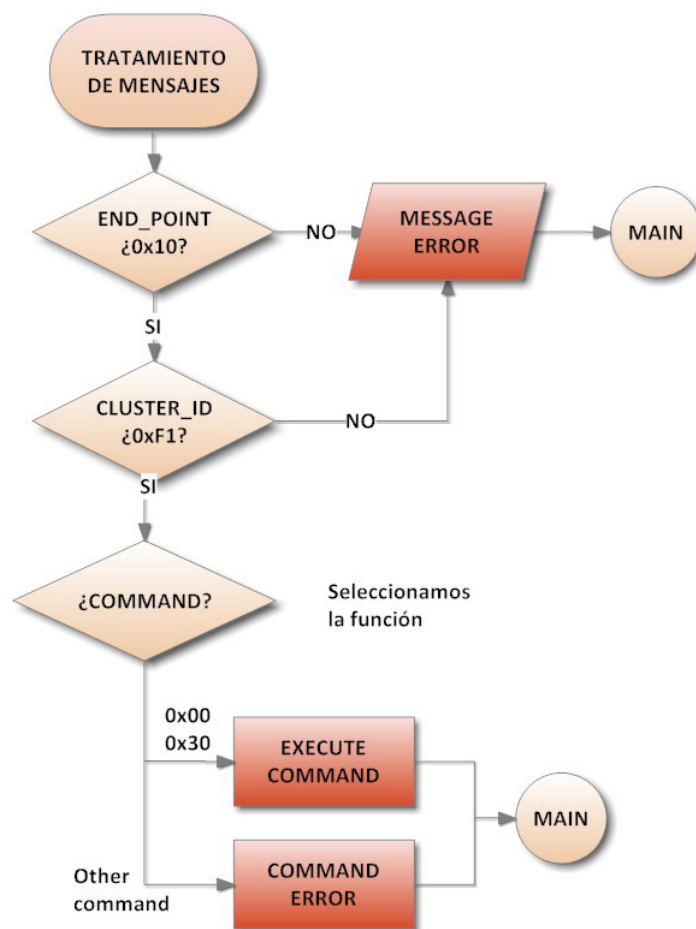


Fig. 4-7 Diagrama flujo interrupción ZigBee

En el bloque “EXECUTE COMMAND” se ejecutará el comando indicado en la variable “COMMAND” tal y como se verá en el apartado 4.2.1, de comandos implementados.

4.1.2 Definición de capas de la estructura firmware

Observando, el diagrama de bloques del sistema, se ve que se tienen cinco elementos hardware a controlar (Cirrus, microcontrolador, ZigBee, relé y memoria), aunque estos dos últimos no requieren de una librería concreta. En el caso del relé, porque únicamente es necesario controlar un pin del micro y para la memoria porque el software utilizado (CCS), ya dispone de librerías específicas para el mismo. Por tanto, se realizará una primera división principal del software del sistema, en los cuatro elementos comentados y en base a esto, se establece una estructura de capas del firmware.

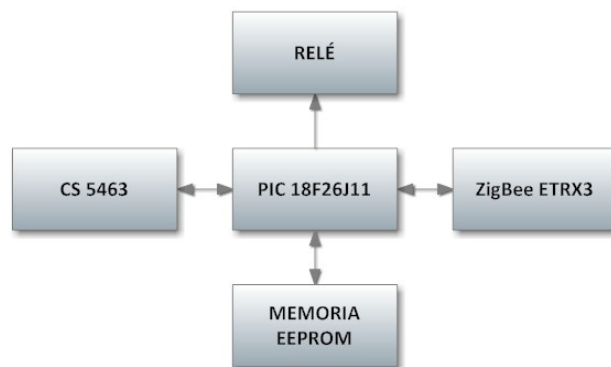


Fig. 4-8 Bloques hardware a controlar

La finalidad de estructurar el código en capas es posibilitar la reutilización del firmware desarrollado y que además, tenga mayor legibilidad. Para este proyecto, se ha optado por definir tres capas, según la posibilidad futura de reutilización del software.

Por otra parte, comentar que cada bloque constituye un módulo formado por los archivos (.c y .h), los cuales incluirán el siguiente código:

En los ficheros .h	En los ficheros .c
- Definición de variables globales	- Enlaces a otros ficheros (#includes)
- Definición de constantes	- Definición de funciones
- Prototipado de funciones	- Código del programa

Tabla 4.2 Contenido ficheros programación

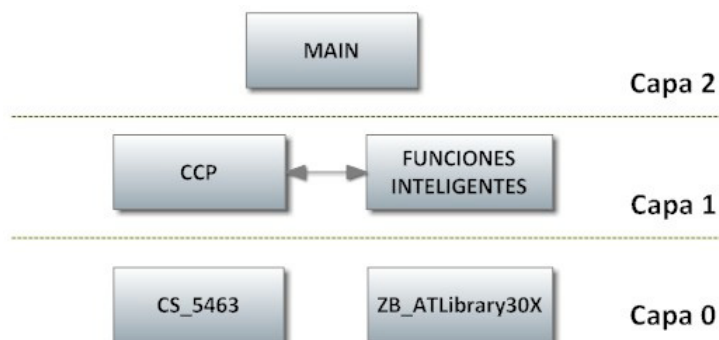


Fig. 4-9 Capas firmware

- **Capa 0:** Es capa inicial y por tanto más próxima al hardware y reutilizable. En ella se ha implementado un .c y .h por cada dispositivo a controlar, el ZigBee y el CS_5463.
- **Capa 1:** Esta capa se apoyará en las funciones de la capa anterior y proporcionará datos a las de la capa superior. Incluye el módulo CCP (Cluster-Based Communication Protocol de HOWLab), con las funciones que implementan el protocolo de comunicaciones en sus dos versiones, nodo >> PC y viceversa y funciones inteligentes que convierten el valor medido por el Cirrus (capa 0), a decimal, como se verá en el apartado 4.1.3.3.
- **Capa 2:** La última capa es la que gestiona la funcionalidad del dispositivo apoyándose en las anteriores. Incluye la configuración del microcontrolador y el diagrama de flujo del sistema. Main (Programa principal)

4.1.3 Librerías y firmware desarrollado

En este apartado se comentan de forma general, todas las librerías y firmware utilizado en el proyecto y se explican en detalle las desarrolladas por el autor.

4.1.3.1 Librerías Cirrus CS5463

Para el presente proyecto se han desarrollado al completo las librerías del Cirrus CS5463, la cual incluye todas las funciones básicas que permiten configurar y medir con el dispositivo. Por ello el código es completamente reutilizable para otros proyectos que utilicen dicho dispositivo.

En la imagen siguiente, podemos ver una lista con todas las funciones implementadas, con su correspondiente descripción (en inglés), generada mediante el programa Doxygen (16) aunque adaptada a mano para este apartado. Este programa lee las descripciones escritas por el programador y genera un archivo HTML muy completo con ellas.

void	<p>cs_readRegister (unsigned int8 reg, unsigned int8 page)</p> <p>Reads the register indicated in reg.</p> <p>Parameters:</p> <p> reg Indicates the register to read from (It's the address)</p> <p> page Indicates the page of the register</p> <p>Returns:</p> <p> Data read from register</p> <p>See page 24 and 25 of CS5463 datasheet with the whole list of registers</p>
------	--

void	<p>cs_writeRegister (unsigned int8 reg, int8 page, unsigned int32 cs_Data_to_write)</p> <p>Writes data to the indicated register.</p> <p>Parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> reg Indicates the register to write page Indicates the page of the register cs_Data_to_write Four bytes array with the data to write in the register <p>See pag 24 and 25 of datasheet for the whole list of registers and the next pages for the complete explanation of them.</p>
void	<p>cs_SoftwareReset (void)</p> <p>This function makes a reset of the device. After a Software Reset, the internal registers will be reset to their default values.</p> <p>It is a command. See page 23 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_PowerState (unsigned int8 cs_PowerMode)</p> <p>For manage Cirrus power-down states. In stand-by state only the A/D clock generators and the command decoder, is turned on and in the sleep state all circuitry only the command decoder is turned on, so initialization is slower.</p> <p>Parameters:</p> <ul style="list-style-type: none"> cs_PowerMode Indicates the power state mode of CS5463 01 = Halt and enter stand-by power saving state. 10 = Halt and enter sleep power saving state. <p>It is a command. See pag 23 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_Initialization (void)</p> <p>Writes Cirrus configuration registers:</p> <ul style="list-style-type: none"> CS_CONFIGURATION, CS_CYCLE_COUNT, CS_OPERATION_MODE and CS_CONTROL. <p>See CS5463 datasheet for more information.</p>
void	<p>cs_WriteCalibrationData (void)</p> <p>Writes Cirrus register that include calibration data:</p> <ul style="list-style-type: none"> CS_CURRENT_DC_OFFSET (Don't use if IHPF is enabled) CS_VOLTAGE_DC_OFFSET (Don't use if VHPF is enabled) CS_CURRENT_GAIN, CS_VOLTAGE_GAIN CS_CURRENT_AC_OFFSET, CS_VOLTAGE_AC_OFFSET and CS_POWER_OFFSET <p>See CS5463 datasheet for more information.</p>
void	<p>cs_StartConversions (void)</p> <p>It is a command that initiates acquiring measurements and calculating results for Cirrus continuous computation cycles.</p> <p>See pag 23 of CS5463 datasheet.</p>

void	<p>cs_ReadInstantaneousMeasures (void)</p> <p>Reads instantaneous measures registers I(t), V(t), P(t), Q(t).</p> <p>Returns: Data read from next registers</p> <p style="text-align: center;">CS_INSTANTANEOUS_CURRENT, CS_INSTANTANEOUS_VOLTAGE, CS_INSTANTANEOUS_POWER, CS_INST_REACTIVE_POWER</p>
void	<p>cs_ReadRMSmeasures (void)</p> <p>Reads RMS measures register (Irms, Vrms)</p> <p>Returns: Data read from next registers</p> <p style="text-align: center;">CS_RMS_CURRENT, CS_RMS_VOLTAGE</p> <p>See pag 28 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_ReadPeakMeasures (void)</p> <p>Reads PEAK measures registers (I_peak, V_peak)</p> <p>Returns: Data read from next registers</p> <p style="text-align: center;">CS_PEAK_CURRENT, CS_PEAK_VOLTAGE.</p> <p>See pag 31 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_ReadAverageMeasures (void)</p> <p>Reads average (AVG) measures registers (P_avg, Q_avg,S)</p> <p>Returns: Data read from next registers</p> <p style="text-align: center;">CS_ACTIVE_POWER, CS_AVERAGE_REACTIVE_POWER, CS_APPARENT_POWER, CS_POWER_FACTOR</p> <p>See pages 28, 31 and 32 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_ReadCalibrations (void)</p> <p>Reads all the registers with calibrations information (calibration registers) and configuration registers, too. So this function shows all the registers included in cs_Initialization and cs_WriteCalibrationData in order to check if they are correct.</p> <p>See the function above or Cirrus datasheet.</p>
void	<p>cs_SystemCalibration (unsigned int8 cs_channel)</p> <p>Performs the designated calibration.</p> <p>See page 25 of datasheet and it is necessary to read pages 37-39, too.</p> <p>Current and Voltage channel: DC offset, DC gain, AC offset and AC gain.</p>
void	<p>cs_OffsetCalibration (void)</p> <p>Performs the necessary actions for an offset calibration.</p> <p>See page 37 of CS5463 datasheet.</p>
void	<p>cs_GainCalibration (void)</p> <p>Performs the necessary actions for a gain calibration.</p>

	See page 38 of CS5463 datasheet
void	cs_5463Status (void) Checks the following STATUS BITS and send a message if anyone is activated. DRDY, CRDY, IOR, VOR See STATUS_REGISTER in page 29 of CS5463 datasheet.

Tabla 4.3 Librerías CS5463

Ahora se muestra el diagrama de flujo de las principales funciones implementadas, para ilustrar como se han realizado:

- 1) **cs_readRegister**: Esta función permite leer cualquier registro del Cirrus, pasándole como argumento el número de registro y la página en que se encuentra. La lista de registros con el número que tienen asociado, puede consultarse en el anexo C.

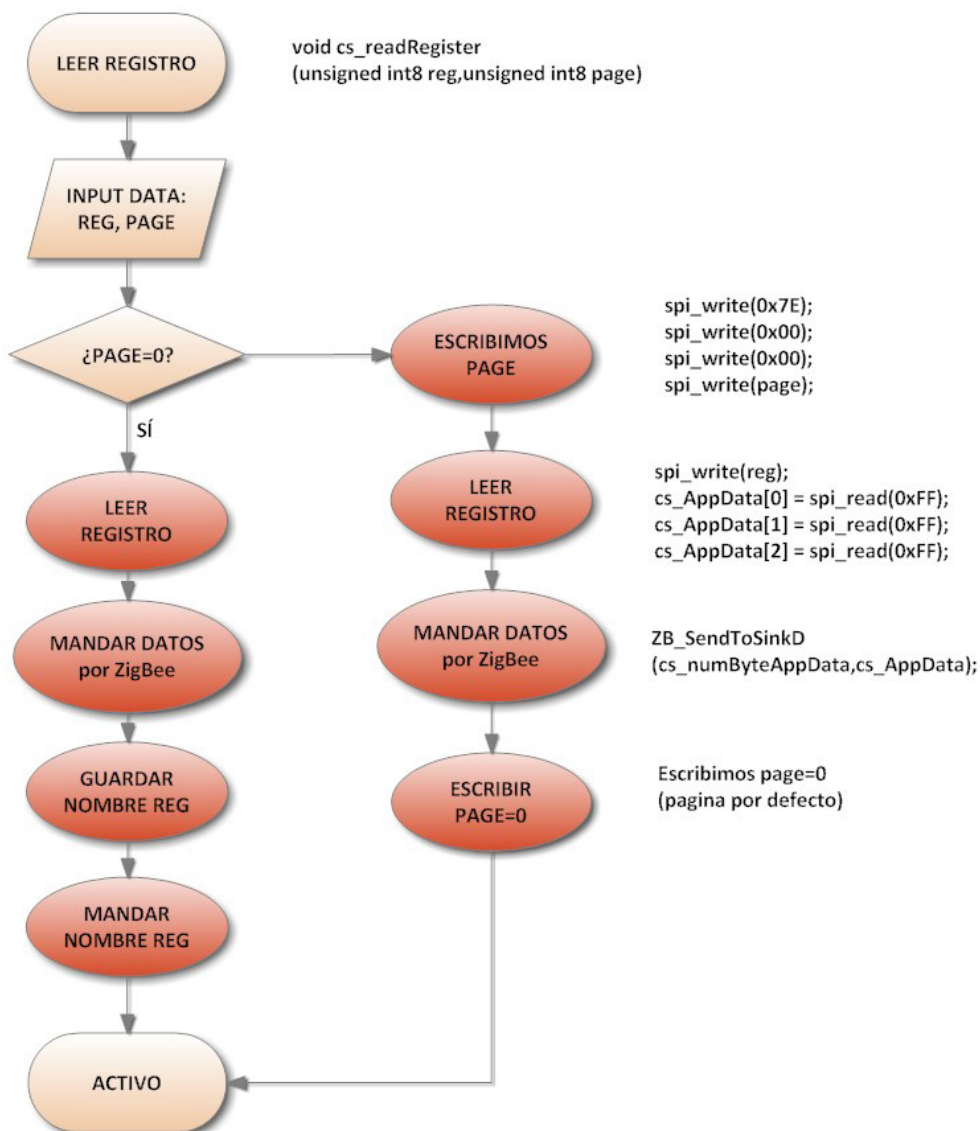


Fig. 4-10 Diagrama flujo cs_readRegister

2) Comandos de lectura de medidas:

COMANDOS CS5463 Lectura medidas (Print live info)		
cs_ReadInstantaneousMeasures	I, V, P, Q, S, FP	Lee los valores instantáneos
cs_ReadRMSmeasures	Irms, Vrms	Lee los valores RMS
cs_ReadPeakMeasures	Ipeak, Vpeak	Lee los valores de PICO
cs_ReadAverageMeasures	Pavg, Qavg	Lee los valores de MEDIOS

Tabla 4.4 Comandos Lectura medidas

Como último ejemplo de las funciones implementadas en el Cirrus, se va a mostrar el diagrama de flujo general para la lectura de cualquiera de las variables medidas por el dispositivo. Al llamar a alguna de las funciones de la tabla 4, el bucle a realizar para cada registro leído será el mostrado en la figura siguiente:

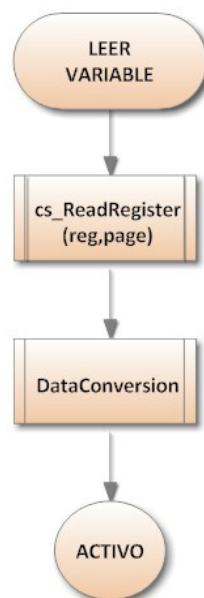


Fig. 4-11 Diagrama de flujo para leer una variable

Como se puede observar, las funciones para leer variables, se apoyan en las tres funciones básicas más importantes, `cs_readRegister` que ya ha sido explicada, `DataConversion` y `ZB_SendToSinkD` que serán comentadas posteriormente.

4.1.3.2 Librerías ZigBee

Estas son las funciones desarrolladas por el grupo de investigación HOWLab, las cuales fueron suministradas para facilitar el manejo del dispositivo ZigBee de Telegesis, ya que implementa los comandos que proporciona el fabricante para manejarlo. Para profundizar en los comandos AT, ver la guía de Telegesis incluida en la documentación (15).

En este apartado solo se muestran tres de las funciones de la librería, que son las utilizadas en este proyecto, para manejar el módulo ZigBee. Para ver la lista completa, ver la tabla completa en el anexo E o la documentación generada por Doxygen.

void	ZB_SendToSinkD (int8 nDatos, int8 *Datos) Send data in binary to the Sink. Parameters: nDatos number of data to send *Datos pointer to a byte array with the data to send
void	ZB_StartUpNet (void) Connect the Zigbee device to the preconfigured network.
void	ZB_TGBootloader (void) Function to configure the Zigbee device the first time. Today the content of the register must be change by hand in order to fix the correct parameters

Tabla 4.5 Librerías ZigBee

4.1.3.3 Firmware Funciones Inteligentes

Estas funciones facilitan la lectura de los registros que contienen variables medidas o calculadas del Cirrus. Mediante las tres primeras, se visualizan en pantalla los valores, en hexadecimal, de todos los registros de la capa indicada. Sin embargo mediante las otras dos, DataConversion y SignedDataConversion, se posibilita la conversión de hexadecimal a decimal, permitiendo una rápida comprensión de las variables leídas.

void	cs_ReadPage0 (void) Reads all Page 0 registers See page 24 of CS5463 datasheet for the complete list.
void	cs_ReadPage1 (void) Reads all Page 1 registers. See pag 25 of CS5463 datasheet for the complete list.
void	cs_ReadPage3 (void) Reads Page 3 registers It is a register. See pag 25 of CS5463 datasheet for the complete list.
void	DataConversion (unsigned int8 DatosVAR[3], unsigned int8 Gain) Converts the UNSIGNED registers value in a decimal number Parameters: DatosVAR[3] This variable contains the data read with cs_readRegister Gain Number for select if the measure is V, I,...
void	SignedDataConversion (int8 DatosVAR[3], unsigned int8 Gain) Converts the SIGNED registers value in a decimal number The same parameters that the function just above.

Tabla 4.6 Librerías funciones inteligentes

A continuación se explica otra función muy importante, ya que permite visualizar en el PC, el valor decimal de las variables medidas por el Cirrus.

Se parte del valor medido, el cual es almacenado en un registro de 3 bits del Cirrus. Después en el datasheet, para cada registro hay una tabla como la siguiente, que nos indica cómo convertir el valor del registro a decimal.

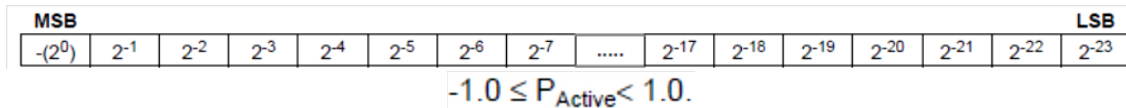


Fig. 4-12 Signed register

Así se ve que esta variable podrá tomar valores entre -1 y 1 al convertirla según la tabla anterior, por lo que se trata de una variable con signo. Sin embargo, en este otro caso, se trata de una variable sin signo.

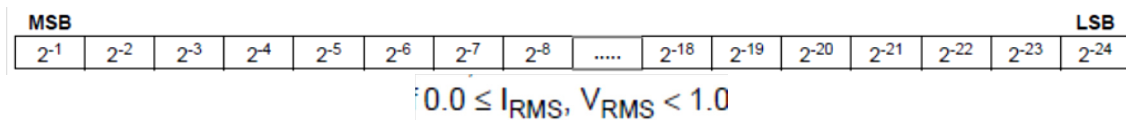


Fig. 4-13 Unsigned register

Se puede observar, que las variables están codificadas en coma fija y el datasheet únicamente nos indica visualmente el número de bits reservados para las partes entera y decimal y la posición de la coma decimal (binary point).

La conversión del sistema binario al decimal se realiza multiplicando cada bit por su valor significativo $2^{-i} = 1/2^i$, siendo i el número de orden que ocupa.

Ahora a partir del valor del registro, se tendrá que convertir la variable a un valor fácilmente reconocible por el usuario. Para ilustrar este paso, se utilizará la imagen siguiente:

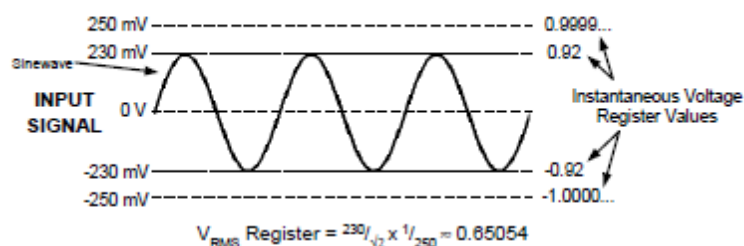


Fig. 4-14 Conversión de valores (Fuente: Datasheet del Cirrus) (3)

Como se puede observar, para una amplitud de 250mV, el valor almacenado en el correspondiente registro será de 0.9999, para 230mV de 0.92 y así sucesivamente, al igual que sucede con valores negativos. Esto indica que los valores almacenados en los registros indican el valor medido relativo al máximo que puede medir el dispositivo en sus entradas (250mV).

En base a lo anterior, para calcular el valor medido por el dispositivo a partir del valor leído del registro tendremos que realizar la operación contraria:

$$ValorREG = ValorMED \times \frac{1}{250} \Rightarrow ValorMED = ValorREG \times 250$$

Esta primera parte, es decir, todos los pasos seguidos, están englobados en el diagrama de flujo de la función DataConversion (Fig. 4-16), en el bloque “Realización de la conversión”.

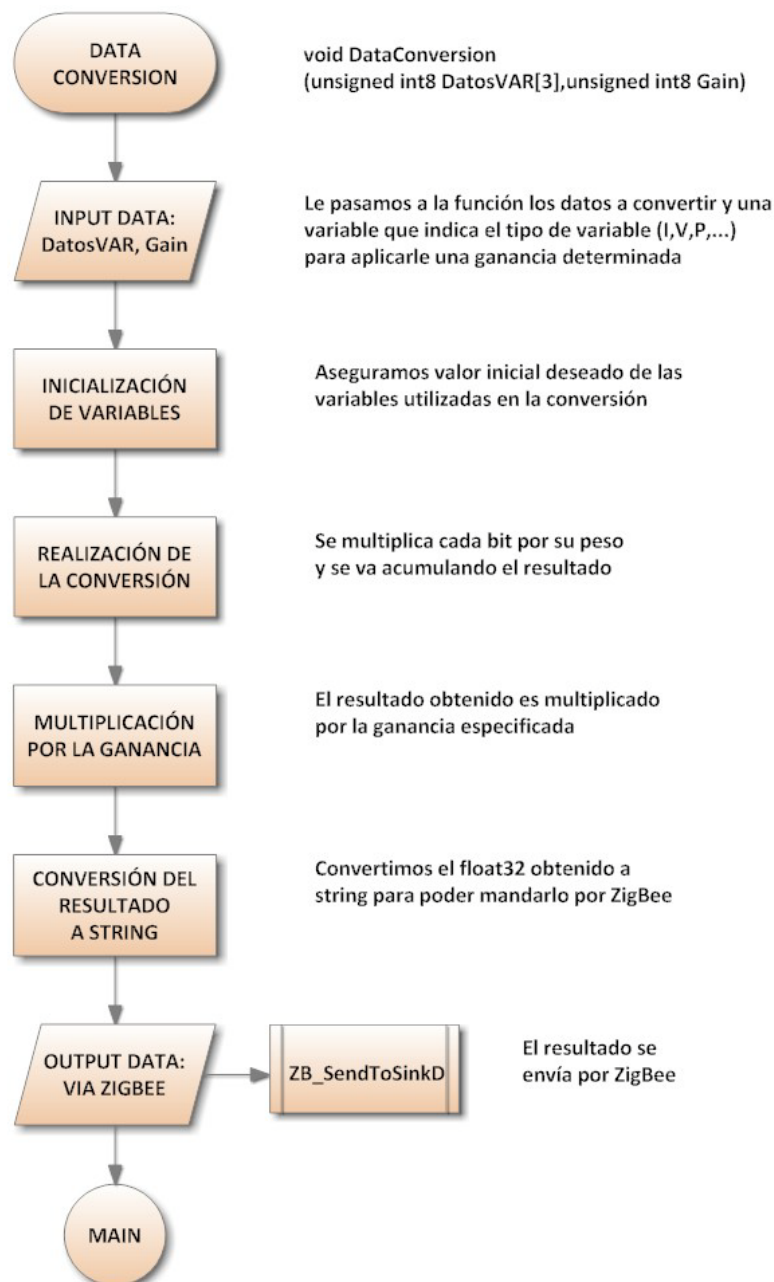


Fig. 4-15 Diagrama de flujo función DataConversion

Por último, conociendo el valor de atenuación (en caso de medir tensión) o el valor de la resistencia de sentido R_{shunt} (para medir corriente), el valor real de las magnitudes medidas quedará de la siguiente forma:

$$V_{med} = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_i = V_{med} \times R'$$

$$V_{med} = I \times R_{shunt} \Rightarrow I = \frac{V_{med}}{R_{shunt}}$$

Esta segunda parte, bastante más simple será la forma de operar en el bloque “Multiplicación por la ganancia” (Fig. 4-16).

4.2 Protocolo de comunicaciones

Con el propósito de integrar el sistema smartmeter en la red de HOWLab, es muy importante traducir la información recogida por éste al protocolo utilizado en la red de destino y viceversa, ya que los mensajes enviados a través de dicha red tienen que ser entendidos por el sistema. Para ello será necesaria, una pasarela o puerta de enlace (del inglés gateway) de red (ZigBee), el cual debe utilizar las siguientes estructuras de datos para el envío y recepción de mensajes.

Parámetro	Descripción
802.15.4	La IEEE 802.15.4-2003 define las especificaciones MAC y físicas PHY usadas en todas las comunicaciones ZigBee
dBm	Indica el nivel de potencia absoluta en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1 mW.
PAN	(Personal Area Network) Se refiere a una red ZigBee
PAN ID	Es un número único de 16bits que identifica la PAN
ZC, COO	(ZigBee Coordinator) Nodo ZigBee mas importante ya que forma la red
ZR, FFD	(ZigBee Router) Almacena y reenvía paquetes enviados a otros dispositivos de la malla que se encuentren alejados o dormidos.
ZED, SED, MED	Tipos de dispositivos finales, cada uno con unas características diferentes.

Tabla 4.7 Descripción de parámetros

1) Descripción del frame estándar:

Comandos PC >> Nodo				
END_POINT	CLUSTER_ID	LENGTH	COMMAND	DATA

Tabla 4.8 Comandos PC>>Nodo

Comandos Nodo >> PC						
END_POINT	CLUSTER_ID	LENGTH	EVENT	DATA	CLUSTER_ID	COMMAND

Tabla 4.9 Comandos Nodo>>PC

- **END_POINT:** Identificador interno del dispositivo lógico. En este caso se ha establecido el identificador 0x10 para el sistema SmartMeter.
- **CLUSTER_ID:** Grupo de atributos donde se encuadra el mensaje. Para este PFC, por simplicidad se ha utilizado 0xF1.
- **LENGHT:** Longitud del “payload” (DATA+1). Hace referencia a la longitud en Bytes de la información objetivo (importante) de la transmisión, es decir el comando/evento y los datos.
- **COMMAND:** Comando para el nodo, el cual es específico del cluster.
- **EVENT:** Respuesta del nodo, específica del cluster.

4.2.1 Comandos implementados

Primero comentar varias cuestiones a tener en cuenta. El más importante es que todos los datos expuestos a continuación, están escritos en hexadecimal y que la dirección (address) es única para cada dispositivo y viene dada de fábrica.

1) Comandos PC >> Nodo

Ahora se va a mostrar la forma en que se ejecutan los comandos, primero se incluye una tabla, con la totalidad de comandos implementados y después en la siguiente figura, el comando tipo, para dar una visión general del funcionamiento de todos ellos.

Comando asignado	Función implementada	Descripción	Longitud Bytes
0x00	readRegister	Lee el registro indicado	2
0x01	writeRegister	Escribe el registro indicado	3
0x02	SoftwareReset	Resetea el Cirrus	1
0x03	PowerState	Modifica el estado del Cirrus	2
0x04	Initialization	Inicializa los registros del Cirrus	1
0x05	WriteCalibrationData	Escribe los datos de calibración	1
0x06	StartConversions	Empezar a tomar medidas	1
0x07	ReadInstantMeasures	Lee el valor instantáneo de las variables	1
0x08	ReadPeakMeasures	Lee el valor de pico de las variables	1
0x09	ReadAverageMeasures	Lee el valor medio de las variables, AVG	1
0x0A	ReadRMSmeasures	Lee el valor eficaz de las variables, RMS	1
0x0B	ReadCalibrations	Lee los registros de calibración	1
0x0C	SystemCalibration	Inicia la calibración indicada	2
0x0D	OffsetCalibration	Inicia la calibración de offset	1
0x0E	GainCalibration	Inicia la calibración de ganancia	1
0x0F	cs_5463Status	Comprueba el estado del Cirrus	1
0x20	ReadPage0	Lee registros de la página 0	1
0x21	ReadPage1	Lee registros de la página 1	1
0x22	ReadPage3	Lee registros de la página 3	1
0x23	SetSendTime	Fija el tiempo de lectura	2
0x30	Control_Rele	Controla el estado del relé	1

Tabla 4.10 Resumen de comandos

COMANDO TIPO	
<p>Comando a ejecutar AT+UCASTB:XX,<address> <end_point> <cluster_id> <length> <command></p>	<p>Respuesta <comando ejecutado> SEQ:XX OK o ERROR:<errorcode></p> <p>ACK:XX o NACK:XX</p> <p>Respuesta del comando <Según el comando ejecutado></p>

A continuación se detallan algunos de los comandos de la tabla 4.10, teniendo en cuenta que, para simplificar la interpretación de los mismos, se sustituirá end_point y cluster_id, del cuadro anterior, por <10F1>, que son los valores que se han asignado.

La lista completa de comandos implementados, puede consultarse en el anexo E.

ReadRegister – Leemos el registro indicado en la variable DATA	
<p>Comando a ejecutar AT+UCASTB:05,<address> <10F1> <02> <00> <data></p> <p><data> registro[1byte] del 0x00-0x30 Número asignado al registro, ver primera tabla del anexo E.</p> <p>Ejemplo de comando: 10F102000A</p>	<p>Respuesta <comando ejecutado> SEQ:XX OK or ERROR:<errorcode></p> <p>ACK:XX o NACK:XX</p> <p>Respuesta del comando <datos del registro leído> [HEX]</p> <p>Ejemplo de respuesta: 000FA0</p>

WriteRegister – Escribimos el registro indicado en la variable DATA	
<p>Comando a ejecutar AT+UCASTB:08,<address> <10F1> <04> <01> <data></p> <p><data> = registro[1] + datos[3] Número del registro (Tabla anexo E) y datos que se quieran escribir en él.</p> <p>Ejemplo de comando: 10F1040104400000</p>	<p>Respuesta <comando ejecutado> SEQ:XX OK or ERROR:<errorcode></p> <p>ACK:XX o NACK:XX</p> <p>Respuesta del comando <EVENT_ACK> [ASCII]</p> <p>Ejemplo de respuesta: *** EVENT ACK ***</p>

ReadRMSmeasures – Lee los valores eficaces de tensión y corriente	
<p>Comando a ejecutar AT+UCASTB:04,<address> <10F1> <01> <0A></p> <p>Ejemplo comando: 10F1010A</p> <p>Ejemplo de respuesta: RMS Current 783.1 RMS Voltage 229.6</p>	<p>Respuesta <comando ejecutado> SEQ:XX OK or ERROR:<errorcode></p> <p>ACK:XX o NACK:XX</p> <p>Respuesta del comando <RMS Current> <datos leídos del registro Irms> <RMS Voltage> < datos leídos del registro Vrms ></p>

2) Comandos Nodo >> PC

Comandos Nodo >> PC						
END_POINT	CLUSTER_ID	LENGTH	EVENT	DATA	CLUSTER_ID	COMMAND

Tabla 4.11 Comandos Nodo>>PC

La forma correcta de enviar los datos del nodo (smartmeter) al PC, sería la indicada en la tabla anterior, pero para facilitar la visualización de los datos en el PC, se enviará el nombre del registro leído y su valor, tal y como se puede ver en las tablas de comandos del apartado anterior.

Una mejora clara del proyecto, sería el desarrollo de un software para PC específico, permitiera mostrar en una misma pantalla todas las variables disponibles y que éstas se actualizaran con cierta rapidez.

De todas formas, si que se han implementado dos comandos. EVENT_ACK sirve para notificar al usuario que el comando enviado ha sido procesado correctamente (en comandos que no tienen respuesta propia) y EVENT_ERROR muestra en pantalla el tipo de error que se ha dado es decir, que el end_point, cluster_ID o el comando no son correctos.

EVENT_ACK - Confirmación de comando
Notifica al PC que el comando ha sido procesado correctamente, mostrando en pantalla *** EVENT ACK ***

Tabla 4.12 Confirmación de evento

EVENT_ERROR - Error de evento
Notifica al PC que ha habido un error al procesar el comando Muestra en pantalla uno de los siguientes errores: "End_Point ERROR" "Cluster_ID ERROR" "Command ERROR"

Tabla 4.13 Mensaje de error

5 CAPITULO 5: DISEÑO DE LA PCB

En este capítulo se va a detallar el proceso de diseño de la PCB (Printed Circuit Board) o circuito impreso. Primero se fijarán los criterios del diseño, en base a la normativa, para luego ir explicando todo el proceso necesario. También se incluirán los esquemáticos e imágenes de la placa, junto con el coste de fabricación para una unidad y la estimación del precio para 100 y 1000 unidades en base a precios de proveedor.

5.1 Criterios del diseño

Para establecer los criterios de diseño de la PCB se ha consultado la norma UNE 20-621-84/3, dando como resultado las siguientes consideraciones:

PISTA	ANCHURA PISTAS (mm)	SEPARACIÓN PISTAS (mm)
RED (Fase y Neutro)	≥ 2	≥ 2
Pistas de medición corriente	$\geq 4,5$	$\geq 4,5$
Alimentaciones (5V y 3V3)	$\geq 0,5$	$\geq 0,5$
Resto pistas (Regla general)	$\geq 0,3$	$\geq 0,3$

Tabla 5.1 Normas del diseño

Como se puede observar, por lo general, la separación entre conductores es la misma que su anchura y estas reglas deben respetarse siempre en la medida de lo posible.

Para las pistas que transportan la corriente a medir, se ha consultado una tabla de la norma UNE que relaciona la anchura de la pista en función de la corriente, mediante unas curvas que dependen del incremento de T° . Así, para una corriente de 10A será necesaria una pista de aproximadamente 4mm de anchura.

Por otro lado, también se han seguido los siguientes principios de diseño:

- Identificar pistas críticas o sensibles
- Rutear primero Vcc, GND y pistas críticas.
- Intentar reducir bucles de circulación de corriente.
- Utilizar planos de masa.
- Realizar giros en las pista a 45°.
- Separar tierras digitales y analógicas.
- No trazar pistas cerca de los bordes de la placa.
- Poner los condensadores lo más cerca posible del integrado que alimentan.

5.2 Costes de fabricación

En este apartado se detallará el coste de fabricación para 1 unidad y una estimación de precio de escala para 10, 100 y 1000 unidades en base a precios de proveedor (Farnell). Por otra parte estaría el coste de la PCB, el cual se desconoce aunque se estima para menos de 10 unidades de 150€, para 100 unidades de 50€ y por último para más de 1000 de 20€.

Esquema	Qty	1	TOTAL1	10	TOTAL10	100	TOTAL100	1000	TOTAL1000
Fuse	1	0,188	0,188	0,180	1,80	0,171	17,1	0,168	168,0
Fuseholder	2	0,097	0,194	0,097	1,94	0,097	19,4	0,097	194,0
VR1	1	0,31	0,310	0,31	3,10	0,186	18,6	0,146	146,0
FA Traco	1	15,6	15,600	14,08	140,80	13,380	1338,0	13,38	13380,0
Relay	1	0,77	0,770	0,770	7,70	0,770	77,0	0,770	770,0
Cirrus	1	5,57	5,570	3,95	39,50	3,220	322,0	3,220	3220,0
XTAL1	1	0,54	0,540	0,46	4,60	0,34	34,00	0,3	300,0
C5	3	0,035	0,105	0,035	1,05	0,033	9,90	0,031	93,0
R7	1	0,097	0,097	0,077	0,77	0,038	3,80	0,019	19,0
Rshunt	1	0,51	0,510	0,42	4,20	0,35	35,0	0,31	310,0
R4,R9,R11,R12	4	0,019	0,076	0,018	0,72	0,016	6,4	0,015	60,0
C1,C3,C8,C10	4	0,047	0,188	0,047	1,88	0,025	10,0	0,012	48,0
C2,C9	2	0,017	0,034	0,017	0,34	0,015	3,0	0,011	22,0
R3	1	0,024	0,024	0,024	0,24	0,024	2,4	0,024	24,0
R2,R13,14,R15	4	0,023	0,092	0,023	0,92	0,023	9,2	0,023	92,0
Diodo	1	0,046	0,046	0,041	0,41	0,038	3,8	0,03	30,0
Transistor	1	0,04	0,040	0,031	0,31	0,021	2,1	0,017	17,0
Memoria	1	2,63	2,630	1,61	16,10	1,500	150,0	1,500	1500,0
R5,R6	2	0,097	0,194	0,097	1,94	0,038	7,6	0,019	38,0
Micro	1	3,63	3,630	3,14	31,40	2,740	274,0	2,740	2740,0
R1,R8	2	0,022	0,044	0,018	0,36	0,016	3,2	0,009	18,0
C4	1	0,21	0,210	0,21	2,10	0,130	13,0	0,130	130,0
ZigBee	1	20,66	20,660	20,230	202,30	20,230	2023,0	20,230	20230,0
CM130	1	1,72	1,720	1,27	12,70	1,080	108,0	1,080	1080,0
C11,C12	2	0,036	0,072	0,036	0,72	0,018	3,6	0,009	18,0
Conectores	2	0,27	0,540	0,198	3,96	0,157	31,4	0,116	232,0
Caja	1	6,5	6,500	6,07	60,70	5,130	513,0	5,130	5130,0
TOTAL			60,584		542,56		5.038,5		50.009,0
1 Unidad			60,584		54,256		50,385		50,009

Fig. 5-1 Lista componentes PCB

Nota: Todos los valores indicados en la tabla, están proporcionados en Euros (€).

Como se puede observar, el precio no varía demasiado al elevar el número de unidades a fabricar y es prácticamente el mismo de 100 a 1000 unidades. Esto se debe a que el precio de los componentes más caros no varía o muy poco. Por ello de cara a una fabricación en serie debería reemplazarse la fuente de alimentación, por la capacitiva (la cual ya está diseñada y puede consultarse en el anexo B) y buscar mejores precios para el ZigBee.

5.3 Planos SMARTMETER

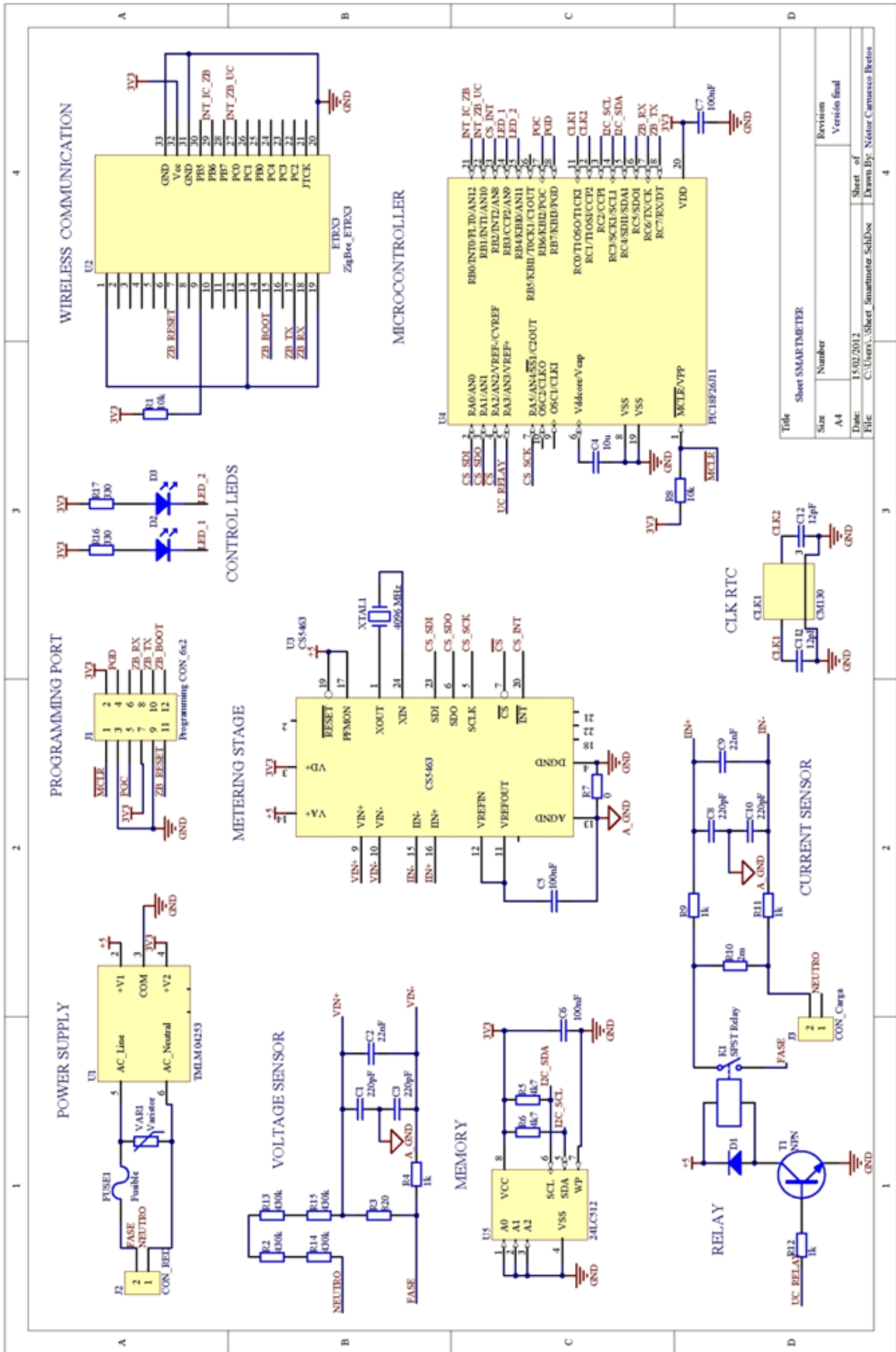


Fig. 5-2 Esquemático

- **Planos PCB**

Se incluyen los planos de pistas y serigrafía de las caras TOP y BOTTOM, si se desea consultar el resto de planos, ver la documentación del anexo F.

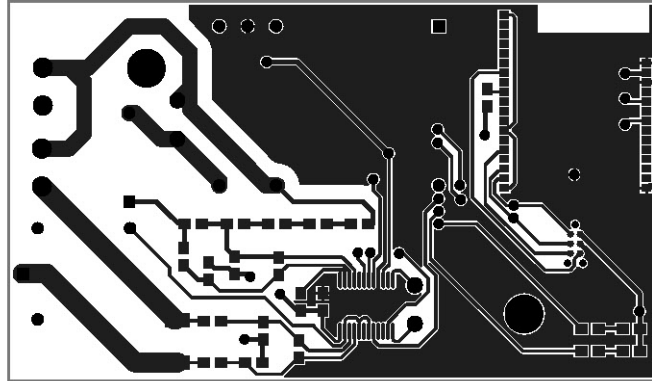


Fig. 5-3 PCB cara TOP (Escala 1:1)

Como se puede observar, la morfología de la caja (raíl DIN, ver figura 5-7) ha condicionado totalmente el diseño de la PCB. Para empezar, la mayor parte de componentes se ha situado en la cara TOP, si tenían cierta altura debían de situarse en ella. Además por la disposición de las ranuras, los conectores se han situado en un extremo y los LEDs de verificación en el otro. Por otro lado se ha intentado separar las partes de alta tensión (izquierda) del resto y utilizar anchuras y separaciones acorde a lo expuesto en la tabla 31 Normas del diseño.

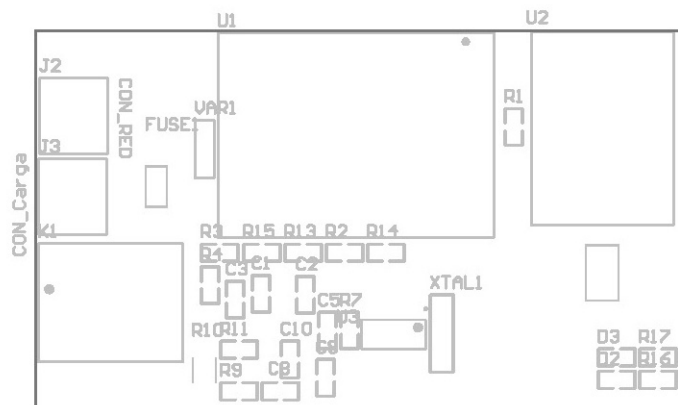


Fig. 5-4 Plano de serigrafía cara TOP (Escala 1:1)

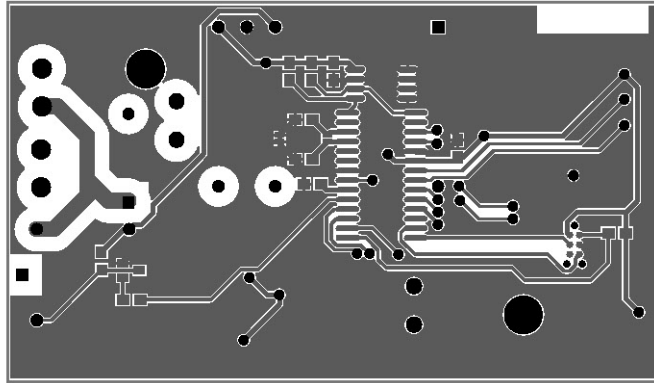


Fig. 5-5 PCB cara BOTTOM (Escala 1:1)

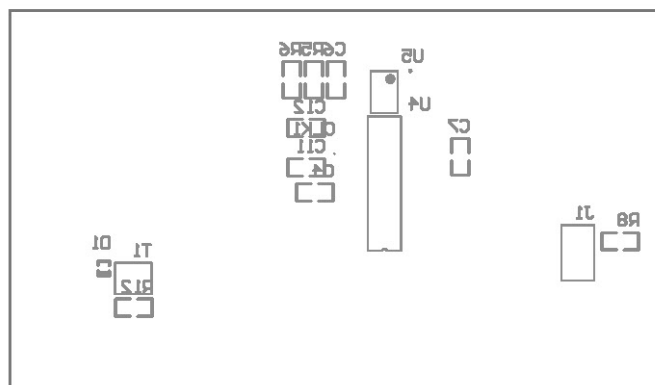


Fig. 5-6 Plano de serigrafía cara BOTTOM (Escala 1:1)

Esta es la caja escogida, fabricada por Candem-Boss enclosures (17) y cuyo datasheet está incluido, igual que el resto en la documentación proporcionada.

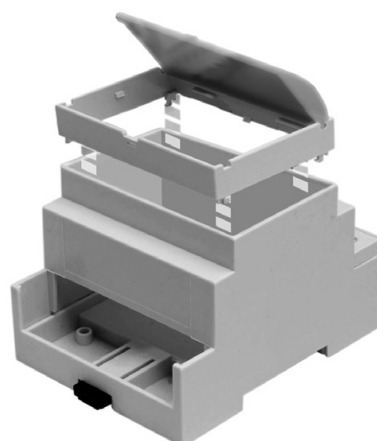


Fig. 5-7 Caja DIN seleccionada

6 CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un sistema smartmeter, controlable inalámbricamente con medición de consumo, para su implementación en el sistema domótico de una vivienda. Dicho dispositivo se ha desarrollado tratando de minimizar su tamaño, mediante la sustitución de transformadores por otras alternativas y de integrarlo en el sistema ZigBee desarrollado por HOWLab. Con ello se consigue manejar el dispositivo desde el ordenador inalámbricamente, lo que abre un gran abanico de posibilidades futuras, además de poder controlar el estado de la carga.

Estas son las principales diferencias respecto a los medidores de consumo comerciales, ya que la mayor parte de ellos, únicamente muestran la información en un display o permiten un accesorio (modem) que registra los datos en internet, aunque con un aumento del coste considerable. Actualmente sí que están apareciendo medidores (gestores de consumo) de similares o mayores características, pero con un coste más elevado que el smartmeter desarrollado.

Finalmente se han cumplido todos los objetivos marcados y además se ha fabricado la PCB, que en principio no entraba en ellos. Así se ha mejorado en gran medida el funcionamiento del sistema, al añadirse periféricos y acortarse conexiones ya que en el montaje que tuvo que realizarse en la placa de inserción, eran demasiado largas.

Como ya se ha comentado, las posibilidades de ampliar las funcionalidades del dispositivo son muy grandes, ya que no se ha desarrollado ningún software específico para PC que permita la lectura de magnitudes y el manejo mismo de forma simple. Otra mejora que se podría plantear, sería ofrecer otra versión más simple del mismo, para su posicionamiento como medidor/actuador en un único enchufe y así poder gestionar mejor el consumo de diferentes aparatos.

Además, el resultado de este proyecto se liberará como hardware libre por medio del OPENLAB (web para la promoción del hardware y software libre del grupo HOWLab), con la finalidad de que todo el conocimiento desarrollado quede a disposición de la comunidad y se pueda evolucionar y mejorar por ésta, abriendo muchas posibilidades. Para la liberación del hardware se utilizará la licencia **CERN OHL version 1.1.** (16) y el firmware bajo los términos de la licencia **GNU GLPv3** (General Public License) publicada por la Free Software Foundation (17), cuyos términos pueden consultarse en las referencias indicadas.

Respecto al desarrollo del proyecto, éste se ha realizado en un año desde la fecha del comienzo aunque con dedicación parcial, ya que cuando se empezó aun no había terminado todas las asignaturas la carrera y actualmente lo compatibilizo con la escuela oficial de idiomas. Durante el desarrollo del mismo me he ido encontrando con

los problemas típicos de un proyecto de estas características, desde el aprendizaje de lenguaje c y su implementación en microcontroladores de Microchip, hasta la selección y compra de componentes dada la grandísima cantidad de opciones válidas y mi inexperiencia en ello. Por otro lado, lo que más dificultades me ha creado, ha sido el hecho de trabajar con tensiones de red sin aislamiento, dado que una conexión incorrecta podía suponer la destrucción de algún componente y aunque me sucedió, únicamente fueron unas pocas resistencias, por lo que no afectó al desarrollo del proyecto.

Personalmente estoy contento con el conocimiento aprendido y el trabajo realizado ya que el desarrollar un proyecto desde cero, hasta el primer prototipo, me ha capacitado para poder afrontar un proyecto de similares características. Considerando la temática escogida, la medida y gestión del consumo es un tema cada vez más importante debido al aumento del precio y consumo de electricidad y espero que este tipo de sistemas ayuden a una mayor eficiencia del sistema eléctrico y concienciación de los usuarios.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. HOWLab. [En línea] <http://howlab.unizar.es/>.
2. **HOWLab**. OPENLab ZETA Project. [En línea] http://openlab.unizar.es/?page_id=21.
3. **BOE**. *Real Decreto 809/2006 de 30 Junio*.
4. **Logic, Cirrus**. Datasheet CS5463. *Datasheet*. 2005.
5. **Farnell**. [En línea] <http://es.farnell.com/>.
6. **Electrónicos, Mouser Electronics - Distribuidor de Componentes**. [En línea] <http://es.mouser.com/>.
7. **Technology, Linear**. LT Spice IV. [En línea] <http://www.linear.com/designtools/software/>.
8. **Koon, William**. Current sensing for energy metering, Analog Devices, Inc. [En línea] <http://www.analog.com/energymeter>.
9. **Omrom**. Datasheet PCB Relay – G5LA.
10. *A Comparative Study of Wireless Protocols:Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*. **Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su, and Chung-Chou Shen**. Hsinchu, Taiwan : s.n., 2007.
11. **Microchip**. Microcontroller Product Selector (MPS). [En línea] <http://www.microchip.com/productselector/MCUProductSelector.html>.
12. **AMERICA, CITIZEN**. CM130 32.768KDZF-UT - CRYSTAL, SMD. [En línea] <http://www.txccrystal.com/>.
13. *Transformerless Power Supplies: Resistive and Capacitive*. **Condit, Reston**. AN954, s.l. : Microchip Technology Inc.
14. **SMPS**. SWITCH MODE POWER SUPPLY TUTORIAL. [En línea] <http://www.smeps.us/power-supply.html>.
15. **Services), CCS (Custom Computer**. CCS Downloads - CCS Compiler Demo. [En línea] <http://www.ccsinfo.com/>.
16. **Microchip**. MPLAB. [En línea] http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en019469&part=SW007002.

17. **Telegesis.** ETRX2 and ETRX3 Series ZigBee® Modules. *AT-Command Dictionary*. [En línea] <http://www.telegesis.com/>.
18. **Heesch, Dimitri van.** Doxygen. [En línea] <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>.
19. **Ltd, Boss Enclosures.** Candem-Boss. [En línea] <http://www.camdenboss.com/>.
20. **Repository, Open Hardware.** Cern Open Hardware License. [En línea] <http://www.ohwr.org/documents/88>.
21. **License, GNU General Public.** GPLv3. [En línea] <http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>.
22. **Condit, Reston.** Microchip Technology Inc. *Transformerless Power Supplies: Resistive and Capacitive*. [En línea] AN95.
23. *THE EFFECTIVENESS OF FEEDBACK ON ENERGY CONSUMPTION.* **Darby, Sarah.** April 2006.

8 ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2-1 Consumo final bruto de energía en 2010	12
Fig. 2-2 Consumo en espera (standby)	13
Fig. 2-3 Circuitos DC (izquierda) y AC (derecha)	16
Fig. 2-4 Onda Sinusoidal	16
Fig. 2-5 Valor pico a pico.....	17
Fig. 2-6 Valor medio NULO	17
Fig. 2-7 Misma potencia disipada	18
Fig. 2-8 Valores RMS, AVG(1 semiciclo) y Vpp de una senoide.....	19
Fig. 2-9 Triángulo de potencias	20
Fig. 2-10 Desfase entre $v(t)=A$ e $i(t)=B$	21
Fig. 3-1 Diagrama de bloques	24
Fig. 3-2 Diagrama de funcionamiento (Imagen extraída del datasheet)	26
Fig. 3-3 Esquema Cirrus CS5463	27
Fig. 3-4 Acondicionamiento Tensión	29
Fig. 3-5 Sensor de voltaje	30
Fig. 3-6 Vout con Rshunt.....	31
Fig. 3-7 Sensor corriente + Relé.....	33
Fig. 3-8 Esquema conexiones Relé	35
Fig. 3-9 Módulo ETRX3.....	36
Fig. 3-10 Módulo ZigBee ETRX3	37
Fig. 3-11 Esquema memoria E2PROM.....	38
Fig. 3-12 Resultados de la aplicación MPS	40
Fig. 3-13 Esquema PIC18F26J11	40
Fig. 3-14 Real Time Clock.....	41
Fig. 3-15 FA capacitiva (11).....	42
Fig. 3-16 FA resistiva en media onda (11)	43
Fig. 3-17 Diagrama de bloques de una SMPS (Fuente: smps) (12)	43
Fig. 3-18 Diseño FA capacitiva	44
Fig. 3-19 Esquema FA Traco.....	44
Fig. 4-1 Diagrama de bloques principal	46
Fig. 4-2 Diagrama bloques inicialización.....	46
Fig. 4-3 Diagrama bloques inicialización ZigBee.....	47
Fig. 4-4 Diagrama bloques inicialización Cirrus	48
Fig. 4-5 Estado ACTIVO	49
Fig. 4-6 Estado INACTIVO.....	49
Fig. 4-7 Diagrama flujo interrupción ZigBee.....	50
Fig. 4-8 Bloques hardware a controlar	51
Fig. 4-9 Capas firmware	51

Fig. 4-10 Diagrama flujo cs_readRegister.....	55
Fig. 4-11 Diagrama de flujo para leer una variable	56
Fig. 4-12 Signed register	58
Fig. 4-13 Unsigned register.....	58
Fig. 4-14 Conversión de valores (Fuente: Datasheet del Cirrus) (3).....	58
Fig. 4-15 Diagrama de flujo función DataConversion.....	59
Fig. 5-1 Lista componentes PCB.....	65
Fig. 5-2 Esquemático.....	66
Fig. 5-3 PCB cara TOP (Escala 1:1)	67
Fig. 5-4 Plano de serigrafía cara TOP (Escala 1:1).....	67
Fig. 5-5 PCB cara BOTTOM (Escala 1:1)	68
Fig. 5-6 Plano de serigrafía cara BOTTOM (Escala 1:1)	68
Fig. 5-7 Caja DIN seleccionada.....	68
Fig. A-0-1 Cronología, Hitos y Hechos Relevantes 2006 y 2007	76
Fig. A-0-2 Plan de sustitución de equipos de medida	77
Fig. B-0-1 Principio funcionamiento FA capacitiva	79
Fig. B-0-2Diseño FA capacitiva.....	81
Fig. B-3 Final FA capacitiva	83
Fig. C-0-1 Data Measurement Flow Diagram.	84
Fig. 0-2 Diagrama flujo cs_writeRegister.....	86

9 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Telegestión para las compañías eléctricas	14
Tabla 2.2 Resumen funciones mínimas de los contadores	15
Tabla 2.3 Valor de pico	17
Tabla 3.1. Comparativa CI.....	25
Tabla 3.2 Consumo P del CS5463	28
Tabla 3.3 Posibles configuraciones.....	29
Tabla 3.4 Ventajas y desventajas Rshunt	31
Tabla 3.5 Valores máximos de entrada Cirrus.....	31
Tabla 3.6 Comparativa valores Rshunt.....	32
Tabla 3.7 Comparativa EMR - SSR	34
Tabla 3.8 Comparativa de tecnologías inalámbricas.....	36
Tabla 3.9 Comparativa de dispositivos.....	36
Tabla 3.10 Resumen de características	39
Tabla 3.11 Consumos del sistema	41
Tabla 3.12 Ventajas y desventajas FA conmutada	43
Tabla 3.13 Comparativa precios FA.....	44
Tabla 3.14 Características Traco TMLM 04253	44
Tabla 4.1 Tratamiento de mensajes, CCP.	50

Tabla 4.2 Contenido ficheros programación	51
Tabla 4.3 Librerías CS5463.....	55
Tabla 4.4 Comandos Lectura medidas.....	56
Tabla 4.5 Librerías ZigBee	57
Tabla 4.6 Librerías funciones inteligentes	57
Tabla 4.7 Descripción de parámetros.....	60
Tabla 4.8 Comandos PC>>Nodo	60
Tabla 4.9 Comandos Nodo>>PC	60
Tabla 4.10 Resumen de comandos.....	61
Tabla 4.11 Comandos Nodo>>PC	63
Tabla 4.12 Confirmación de evento	63
Tabla 4.13 Mensaje de error	63
Tabla 5.1 Normas del diseño	64
Tabla A.0.1 Resumen funciones mínimas de los contadores	77
Tabla A.0.2 Características de los contadores según RD.....	78
Tabla B.0.1 Función componentes FA capacitiva	79
Tabla B.0.2 Consumo del sistema.....	80
Tabla B.3 Componentes fuente alimentación capacitiva.....	83
Tabla C.1 Definición de magnitudes	84
Tabla C.2 Lista registros page 0	85
Tabla 0.1 Resumen de comandos.....	88