

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**SISTEMA DE MONITORIZACIÓN BASADO
EN HARDWARE OPEN SOURCE PARA LA
CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS**

**(Monitoring system based on open source
hardware for characterization of photovoltaic
cells)**

Para acceder al Titulo de

*Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación*

Autor: Marta Cuesta Gómez
Octubre - 2014

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Marta Cuesta Gómez

Director del TFG: Jesús M^a Mirapeix Serrano / Luis Rodríguez Cobo

Título: “Sistema de monitorización basado en hardware open source para la caracterización de células fotovoltaicas.”

Title: “Monitoring system based on open source hardware for characterization of photovoltaic cells”

Presentado a examen el día: 30 de Octubre de 2014

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús M^a

Vocal (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, María Angeles

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar estas líneas para expresar mi agradecimiento a algunas personas cuya colaboración fue esencial a la elaboración de este proyecto.

A mi director de proyecto, Jesús María Mirapeix, por su confianza, su dedicación y su inestimable ayuda siempre.

Agradecer al Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF) de la Universidad de Cantabria, y en especial a José J. Valdiande, Luis Rodríguez y Rubén Ruiz, por su ayuda desinteresada y apoyo durante todo el proceso experimental.

A mis padres, Federico y Manuela, porque son parte importante en todos los proyectos de mi vida y porque sin su esfuerzo nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermana, Ana, por su apoyo y comprensión en todo momento, eres un pilar fundamental en mi vida.

A mi familia, abuelos, tíos y primos, a los que están y a los que no, porque nunca os olvidare.

Por otro lado, a mis compañeros de Universidad, desde los comienzos hasta ahora. Han sido muchos años, donde he conocido gente increíble y que serán parte de mi vida siempre. En especial a Javi, Lara y Nando, por convertirse en un apoyo importante y estar siempre ahí.

Por último, pero no de menor importancia, a todos mis amigos, esa gente que forma parte de mi día a día, que me han animado y apoyado en todo momento, “Chicas” en gran parte gracias a vosotras.

GRACIAS A TODOS POR CONFIAR EN MÍ

ÍNDICE

Capítulo 0. Objetivos y Contexto	página 1
0.1. Objetivos	página 2
0.2. Contexto	página 3
Capítulo 1. Introducción	página 4
1.1. Introducción a las energías renovables	página 5
1.2. Situación de las renovables en España	página 10
1.3. Situación política y legislativa de las renovables en España	página 14
1.3.1. Situación pasada	página 14
1.3.2. Situación futura	página 16
1.4. Introducción a la energía solar fotovoltaica	página 18
1.4.1. Efecto fotoeléctrico	página 21
1.4.2. Dispositivos	página 23
1.4.3. Tipologías de sistemas fotovoltaicos	página 25
1.5. Diseño práctica de laboratorio	página 27
Capítulo 2. Hardware <i>open source</i>	página 28
2.1. Introducción al hardware <i>open source</i>	página 29
2.2. Introducción a Arduino	página 34
2.2.1. Tipos de Arduino en el mercado	página 35
2.2.2. Entorno de desarrollo de Arduino	página 45
2.3. Componentes del sistema	página 49
2.3.1. Placa Arduino UNO	página 49
2.3.2. Sensores de temperatura y corriente	página 51
2.3.2.1. Sensor de temperatura DS18B20	página 51
2.3.2.2. Sensor de temperatura LM35	página 52
2.3.2.3. Sensor de corriente ACS712	página 53
2.3.3. Display LCD de 16x2	página 54
Capítulo 3. Caracterización eléctrica de dispositivos fotovoltaicos	página 57
3.1. Característica I-V	página 58
3.2. Influencia de la temperatura	página 62
3.3. Importancia de la respuesta espectral	página 63
3.4. Proceso de medida	página 66

Capítulo 4. Diseño y medidas experimentales	página 71
4.1. Objetivos	página 72
4.2. Estudio de la respuesta espectral de las fuentes de iluminación empleadas	página 72
4.3. Caracterización de células fotovoltaicas	página 76
4.4. Diseño de PCB para la monitorización	página 85
4.5. Resultados finales de la caracterización	página 89
4.6. Desarrollo de la práctica	página 93
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	página 94
5.1. Conclusiones	página 95
5.2. Líneas futuras	página 96
Referencias	página 97
Bibliografía	página 98
Anexo I	página I
Anexo II	página X
Anexo III	página XIX

FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES

Figura 1.1	página 6
Figura 1.2	página 7
Figura 1.3	página 7
Figura 1.4	página 8
Figura 1.5	página 11
Figura 1.6	página 11
Figura 1.7	página 12
Figura 1.8	página 12
Figura 1.9	página 13
Figura 1.10	página 22
Figura 1.11	página 24
Figura 1.12	página 26
Figura 1.13	página 26
Figura 1.14	página 27
Figura 2.1	página 31
Figura 2.2	página 32
Figura 2.3	página 32
Figura 2.4	página 33
Figura 2.5	página 33
Figura 2.6	página 36
Figura 2.7	página 37
Figura 2.8	página 38
Figura 2.9	página 39
Figura 2.10	página 40
Figura 2.11	página 41
Figura 2.12	página 42
Figura 2.13	página 43
Figura 2.14	página 44
Figura 2.15	página 45
Figura 2.16	página 46
Figura 2.17	página 48
Figura 2.18	página 49
Figura 2.19	página 50
Figura 2.20	página 52
Figura 2.21	página 53
Figura 2.22	página 54
Figura 2.23	página 55
Figura 2.24	página 56
Figura 3.1	página 58
Figura 3.2	página 59

Figura 3.3	página 59
Figura 3.4	página 60
Figura 3.5	página 63
Figura 3.6	página 64
Figura 3.7	página 64
Figura 3.8	página 65
Figura 3.9	página 67
Figura 3.10	página 68
Figura 3.11	página 68
Figura 3.12	página 70
Figura 4.1	página 72
Figura 4.2	página 73
Figura 4.3	página 73
Figura 4.4	página 74
Figura 4.5	página 74
Figura 4.6	página 75
Figura 4.7	página 76
Figura 4.8	página 77
Figura 4.9	página 77
Figura 4.10	página 77
Figura 4.11	página 78
Figura 4.12	página 78
Figura 4.13	página 80
Figura 4.14	página 80
Figura 4.15	página 81
Figura 4.16	página 81
Figura 4.17	página 82
Figura 4.18	página 83
Figura 4.19	página 85
Figura 4.20	página 86
Figura 4.21	página 86
Figura 4.22	página 87
Figura 4.23	página 87
Figura 4.24	página 88
Figura 4.25	página 88
Figura 4.26	página 89
Figura 4.27	página 91
Figura 4.28	página 92
Figura 4.29	página 92
Figura 4.30	página 92

Tabla 1.1	página 79
Tabla 1.2	página 79
Tabla 1.3	página 83
Tabla 1.4	página 84
Tabla 1.5	página 89
Tabla 1.6	página 90
Tabla 1.7	página 90
Tabla 1.8	página 90

Ecuación 1.1	página 58
Ecuación 1.2	página 59
Ecuación 1.3	página 60
Ecuación 1.4	página 61
Ecuación 1.5	página 61
Ecuación 1.6	página 61
Ecuación 1.7	página 61
Ecuación 1.8	página 62
Ecuación 1.9	página 62
Ecuación 1.10	página 67

CAPITULO 0. Objetivos y Contexto

Se expondrán los objetivos del presente proyecto y se comentará brevemente el contexto del mismo.

0.1. Objetivos

La caracterización de células fotovoltaicas es un proceso necesario para conocer el comportamiento de los dispositivos frente a diferentes situaciones y con ello garantizar que los valores suministrados por el fabricante son correctos. Este proceso es complicado debido a que en él influyen distintos aspectos, como la respuesta espectral de la fuente de iluminación o el calentamiento de las células durante el proceso. Por ello, en este trabajo se estudiarán estos aspectos y su influencia en los resultados obtenidos de la caracterización de diferentes dispositivos fotovoltaicos.

Uno de los objetivos en los que se enmarca este proyecto consiste en servir como herramienta para las asignaturas de Energía y Telecomunicación con el fin de que el alumnado comprenda los problemas que conlleva una caracterización correcta, es decir, los diferentes parámetros que influyen. En particular se pretende diseñar una práctica de laboratorio de tal manera que permita al alumno profundizar en algunos conceptos básicos relacionados con la energía fotovoltaica, así como comprender la importancia de la monitorización en diferentes contextos.

Se procederá a la caracterización eléctrica de distintos tipos de células fotovoltaicas atendiendo a las características esenciales y de temperatura. Se realizará un estudio de la respuesta espectral de las mismas y, de este modo, el alumno pueda afianzar sus conocimientos relativos a los conceptos de representación frecuencial de señales, respuesta espectral del Sol y las células fotovoltaicas.

Otro aspecto importante en la realización de este trabajo es la influencia de la temperatura en todo el proceso de caracterización. Queriendo conseguir, por una parte en cuanto al aspecto docente, que el alumno entienda la importancia de la respuesta espectral en la caracterización de las células FV; y por otro lado, en cuanto a la parte experimental, caracterizando células en I-V en función de la temperatura.

Por otro lado, este trabajo también se centrará en la importancia de la monitorización de dichos parámetros a la hora de la caracterización de células fotovoltaicas. Para ello se añade el concepto de “*open source*”, es decir, código abierto, tanto “hardware” como “software”. El sistema se puede adaptar a las necesidades requeridas cambiando libremente el código proporcionado y, con ello, personalizar todo el entorno del proyecto para dotarlo del valor añadido de haber formado un sistema desde el principio. La importancia de este concepto es ofrecer una herramienta de monitorización aplicada a un sistema fotovoltaico.

Como meta final de este proyecto se ha planteado el diseñar un sistema que sea sencillo de utilizar y fácil de mantener. Con unos simples ajustes se puede configurar el tiempo

de muestreo, la información mostrada, diseñar gráficos con los datos recogidos, y un largo etcétera.

0.2. Contexto

Este trabajo se enmarca en la implementación de prácticas para las asignaturas G822 y G1276 (“*Energía y Telecomunicaciones*”) impartidas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria y el Grupo de Ingeniería Fotónica; sirviendo como base para la realización de prácticas de la asignatura transversal (“*Formándote como ingeniero a través del hardware libre*”) impartida por el Grupo de Ingeniería Fotónica.

Este trabajo surge como consecuencia de un proyecto anterior “*Desarrollo de fuentes de iluminación para la caracterización de células y paneles fotovoltaicos*” realizado para la obtención del título de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, especialidad en sistemas electrónicos; y gracias a las ideas aportadas en un proyecto realizado por Oscar López Ruiz “*Sistema de monitorización ambiental basado en hardware open source alimentado mediante energía fotovoltaica*”.

Con el presente trabajo se pretende que el alumnado entienda los diferentes aspectos que influyen en la caracterización de células fotovoltaicas. Así como las ventajas del uso de hardware *open source* para la monitorización de los diferentes parámetros.

Para ello se realizará un estudio de los diferentes aspectos relativos a la caracterización de células fotovoltaicas y un pequeño *Setup* para la obtención de dichos parámetros mediante un hardware *open source*.

CAPITULO 1. Introducción

Se realizará una breve introducción acerca de las energías renovables, centrándose en la energía fotovoltaica.

1.1. Introducción a las energías renovables

Los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural) son recursos finitos que inexorablemente van a agotarse; de ahí su denominación de "*recursos no renovables*". Por fortuna, existen también las energías renovables, que se definen como formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable.

Las energías renovables ofrecen la oportunidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer todas nuestras necesidades de energía presentes y futuras. Además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional.

Así mismo hay que tener presente que en la mayoría de los casos estas tecnologías no están todavía maduras y disponen de primas de ayuda para fomentar su utilización. Desde el punto de vista estrictamente económico las energías renovables siguen sin ser competitivas, en general, respecto a las no renovables en su transformación en electricidad, debido al coste del KWh en comparación con otras tecnologías. Únicamente la energía producida por centrales hidráulicas y geotérmicas sería comparable con las no renovables.

La energía eólica ha entrado en una fase de explotación industrial gracias a los estímulos económicos concedidos, que compensan sus mayores costes de producción comparados con las energías convencionales. El resto de energías renovables tienen unos costes de generación muy superiores a los de la energía producida por centrales que utilizan energías no renovables. En todo caso, ciertas energías renovables, como la solar fotovoltaica, pueden ser muy útiles para cubrir demandas en zonas aisladas: granjas agropecuarias, viviendas rurales, etc. En estos casos resulta más barato instalar este tipo de energía que extender la red eléctrica hasta ese punto o instalar un transformador, para una demanda eléctrica menor.

Por otro lado, desde el punto de vista de la gestión de la red, se tratan de energías dependientes de muchos factores externos, por lo que en ocasiones, no se puede garantizar la continuidad de la generación eléctrica, con lo que es necesario el uso de algún tipo de acumulador o baterías que en ocasiones encarecen el sistema.

Este tipo de energías surge por la necesidad de cumplir con dos objetivos primordiales en la actualidad. Por un lado, la "*demandas energéticas*" que continua experimentando un fuerte aumento y que se prevé sea mayor en los próximos años, derivado, entre otros

factores, por el fuerte aumento demográfico de la población mundial, así como de la exigente demanda energética de los países desarrollados y, sobre todo, del fuerte aumento en el consumo de países que están experimentando un importante crecimiento económico.

En la siguiente grafica se puede observar el crecimiento que han sufrido todas las fuentes de energía en los últimos años.

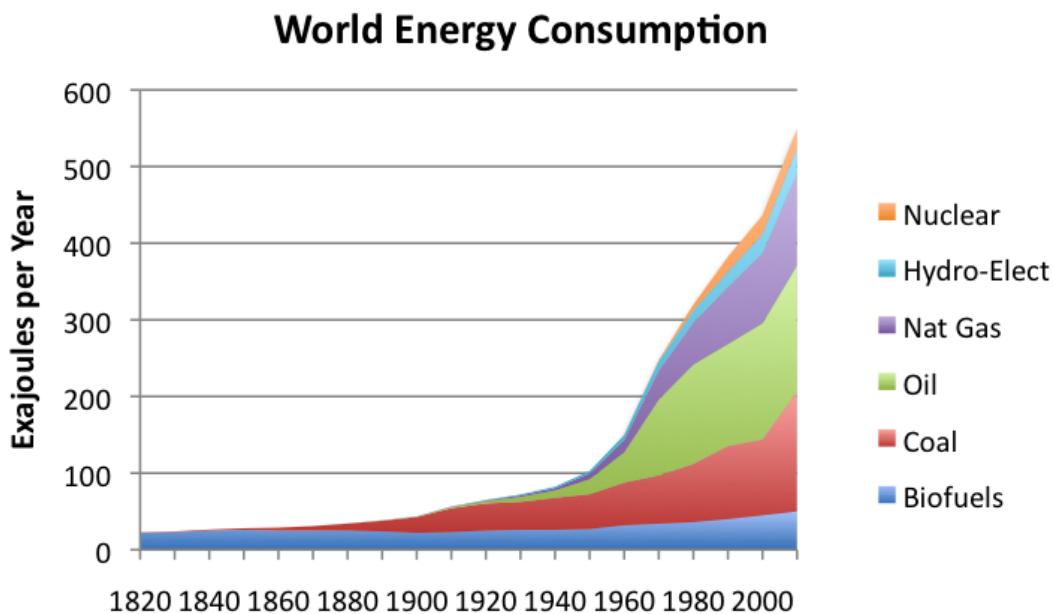


Figura 1.1 Consumo mundial de energía (Fuente: *Over Finite World* by Gail Tverberg)

Por otro lado, también se puede observar la evolución del consumo mundial de energía “per cápita”, esto es, el consumo medio por habitante, lo que indica que el aumento en el consumo no depende exclusivamente del aumento demográfico, sino también de los cambios en nuestro estilo de vida, cada vez más dependiente de la energía en sus diferentes manifestaciones.

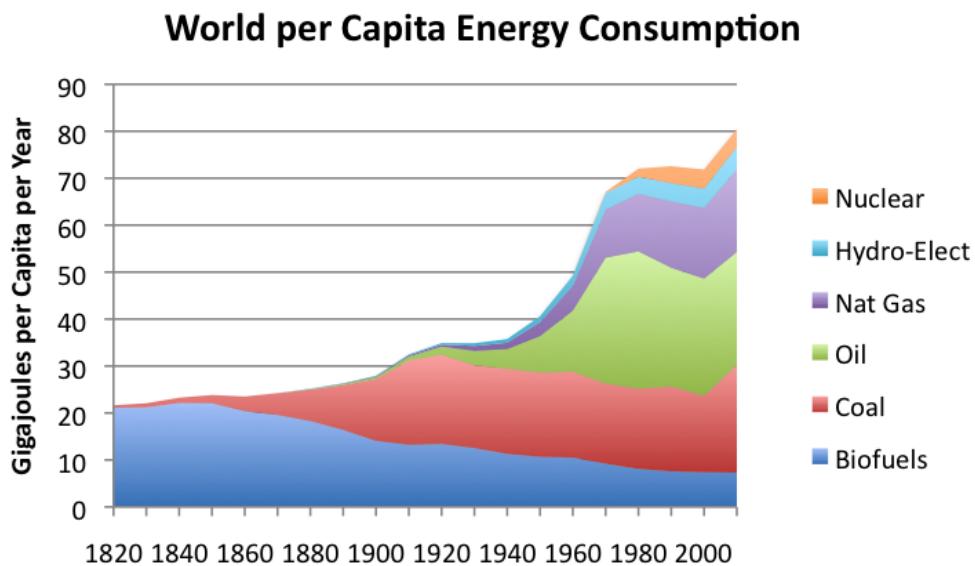


Figura 1.2 Consumo mundial de energía per cápita (Fuente: *Over Finite World* by Gail Tverberg)

Con lo que mediante un estudio a largo plazo se puede ver la influencia de la demanda energética respecto de las energías actuales y como está influyrá en los próximos años.

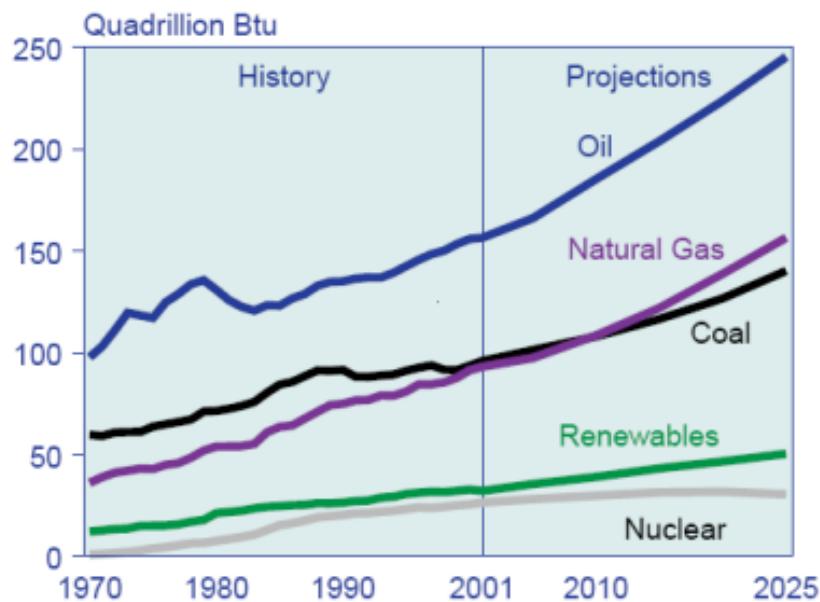


Figura 1.3 Evolución y proyección de la demanda energética (Fuente: *United States Department of Energy*)

El otro aspecto fundamental corresponde con el “*desarrollo sostenible*”, el cual se basa en tres aspectos como son, sociedad, economía y medio ambiente.

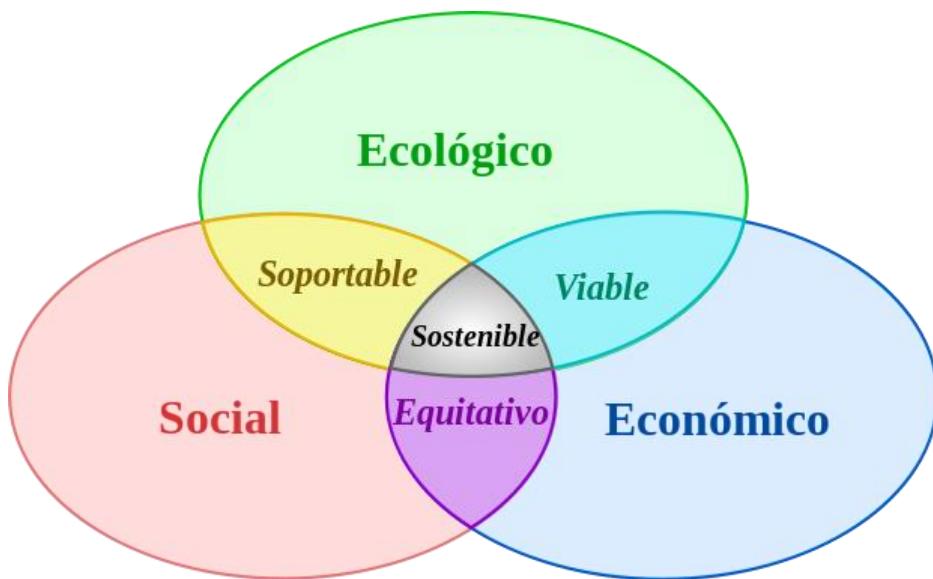


Figura 1.4 Esquema básico del desarrollo sostenible.

Su filosofía consiste en satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades. Este aspecto surge debido a las implicaciones medioambientales asociadas a distintos tipos de energía, especialmente a las derivadas de los combustibles fósiles o aquellas que vierten ciertas partículas y gases a la atmósfera. El uso de energías renovables consigue evitar en gran medida este tipo de problemas.

Según el IDAE (*Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*, <http://www.idae.es>), que es el organismo que dentro del Ministerio de Industria, Energía y Turismo se encarga de los aspectos relativos a las políticas de energías renovables; se definen las siguientes energías renovables:

Energía Eólica, es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire. Se obtiene a través de unas turbinas eólicas, que convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central conectado, a través de una serie engranajes, a un generador eléctrico.

Energía Solar, es aquella energía que se obtiene mediante el aprovechamiento de la radiación procedente del Sol. Se reconocen dentro de ella tres tipologías distintas.

Por un lado la energía **Solar Térmica**, que es aquella que aprovecha la energía del Sol para producir calor, el cual puede ser usado para distintos procedimientos, como son, producción de agua caliente, calefacción, etc.

La energía **Solar Termoeléctrica**, que consiste en un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura, normalmente aceite térmico.

Y por último, la energía **Solar Fotovoltaica** que se basa en la obtención de electricidad obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica.

Biomasa, es la energía producida mediante el almacenamiento a corto plazo de la energía solar en forma de carbono mediante el proceso fotosintético y que posteriormente puede ser transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado. Dentro de ella se define también la energía **Biocombustible**, la cual mediante la obtención de la energía generada por la biomasa se genera una mezcla de hidrocarburos que se utilizan como combustible.

Energía Geotérmica, es aquella energía que puede ser obtenida mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar fluidos para su uso como calefacción en edificios o agua caliente sanitaria.

Energía Hidráulica, es aquella energía que aprovecha la caída de agua desde una cierta altura para generar energía eléctrica. Se aprovecha así la energía cinética de una corriente o salto de agua natural.

Energía Marina, es aquella producida por las olas del mar, las mareas, la salinidad y las diferencias de temperatura del océano, mediante las cuales se aprovecha la energía cinética producida para generar electricidad. Dentro de ella dependiendo de cómo se produzca la energía se encuentran distintos tipos. **Energía De Las Corrientes**, es aquella que se genera mediante las corrientes oceánicas; **Energía Osmótica**, es aquella producida por los gradientes de salinidad; **Energía Térmica Oceánica**, generada por las diferentes temperaturas a diferentes profundidades en el mar; **Energía Mareomotriz** es la correspondiente a la producida por las masas de agua en movimiento y por último la **Energía Olamotriz**, que se trata de la energía generada mediante las olas superficiales.

1.2. Situación de las renovables en España

Durante los últimos años, nuestro país ha dejado atrás la fase de lanzamiento de las energías renovables y se encuentra en la de consolidación y desarrollo, sus beneficios para nuestro país son grandes con relación a sus costes, que además tienden a bajar con el tiempo, a medida que progresá la tecnología.

Si bien la actual situación de crisis económica y las últimas regulaciones del sector han provocado una fuerte incertidumbre respecto a este sector. Como figura en el Real Decreto emitido el 27 de Enero de 2012 [1], por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos.

Debido a esto, y de acuerdo con la Ley 2/2011 de 4 de marzo de Economía Sostenible [2], los marcos de apoyo deberán basarse en los conceptos de estabilidad, flexibilidad para incorporar los avances tecnológicos, internalización de costes del sistema energético y priorización de la innovación.

Como resultado de la política de apoyo a las energías renovables, en el marco del Plan de Energías Renovables 2005-2010, el crecimiento de éstas durante los últimos años ha sido notable, y así, en términos de consumo de energía primaria, han pasado de cubrir una cuota del 6,3% en 2004 a alcanzar el 11,3% en 2010. Este porcentaje correspondiente al año 2010 se eleva al 13,2% si se calcula la contribución de las energías renovables sobre el consumo final bruto de energía, de acuerdo con la metodología establecida en la Directiva 2009/28/CE [3].

Cuando se habla de consumo de energía primaria se refiere a la cantidad total de recursos energéticos consumidos en un país o región para cualquier uso, bien sea un uso final o bien para su transformación en otra forma de energía. En este consumo puede incluirse o no la energía empleada para usos no energéticos, por ejemplo, la fabricación de plásticos a partir del petróleo. El consumo interior bruto de energía primaria se calcula a partir de la producción interior de energía, es decir, añadiendo las importaciones netas de recursos energéticos primarios y restando las exportaciones que se produzcan de estos recursos. Las unidades de medida más habituales son las toneladas equivalentes de petróleo (tep) y sus múltiplos (ktep o Mtep). Este indicador puede presentarse también en términos relativos: por habitante, por unidad de producto interior bruto, etc.

En el marco de los balances energéticos nacionales y en la planificación energética el indicador de consumo de energía primaria constituye un parámetro de especial

relevancia. Es el principal indicador de fuerza motriz en el ámbito energético. El gráfico siguiente muestra la estructura de este consumo.

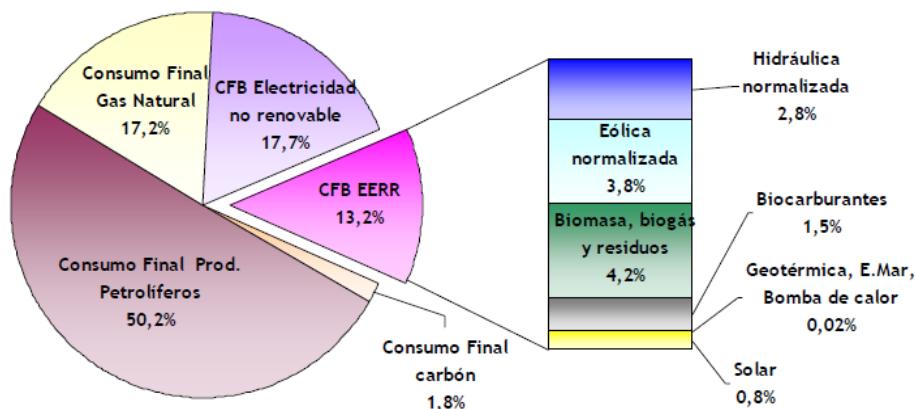


Figura 1.5 Consumo final bruto de energía en 2010.

En cuanto al papel de las renovables en la generación eléctrica, su contribución al consumo final bruto de electricidad ha pasado del 18,5% en 2004 al 29,2% en 2010. Aunque los datos reales indican un crecimiento desde el 17,9% en 2004 hasta el 33,3% en 2010. Por otro lado, la contribución de la electricidad renovable a la producción bruta de electricidad en España en 2010 fue de un 32,3% y su distribución por fuentes se puede observar en la siguiente figura.

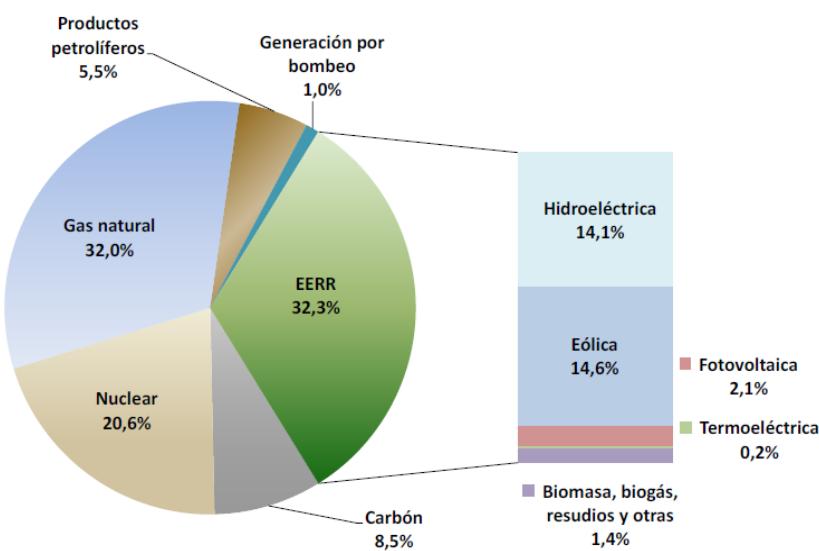


Figura 1.6 Contribución de la electricidad renovable y distribución por fuentes.

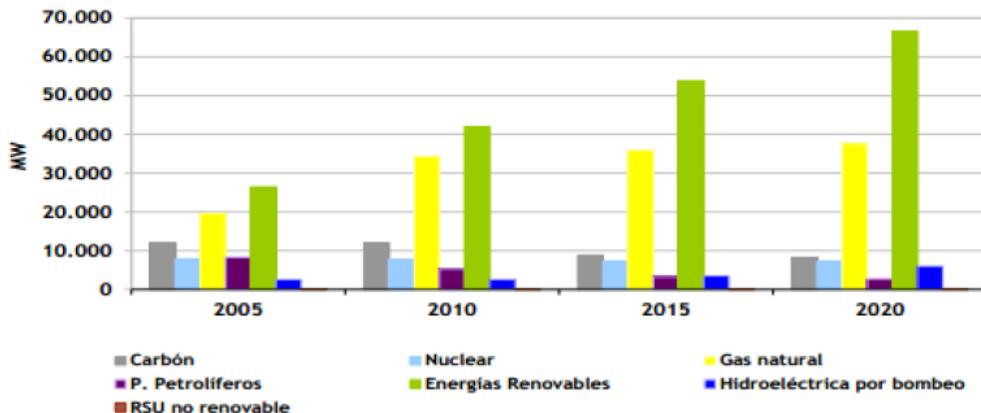


Figura 1.7 Escenario de Eficiencia Energética Adicional: Evolución de la capacidad eléctrica instalada según fuentes energéticas.

Es muy importante el conocer los costes derivados de la generación eléctrica para cada una de ellas, con objeto de poder tener una visión global de su potencialidad.

En la imagen se presenta una tabla con la previsión de coste de las diferentes tecnologías para el año 2020.

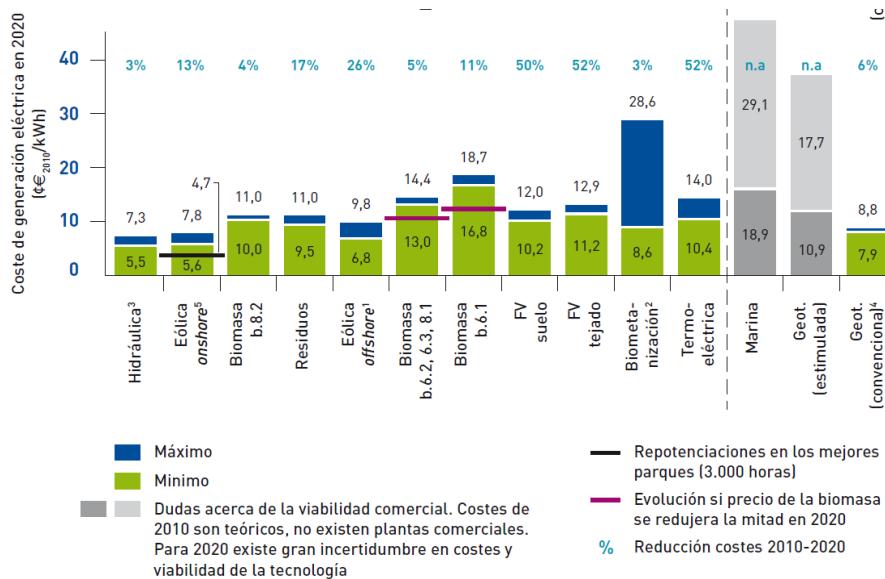


Figura 1.8 Previsión de coste para el año 2020.

Por último en líneas generales, en el siguiente gráfico se puede observar la aportación de las energías renovables (42%) al total de la generación de energía eléctrica en nuestro país en el año 2013.

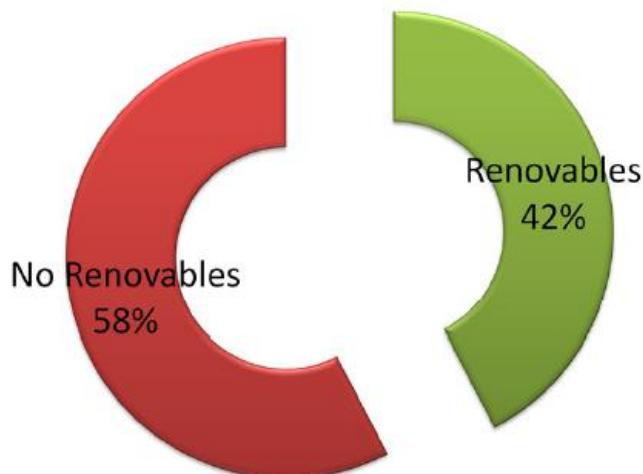


Figura 1.9 Total generación eléctrica en España año 2013.

Dentro de las energías renovables el objeto de este proyecto será la energía solar fotovoltaica. El sector solar fotovoltaico contó en 2010 con 3.787 MW de potencia instalada, que produjeron un total de 6.279 GWh. El sector está compuesto en (datos a fecha del 2010) por más de 500 empresas, sin considerar promotores, de las cuales un 10% son empresas fabricantes de materia prima, células, módulos fotovoltaicos y otros componentes.

En cuanto a los costes, es previsible que se mantengan los descensos recientes, si bien, no con la misma intensidad. Según los estudios realizados se prevé un descenso en los costes de inversión desde el rango de 2,5 €/W a 3,0 €/W en 2010 hasta un rango de entre 1,1 €/W a 1,3 €/W en 2020 [4].

En cuanto a la tipología de las instalaciones, se prevé una mayor penetración en edificaciones, con instalaciones de pequeña o mediana potencia, desde un modelo previo donde predominaban las grandes instalaciones en suelo. El potencial es inmenso, debido al alto recurso disponible y a la versatilidad de la tecnología, que permite su instalación cerca de los centros de consumo fomentando la generación distribuida renovable. Las propuestas planteadas están enfocadas, por una parte, a impulsar el descenso de los costes de la energía producida con la tecnología y, por otra, a superar otras barreras no económicas que permitan su integración a gran escala en el sistema eléctrico.

Para alcanzar los objetivos establecidos para el año 2020, y conseguir que la cuota de energía renovable sea mucho más elevada de 2020 en adelante, es preciso intensificar los esfuerzos en el ámbito de la I+D+i energética. Durante los últimos años el marco nacional de apoyo a la I+D+i ha facilitado que España alcance una posición de liderazgo en energías renovables, con grandes empresas y centros tecnológicos de investigación y desarrollo de prestigio internacional, como el CIEMAT y el CENER. Para el impulso del I+D+i en energía se cuenta con la recientemente creada ALINNE, *Alianza para la Investigación e Innovación Energéticas*, un gran pacto nacional público-privado que pretende responder a los grandes retos de las actividades de I+D+i en el ámbito del sector energético, contribuir a la definición de una estrategia nacional que ordene las políticas y programas públicos con las prioridades y necesidades de España en la materia, y jugar un papel protagonista en la fijación de una posición española común ante cada una de las situaciones que se planteen en materia de ciencia e innovación energética.

En este sentido, el Plan Estratégico Europeo en Tecnologías Energéticas (SET-Plan) define las líneas prioritarias de actuación en I+D+i en la tecnología solar fotovoltaica.

- Procesos avanzados de fabricación de células y módulos.
- Desarrollo de sistemas de almacenamiento eléctrico para instalaciones fotovoltaicas.
- Mejora del rendimiento y del periodo de vida de todos los componentes y sistemas de las distintas tecnologías fotovoltaicas.
- Desarrollo y sostenibilidad de materiales.

1.3. Situación política y legislativa de las renovables en España

1.3.1. Situación pasada

El primer marco regulatorio en España sobre energías renovables se dio a principio de los 80, poco después de producirse la segunda crisis internacional del petróleo, con la Ley 82/1980, sobre conservación de energía, cuyos principales objetivos eran el aumento de la eficiencia energética y la reducción de la dependencia energética del exterior. Esta ley representó el punto de partida para el desarrollo de las energías renovables en nuestro país.

Fue la ley 54/1997, del sector Eléctrico, la que estableció un verdadero marco de regulación de las energías renovables, estableció la liberalización del sector de la electricidad en España e implantó la producción en régimen especial, diferenciado del ordinario, basado en las tecnologías de generación que utilizan las energías renovables,

los residuos y la cogeneración. Fijó como objetivo para el año 2010 cubrir el 12% del total de la demanda energética con energías renovables con el apoyo al precio de venta de la electricidad renovable. A tal fin, y como respuesta a dichos objetivos se elaboró el Plan de Fomento de las Energías Renovables 2005-2010, en el que analizaba la situación y el potencial de estas energías y fijaba objetivos concretos para las diferentes tecnologías.

La regulación del Régimen Especial fue desarrollada en primer lugar por el Real Decreto 2818/1998, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración. El Real Decreto 1663/2000, de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión. Posteriormente por el Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, por el que se establece la metodología para la actualización y sistematización del régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica en Régimen Especial. Y por el actualmente en vigor Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Modificaciones al Real Decreto 661/2007, así como nuevas regulaciones del régimen especial vine recogidas en: el Real Decreto 1578/2008, referente a la retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica; e Real Decreto ley 6/2009, por el que se establece el registro de pre-asignación de retribución para las instalaciones del régimen especial; el Real Decreto 1565/2010 por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial; el Real Decreto 1614/2010, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica a partir de tecnologías solar termoeléctrica y eólica; el Real Decreto Ley 14/2010 por el que se limitan las horas equivalentes de funcionamiento de las instalaciones fotovoltaicas.

El ya finalizado Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010 se elaboró, como revisión del PER 2000-2010, para mantener el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12% del consumo total de energía en 2010. Incorporó dos objetivos indicativos para el año 2010: 29,4% mínimo de generación eléctrica con renovables sobre el consumo nacional de electricidad y 5,75% mínimo de biocarburantes en relación con el consumo de gasolina y gasóleo en el transporte.

El Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, responde también a una nueva exigencia de sostenibilidad de los procesos edificatorios con las exigencias básicas para el ahorro y la eficiencia energética. Por un lado la contribución solar mínima de agua caliente sanitaria, y la contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.

1.3.2. Situación futura

Las energías renovables en España se enfrentan en la actualidad a barreras para cumplir la Directiva 2009/28/CE y los objetivos del El Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011–2020 en 2020. Estas barreras se deben fundamentalmente a las incertidumbres creadas por el Marco Regulatorio Español en los últimos años, con una falta de previsibilidad y con continuos cambios en la regulación. También la posible aplicación de retroactividad en la legislación de las fuentes de energía renovable afecta a la credibilidad en el sector y como consecuencia amenaza a la futura inversión en España con el riesgo de no alcanzar los compromisos adquiridos en materia energética con la Unión Europea.

El Real Decreto-ley 1/2012, comentado anteriormente, suspende, con carácter temporal, el apoyo a la producción de energía eléctrica con fuentes renovables que, de acuerdo con el PANER, será el área de mayor aportación para cumplir los requisitos de la Directiva 2009/28/CE sobre energías renovables. Dicho Real Decreto también apuesta por un nuevo modelo para el desarrollo de la electricidad renovable.

En julio de 2013 el gobierno presentó la reforma del sistema eléctrico, reforma encaminada a corregir el déficit tarifario que, según el propio gobierno, y a pesar de ser España uno de los países europeos con los precios más altos de la electricidad, sigue aumentando como consecuencia fundamental de las primas a las renovables y a la amortización de la deuda del sector. Estas reformas quedan recogidas en el Real Decreto-ley 9/2013, de 12 de julio, “por el que se adoptan medidas urgentes para garantizar la estabilidad financiera del sistema eléctrico”. Una de las medidas regulatorias de esta reforma, tal como se establece en la disposición final segunda de este Real Decreto-ley, es la de establecer un nuevo régimen jurídico y económico de la actividad de producción a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos que modificará el modelo retributivo de las instalaciones existentes.

Para articular este nuevo régimen, el Real Decreto-ley en su disposición derogatoria única procede a la derogación del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, “por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial” y del Real Decreto 1578/2008, de 26 de septiembre, “de retribución de la actividad de producción de energía eléctrica mediante tecnología solar fotovoltaica para instalaciones posteriores a la fecha límite de mantenimiento de la retribución del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, para dicha tecnología”. El Ministro de Industria, Energía y Turismo ya ha presentado para su aprobación una propuesta de Real Decreto “por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovable, cogeneración y residuos”.

También se ha presentado una propuesta de Real Decreto “por el que se establece la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo”, de regulación del autoconsumo en respuesta al RD 1699/2011 que, en su disposición adicional segunda, daba un plazo de 4 meses al Ministro de Industria, Turismo y Comercio para que elevara al gobierno dicha propuesta de borrador.

La aprobación de ambas propuestas de Reales Decretos supondrá importantes cambios en el sector de las energías renovables tanto para instalaciones de generación para venta de energía como para instalaciones de generación interconectadas con la red de distribución y utilizadas para autoconsumo propio.

En el caso de instalaciones para autoconsumo la propuesta de Real Decreto empeora bastante la rentabilidad de estas instalaciones respecto al marco regulatorio anterior, también se aleja de una de las propuestas de actuación recogidas en el PANER 2011-2020 de potenciación del autoconsumo de energía eléctrica generada con renovables, mediante mecanismos de balance neto [5].

El mayor desarrollo de las fuentes renovables en España corresponderá, como se ha comentado, a las áreas de generación eléctrica, con una previsión de la contribución de las energías renovables a la generación bruta de electricidad del 42,3% en 2020. Para cumplir estos objetivos el PANER propone un conjunto de políticas y medidas entre las que se pueden citar las siguientes: simplificación de los procedimientos administrativos de autorización de instalaciones de EERR; favorecer las instalaciones de generación eléctrica a partir de fuentes renovables destinadas al autoconsumo; establecer un marco retributivo estable, predecible, flexible, controlable y seguro para los promotores y el sistema eléctrico, nueva regulación para facilitar la conexión de las instalaciones de generación eléctrica con energías renovables.

Según los datos recogidos en el estudio “Empleo asociado al impulso de las Energías Renovables” realizado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) en el año 2011, la energía solar fotovoltaica y la solar térmica constituyen las principales actividades de las empresas del sector. Un 54,6% de las empresas desarrollan actividades en el campo de la energía solar fotovoltaica mientras que el 41,8% de ellas lo hacen en el campo de la energía solar térmica. El aprovechamiento energético de la biomasa, así como la energía eólica, también constituyen una parte importante de la actividad empresarial del sector (24,4% y 22,1% respectivamente). Más de tres cuartas partes de las empresas son totalmente independientes. Pero las mayores en términos de empleo son multinacionales de diverso tipo. Atendiendo al tamaño, las empresas del sector en España son principalmente pequeñas empresas (70% de las empresas no supera los 10 trabajadores y el 94% de los casos no supera los 50 trabajadores).

En cuanto a las actividades concretas en las que trabajan las empresas de energías renovables merecen especial atención las empresas de instalación, seguidas de las ingenierías y actividades relacionadas con el desarrollo de los proyectos. La operación y mantenimiento muestra un porcentaje interesante de actividad, con relativa importancia aparecen también las relacionadas con Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).

1.4. Introducción a la energía solar fotovoltaica

El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología. La energía solar es una de las fuentes de energía renovable que más desarrollo está experimentando en los últimos años y con mayores expectativas de futuro. Cada año, el Sol arroja sobre la tierra cuatro mil veces más energía de la que se consume anualmente en nuestro planeta, lo que demuestra que esta fuente energética está aun infratilizada.

El aprovechamiento de la energía solar consiste en captar por medio de diferentes tecnologías la radiación del Sol que llega a la Tierra con el fin de emplear esa energía para diferentes aplicaciones. Queda demostrado que el aprovechamiento del Sol no es exclusivo de zonas con alta radiación solar: Alemania, a pesar de contar con poca radiación solar, es el país con más instalaciones solares de toda Europa, con alrededor del 62% de toda la potencia instalada en el continente. Esto es debido a que se incentiva a los ciudadanos a que produzcan una energía limpia, llegando a ser esta energía de menor coste que la producida por el carbón o el gas.

Como consecuencia de lo comentado, es lógico pensar en aprovechar dicha energía gratuita, limpia e inagotable por todos los medios posibles y permitir así una liberación de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o simplemente agotables.

Por otro lado, también hay que tener en cuenta que esta energía está sometida a continuas fluctuaciones como por ejemplo la reducción notable de radiación solar en invierno, etc. Por ello, es de vital importancia proseguir con el desarrollo y perfeccionamiento de la tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar.

Los dos aspectos fundamentales que pueden captarse por medio de la energía solar son calor y la electricidad. El calor se capta mediante los captadores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos.

Actualmente, la energía solar fotovoltaica podría ser la solución al problema de la electrificación rural, ya que los paneles al no poseer partes móviles son casi inalterables con el paso de los años (al menos hasta su periodo de vida media, estimado normalmente en unos 25 o 30 años), no contaminan y no producen ningún ruido.

A todo esto se debe añadir que no consumen combustible y apenas necesitan mantenimiento. Además, aunque con mucho menos rendimiento, también funcionan en días nublados, puesto que llegan a captar la radiación difusa que llega a través de las nubes.

La electricidad generada por medio de una instalación fotovoltaica puede ser inyectada a la red general, obteniendo una buena rentabilidad económica en función de las políticas establecidas en cada país, ya que cada vez más países priman tanto a los pequeños como a los grandes productores de electricidad fotovoltaica, dado el beneficio que aporta para el medio ambiente. Durante el año 2008 España se convirtió en el primer mercado fotovoltaico del mundo, con más de 2.500 MW instalados, superando con ello a Alemania, tradicional líder internacional en implantación de la energía solar. Sin embargo, a diferencia de lo que ha ocurrido en Alemania, el crecimiento en España no se ha producido de un modo sostenible. Como resultado, el Gobierno recortó su política de ayudas al aprobar el Real Decreto 1578/2008. Este recorte llegó a casi paralizar el sector fotovoltaico español a causa de los cambios de regulación: A grandes rasgos, este recorte se ha traducido en paralizar el mercado durante más de seis meses por el cambio regulatorio; reducir la retribución por la energía producida un 30%; introducir una reducción progresiva de la retribución que puede superar el 10% anual; establecer un límite máximo anual de 500 MW durante los próximos años, con un nuevo registro para adjudicar esta potencia que complica la tramitación administrativa de los proyectos; y dividir el mercado en dos segmentos, uno para plantas solares en suelo y otro para instalaciones incorporadas a la edificación, cuando más del 95% del mercado estaba orientado al suelo.

Aunque en diciembre del 2010 según el Real Decreto establecido a fecha 23 de diciembre, se recortan en nuestro país una serie de primas pertenecientes a este ámbito. Se establece con carácter general la posibilidad de limitar las horas equivalentes de funcionamiento con derecho al régimen económico primado que tengan reconocido. De este modo se fijan expresamente dichos valores de referencia de acuerdo con los valores utilizados para el cálculo de su retribución establecidos en el Plan de Energías Renovables 2005-2010 y los reflejados en el Real Decreto 661/2007 [6], de 25 de mayo por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, teniendo en cuenta la zona solar climática donde se ubique la instalación, de acuerdo con la clasificación de zonas climáticas según la radiación solar media en España establecidas en el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación [7].

Uno de los aspectos fundamentales de la importancia de la energía solar dentro del ámbito de las energías renovables, es que la mayor parte de las fuentes energéticas renovables tienen su origen, directa o indirectamente en el Sol. Haciendo una comparativa de esta fuente de energía con otras de origen no solar, se deben destacar una serie de ventajas, nada despreciables:

- Con 1000 W/m², la densidad máxima de potencia de la radiación global sobre la superficie de la Tierra supone un múltiplo de la de fuentes energéticas comparables, tales como, la energía geotérmica (0.063 W/m²)
- Todo el mundo (con las limitaciones de cada emplazamiento) tiene acceso a la radiación solar. Los costes de la explotación son nulos o mínimos. Una vez “enchufada”, la energía fluye con costes de funcionamientos nulos o bajos.
- La presencia de la radiación solar sobre nuestro planeta se corresponde, en gran medida, con las regiones de asentamiento humano, lo que favorece la organización de una industria energética descentralizada.
- La evolución cronológica de la radiación solar puede planificarse bien y la media anual es muy constante.
- El tiempo de amortización energética de las modernas plantas de energía solar y plantas solares térmicas está muy por debajo de su vida operativa prevista, de más de 25 años. Representan, por tanto, verdaderas fuentes energéticas y a lo largo de su vida generan ya, con el actual nivel técnico, mucha más energía de la que se precisa para su construcción.
- La explotación de la energía solar no está asociada a ninguna clase de riesgos medioambientales. Quedan, pues, descartados los accidentes de petroleros, los reactores siniestrados u otras catástrofes causadas por el hombre.
- El aprovechamiento de la energía solar favorece la distensión internacional. Contribuye a evitar en todo el mundo los conflictos militares por recursos fósiles y a reducir la pobreza.

En definitiva y cómo se puede ver, nos encontramos ante una fuente de energía que, además de renovable, se nos presenta como una clara apuesta de futuro de cara al planteamiento energético en los próximos años, pese a la problemática actual que suscita respecto al coste del KWh y sobre la discontinuidad de la generación, debido a lo intermitente del recurso.

1.4.1. Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico (también denominado en ocasiones fotovoltaico) es la base del proceso mediante el cual una célula fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad. La luz solar puede entenderse como compuesta por fotones, o partículas energéticas. Dependiendo de las longitudes de onda del espectro solar, los fotones tienen distintas energías asociadas.

Cuando la luz incide sobre una célula fotovoltaica, los fotones pueden ser reflejados, absorbidos y en ocasiones, incluso atravesar el laminado fotovoltaico sin generar ninguna interacción; siendo los absorbidos los únicos que pueden llegar a producir electricidad.

La célula fotovoltaica es un dispositivo que convierte directamente la luz solar en electricidad. Se basan en el anteriormente citado efecto fotoeléctrico, se fabrican de materiales especiales llamados *semiconductores*, tales como el silicio. Cuando la luz solar choca en la célula, una cierta porción de ella es absorbida dentro del material semiconductor, esto significa que la energía de la luz absorbida es transferida al semiconductor, provocando que se liberen electrones dentro del material. Al desprenderse estos electrones con su carga negativa (N) originan la aparición de huecos o lagunas con cargas positivas (P). Como los electrones tienden a concentrarse del lado de la placa donde incide la luz solar, se genera un campo eléctrico con dos zonas bien diferenciadas: la negativa, en la cara iluminada donde están los electrones y la positiva en la cara opuesta donde están los huecos o lagunas. Si ambas zonas se conectan eléctricamente mediante conductores adheridos a cada una de las caras de la placa el desequilibrio eléctrico origina una fuerza electromotriz o diferencia de potencial, creando una corriente eléctrica para igualar las cargas. Dicha corriente, obviamente continua, se genera en un proceso constante mientras actúe la luz solar sobre la cara sensible de la lámina.

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, puesto que es ahí donde se crea la corriente de electrones. Los semiconductores son tratados para formar dos capas con diferente dopado (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra.

Además de por los semiconductores, las células solares están formadas por distintas capas de material, como son, unos contactos metálicos, cuya función es captar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa y crear un contacto posterior para completar el circuito eléctrico.

Un vidrio en la parte superior de la célula, cuya función es sellarla y protegerla de las condiciones ambientales. Y por último una capa anti-reflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos.

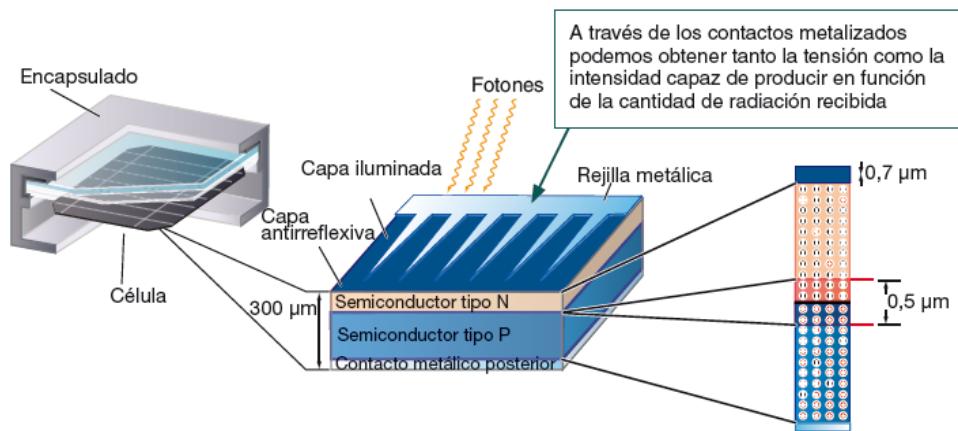


Figura 1.10 Estructura de una célula solar (Fuente: *Mcgraw-Hill*)

El rendimiento de las células fotovoltaicas se mide por la proporción de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, en función de la energía asociada a la radiación incidente. Cuanto mayor rendimiento tengan las células, más competitiva será la energía fotovoltaica en comparación con otras fuentes.

Respecto al diseño estructural de la célula existen tres tipos, los cuales dependen de las limitaciones del material usado:

Homounión

El material más utilizado es el silicio cristalino. Requiere el uso de materiales que puedan ser de tipo “p” y de tipo “n” al doparlos, no muchos materiales fotovoltaicos tienen esta propiedad.

Heterounión

El material más utilizado es el CIS (cobre-indio-selenio). Esta estructura es típica para materiales de película delgada que absorben la luz mucho mejor que el silicio; no siendo necesario que el material sea de tipo “p” y tipo “n”.

Multiunión o Multijunta

Con esta estructura se pretende eliminar la limitación por la energía de banda prohibida (E_g) del material puesto que utiliza células con más de un ancho de banda y más de una junta para generar un voltaje. Pueden lograr una mayor eficiencia de conversión total porque pueden convertir una fracción más grande del espectro luminoso en electricidad. Siempre estarán conectadas las celdas en orden descendente de acuerdo a su ancho de

banda. Muchas de las investigaciones acerca de esta estructura han conseguido alcanzar eficiencias alrededor del 35% bajo luz solar concentrada.

1.4.2. Dispositivos

La célula solar es un dispositivo semiconductor capaz de convertir los fotones procedentes del Sol (luz solar), en electricidad de una forma directa e inmediata. Esta conversión se conoce como el ya mencionado efecto fotoeléctrico o fotovoltaico.

Las células solares tienen muchas aplicaciones. Son particularmente interesantes, y han sido históricamente utilizadas, para producir electricidad en lugares donde no llega la red de distribución eléctrica, tanto en áreas remotas de la Tierra como del espacio, haciendo posible el funcionamiento de todo tipo de dispositivos eléctricos como satélites de comunicaciones, radioteléfonos o bombas de succión de agua.

Ensambladas en paneles o módulos y dispuestas sobre los tejados de las casas, por medio de un inversor, pueden injectar la electricidad generada en la red de distribución para el consumo, favoreciendo la producción global de energía primaria de un país, de manera limpia y sostenible.

A lo largo del tiempo, las células solares han sufrido varias evoluciones en cuanto a su composición, quedando divididas en tres generaciones.

La *primera generación*, se corresponde con células compuestas de Silicio que tienen gran superficie, alta calidad y se pueden unir fácilmente. Las tecnologías de la primera generación no permiten ya avances significativos en la reducción de los costes de producción.

La *segunda generación*, se corresponde con células compuestas de compuestos químicos (II-VI y III-V). Algunos de los materiales con más éxito en la segunda generación han sido las películas finas de teluro de cadmio (CdTe), CIGS, de silicio amorfo y de silicio microamorfo (estos últimos consistentes en una capa de silicio amorfo y microcristalino). Estos materiales se aplican en una película fina en un sustrato de apoyo tal como el vidrio o la cerámica, la reducción de material y por lo tanto de los costos es significativa. Estas tecnologías prometen hacer mayores las eficiencias de conversión, en particular, el CIGS-CIS, el DSC y el CdTe que son los que ofrecen los costes de producción significativamente más baratos. Estas tecnologías pueden tener eficiencias de conversión más altas combinadas con costos de producción más baratos.

La *tercera generación*, se refiere más concretamente a células diseñadas con nuevos materiales, como puedan ser tintas fotosensibles, orgánicas e híbridas. Se pretenden conseguir eficiencias de conversión eléctrica teóricas mayores que las actuales y a un

precio de producción mucho menor. La investigación actual se dirige a la eficiencia de conversión del 30-60%, manteniendo los materiales y técnicas de fabricación a un bajo costo.

En el mercado se dispone actualmente de una docena de diferentes materiales de células, los cuales se encuentran en continua investigación.

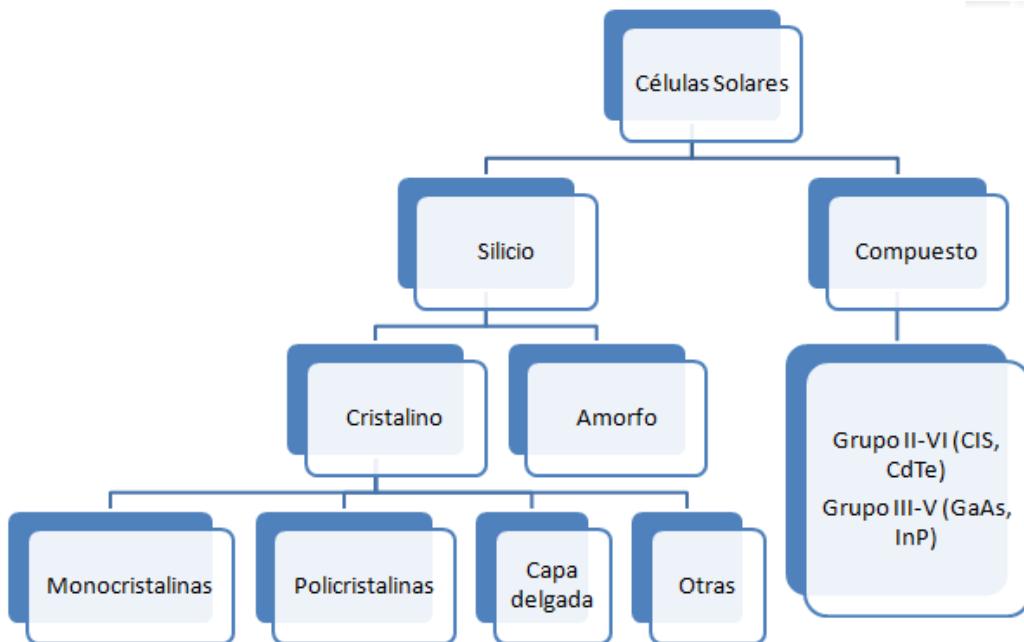


Figura 1.11 Tipos de células Fotovoltaicas.

Como se puede observar en el gráfico, la principal división aparece entre las células de Silicio y las de otros compuestos. En la práctica, la mayor parte son células solares de Silicio, en concreto de Silicio Cristalino, cabe destacar los tres grupos que existen y sus principales características:

Células de silicio monocristalinas

Son células que presentan una estructura completamente ordenada, su comportamiento uniforme las hace buenas conductoras. Son de difícil fabricación y se reconocen por su monocromía azulada oscura y metálica. Presentan un rendimiento entre 15% - 18%.

Células de silicio policristalinas

Son células que presentan una estructura ordenada por regiones separadas. Los enlaces irregulares disminuyen el rendimiento. Su superficie está estructurada en cristales con distintos tonos de azules y grises metálicos. Presentan un rendimiento entre 12% - 14%.

Células de capa delgada

Son células que presentan un alto grado de desorden, por su número de defectos estructurales y de enlaces. Por ello su proceso de fabricación es más simple que los anteriores y menos costoso. Se depositan en forma de lámina delgada sobre vidrio o plástico. Son eficientes bajo iluminación artificial, radiación difusa o situaciones de sombreado, y su color es marrón homogéneo. Presentan un rendimiento menor al 10%.

1.4.3. Tipologías de sistemas fotovoltaicos

La energía generada a raíz del efecto fotoeléctrico puede ser utilizada de dos formas, mediante instalaciones aisladas o instalaciones conectadas a la red.

Instalaciones aisladas

Producen electricidad sin ningún tipo de conexión con la red eléctrica, a fin de dotar de este tipo de energía al lugar donde se encuentran ubicadas, mediante subsistemas de acumulación de energía. Pueden distinguirse dos bloques:

- Aplicaciones espaciales: sirven para proporcionar energía eléctrica a elementos colocados en el espacio, tales como, satélites, estaciones espaciales, etc. La investigación en esta área fue la que propicio el desarrollo de los equipos fotovoltaicos tal y como se conocen en la actualidad.
- Aplicaciones terrestres, en las que cabe destacar:
 - Telecomunicaciones: telefonía rural, vía radio; repetidores (de telefonía, televisión).
 - Electrificación de zonas rurales y aisladas: están pensadas para países y regiones en desarrollo y todas aquellas zonas en las que no existe acceso a la red eléctrica comercial.
 - Señalización: se aplica, por ejemplo, a señales de tráfico luminosas, formadas por diodos LED, alimentados por un panel solar y una batería.
 - Alumbrado público: se utiliza en zonas en las que resulta complicado llevar una línea eléctrica convencional.
 - Bombeo de agua: están pensadas para lugares como granjas, etc. Su uso puede ser tanto para agua potable como para riego.
 - Redes VSAT: redes privadas de comunicación que actúan a través de satélites, siendo la energía solar utilizada para alimentar las estaciones de la red.
 - Telemetría.



Figura 1.12 Central FV aislada en Afganistán.

Instalaciones conectadas a la red

En ellas, el productor no utiliza la energía directamente, sino que es vendida al organismo encargado de la gestión de la energía en el país. Tienen la ventaja de que la producción electricidad se realiza precisamente en el periodo de tiempo en que la curva de demanda de electricidad aumenta, es decir, durante el día. Cabe destacar:

- **Centrales fotovoltaicas y huertos solares:** recintos en los que se concentra un número determinado de instalaciones fotovoltaicas de uno o diferentes propietarios con el fin de vender la electricidad producida a la compañía eléctrica con la que se haya establecido en contrato. Cada instalación tiene su propietario, pero todas se ubican en el mismo sitio, esto posibilita mejoras en el mantenimiento, seguridad, etc.



Figura 1.13 Huerto Solar en Murcia.

- **Edificios fotovoltaicos:** es una de las últimas aplicaciones desarrolladas. La rápida evolución ha permitido el uso de módulos como material constructivo en cerramientos, cubiertas y fachadas de gran valor visual. Además es muy adecuado para la generación de electricidad en zonas urbanas, puesto que no provoca efectos ambientales adversos. La mayoría de estos sistemas han sido integrados en tejados, porque es allí donde se alcanza la máxima captación de energía solar.



Figura 1.14 Edificio fotovoltaico.

1.5. Diseño de práctica de laboratorio.

Uno de los objetivos de este proyecto se enmarca en la implementación de prácticas de laboratorio para las asignaturas G822 y G1276 (“*Energía y Telecomunicaciones*”) impartidas por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria y el Grupo de Ingeniería Fotónica; sirviendo como base para la realización de prácticas de la asignatura transversal (“*Formándote como ingeniero a través del hardware libre*”) impartida por el Grupo de Ingeniería Fotónica.

Por ello se realizará la creación de un guión de prácticas mediante el cual el alumnado pueda familiarizarse con el proceso de caracterización de las células fotovoltaicas, así como los aspectos ambientales que influyen en ese proceso. Además de una introducción al manejo de hardware *open source* gracias al cual se permitirá monitorizar y visualizar el proceso de caracterización fotovoltaica.

CAPITULO 2. Hardware *open source*

En este capítulo se hablará acerca del Hardware *open source* empleado en el presente proyecto.

2.1. Introducción al hardware *open source*

A pesar de ser mucho más desconocido que el software libre, el hardware libre también existe y desde hace tiempo. De hecho, el origen de los proyectos basados en dispositivos de “código abierto” se remonta a la década de los 70 del siglo pasado, cuando el movimiento hippie popularizó la cultura del DIY (hazlo tú mismo, del inglés *Do It Yourself*).

En los años 70 muchos de los futuros directores ejecutivos de las grandes empresas del Hardware y Software de la actualidad compartían todos sus diseños electrónicos de aparatos informáticos de “forma abierta”, es decir que todos podían acceder a los planos, esquemas, PCBs (*Printed Circuit Board*: Placa de Circuito Impreso) de construcción de los dispositivos. En los años 1990 surge el sitio Web de Reinoud Lamberts, *Open Design Circuits*, que fue el primero en proponer la creación de una comunidad del diseño del hardware con el espíritu del software libre, consiguiendo sentar las bases para una comunidad entera.

El *software libre* ofrece al usuario cuatro libertades: libertad de uso, de estudio y modificación, de distribución y de redistribución de las mejoras. Existen licencias que las garantizan y que dan una cobertura legal, como por ejemplo la GPL (*General Public License*), siendo su propósito el declarar que el software cubierto por esta licencia es software libre y protegerlo de intentos de apropiación que restrinjan esas libertades a los usuarios.

El *hardware abierto* o libre toma estas mismas ideas para aplicarlas en su campo. Es una propuesta casi tan antigua como la del *software libre*, sin embargo su empleo no es tan directo. Compartir diseños hardware es más complicado. No hay una definición exacta. Incluso el propio Richard Stallman, programador estadounidense y fundador del movimiento por el software libre, afirma que las ideas del software libre se pueden aplicar a los ficheros necesarios para su diseño y especificación (esquemas, PCB, etc.), pero no al circuito físico en sí. Al no existir una definición clara de hardware abierto, cada autor lo interpreta a su manera.

Según su naturaleza pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- **Hardware estático.** Es el conjunto de elementos materiales de los sistemas electrónicos, es decir, tiene una existencia física.
- **Hardware reconfigurable.** Es el que se describe mediante un lenguaje HDL, (*Hardware Description Language*, lenguaje de descripción hardware) y que permite especificar con todo detalle su estructura y funcionalidad. A partir de

este código se generan unos ficheros de configuración (*bitstreams*) para que los dispositivos del tipo FPGA se reconfiguren, funcionando según lo descrito.

Dada su diferente naturaleza, al hablar de hardware libre hay que especificar de qué tipo de hardware se está hablando. Para hacer que el hardware reconfigurable sea libre, sólo hay que aplicar una licencia GPL a su código. Sin embargo, no está tan claro qué se entiende por hardware libre cuando se refiere al hardware estático.

Algunos de los principios que se pretenden promover para considerar productos físicos como hardware libre son los siguientes:

- Publicar la documentación incluyendo los archivos de los diseños, que deben permitir su modificación y distribución.
- Especificar que porción del diseño es abierta, en caso de que no se liberen todos sus componentes.
- Ofrecer el software necesario para leer el archivo del diseño o la documentación suficiente de las funcionalidades requeridas, para que se puede escribir el código *open source* del mismo fácilmente.
- Ofrecer una licencia que permita producir derivados y modificaciones, además de su re-distribución bajo la licencia original, así como su venta y manufactura.
- La licencia no debe restringir que se venda o comparta la documentación necesaria.
- La licencia no debe discriminar a ningún grupo o persona
- La licencia no debe de restringir a ningún campo o actividad el uso de la obra, es decir, no se puede limitar su uso únicamente para negocios o prohibir que sea utilizado para investigación.
- El licenciamiento de la obra no puede depender de un producto en particular.
- La licencia no debe restringir otro hardware o software, es decir que no puede insistir en que otros componentes de hardware o software externos a los dispositivos sean también *open source*.
- La licencia tiene que ser neutral, ninguna disposición de la misma debe de basarse en una tecnología específica, parte o componente, material o interfaz para su uso.

Una de las primeras iniciativas nacidas bajo el concepto de hardware libre es el proyecto **Arduino**. Esta plataforma consiste en una placa con diversas entradas y salidas que permite el desarrollo de infinidad de proyectos, al mismo tiempo que sirve de plataforma para estudiantes como iniciación al mundo de la electrónica.

Está disponible con una licencia *Creative Commons* que otorga libertad de desarrollo, aunque los productos derivados deben cumplir unas determinadas pautas, sobre todo en lo relativo a la propia denominación de Arduino, lo cual viene a ser una especie de control de marca.

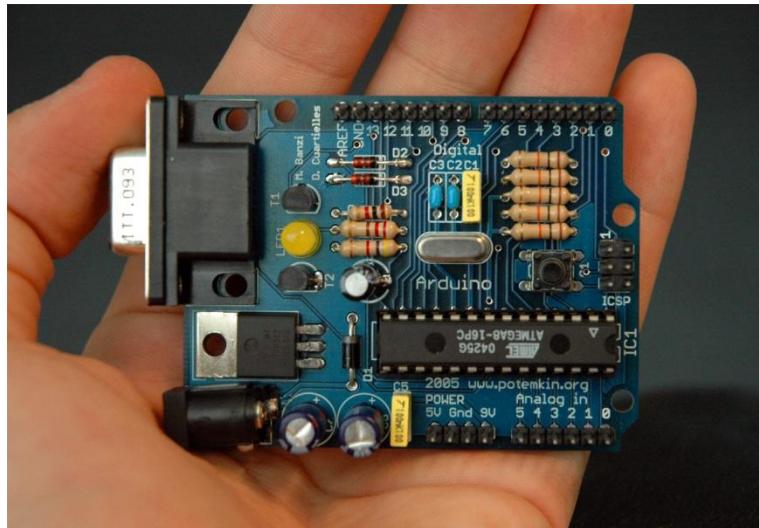


Figura 2.1 Placa Arduino.

Seguida a ésta, surgen otra serie de iniciativas interesantes en torno a este concepto y que promueven desde la creación de ordenadores portátiles y teléfonos modulares hasta la fabricación de automóviles, pasando por el impulso de la robótica en el aula. Algunas de las más destacadas son:

- **Raspberry Pi**, se trata de un ordenador del tamaño de una tarjeta de crédito que consta de una placa base sobre la que se ensambla un procesador, un chip gráfico y memoria RAM. Fue lanzado en 2009 por la Fundación Raspberry Pi para estimular la enseñanza de informática en escuelas de todo el mundo. Esta propuesta cuenta con una notable comunidad de desarrolladores dispuestos a compartir paso a paso las nuevas funcionalidades que van encontrándose a la placa.



Figura 2.2 Placa Raspberry Pi.

- **RepRap**, fue un proyecto iniciado en 2004 por Adrian Bowyer y sus compañeros de la Universidad de Bath, en Reino Unido, para crear una impresora 3D capaz de replicarse a sí misma mediante la impresión de la mayoría de sus componentes. El dispositivo está accesible bajo licencia GNU GPL, que permite que cualquiera pueda copiar, estudiar, distribuir y mejorar sus diseños y código fuente. Gracias a ello, existen varios modelos de RepRap que día a día son mejorados por la comunidad de hardware libre.

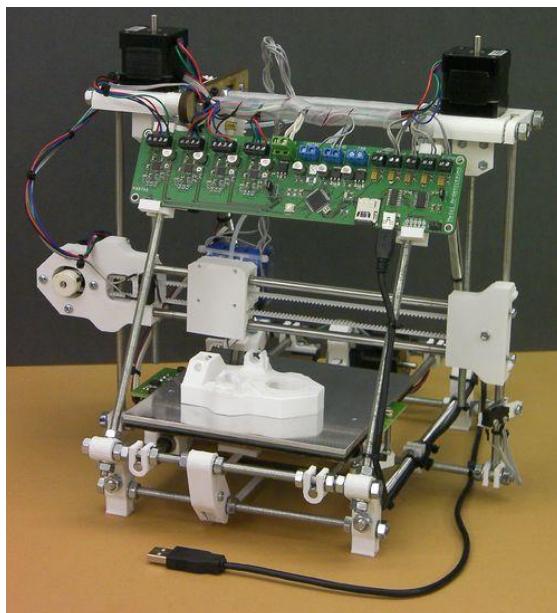


Figura 2.3 Impresora 3D RepRap.

- **Uzebox**, posiblemente, sea un proyecto que muchos conozcan porque no es nada nuevo y ya lleva unos años de andadura. Este proyecto de hardware libre tenía como objetivo desarrollar una consola de videojuegos totalmente libre y abierta, un dispositivo que se ha distribuido en forma de kit y que permite rescatar los mandos de una "clásica consola".



Figura 2.4 Videoconsola con Uzebox.

- **FEZ**, se trata de una tecnología que utiliza placas de desarrollo basadas en .NET Micro Framework para sus programas, permitiendo de esta manera la ejecución de código escrito en C# sin necesidad de sistema operativo. La utilización de este código ofrece muchas más posibilidades a la hora de programar y cuenta con librerías muy útiles.



Figura 2.5 Placa de desarrollo tipo FEZ.

2.2 Introducción a Arduino

El proyecto *Arduino* surge de la mano del profesor e ingeniero Massimo Banzi, del Instituto de Diseño Interactivo IVREA, en Ivrea (Italia). Sus alumnos trabajaban en proyectos en los que utilizaban microcontroladores, los cuales en la gran mayoría tenían un coste elevado, lo que ocasionaba que muchos de ellos no se lo pudieran permitir. En ese momento, y de la mano de Hernando Barragán, se pusieron a trabajar en su propio hardware, siempre pensando en que todas aquellas personas que quisieran colaborar en el proyecto, pudieran hacerlo. Quisieron desarrollar el producto de la manera más completa posible y a un precio más competitivo que el resto.

Poco a poco ha surgido una legión de seguidores de esta plataforma de *hardware* abierto, debido principalmente a su sencillez y a la multitud de tareas que puede desarrollar. Las placas Arduino utilizan un microcontrolador **Atmel AVR** encargado de dirigir los puertos de entrada/salida. Los microcontroladores de la familia **ATMEGA** son de los más usados dentro de la plataforma y se encargan de dirigir el flujo de datos.

Arduino también simplifica el proceso de trabajar con los microcontroladores, y ofrece algunas ventajas para los profesores, estudiantes y aficionados:

- *Asequible*, las placas Arduino son relativamente baratas en comparación con otras plataformas de microcontroladores. La versión menos costosa del módulo Arduino puede ser montada a mano.
- *Multiplataforma*, el software de Arduino funciona en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux. La mayoría de los sistemas de microcontroladores están limitados a Windows.
- *Entorno de programación simple y claro*, el entorno de programación de Arduino es suficiente para los usuarios avanzados y de fácil uso para los principiantes, pero flexible. Para los profesores, se basa convenientemente en el entorno de programación *Processing*.
- *El código abierto y extensible en software*, el software se publica como herramientas de código abierto, disponible para la extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ampliarse a través de librerías C++ e incluso añadir código manual.
- *El código abierto y el hardware extensible*, el Arduino se basa en ATMEGA8 y ATMEGA168 microcontroladores de Atmel. Los planes para los módulos están publicados bajo una licencia de *Creative Commons*, por lo que los diseñadores de circuitos con experiencia pueden hacer su propia versión del módulo, ampliándolo y mejorándolo. Incluso los usuarios con poca experiencia pueden

construir la versión tablero del módulo con el fin de entender cómo funciona y ahorrar dinero.

Respecto al lenguaje de programación, como se ha comentado anteriormente, es el llamado *Processing/Wiring*. Su sintaxis es parecida a la de C y lenguajes similares. Permite crear un cargador de arranque o **bootloader** cuya misión es iniciar las funciones del microcontrolador. El entorno de desarrollo utilizado en estos casos es “**Arduino IDE**”. Basado en Java, ofrece un editor de texto y una consola de depuración junto a las opciones para cargar en el microcontrolador el *bootloader* desarrollado por medio de un cable USB-FTDI.

El número de bits, la velocidad y la memoria disponible de este microcontrolador parecen ser los de una micro-computadora de inicios de los años ochenta. Sin embargo, no hay que perder de vista que los microcontroladores se utilizan principalmente en sistemas embebidos, por ejemplo dentro de electrodomésticos, automóviles, aparatos médicos y juguetes. Típicamente, estos sistemas no necesitan la velocidad ni la cantidad de memoria de una computadora convencional.

El AVR es un procesador con arquitectura Harvard. Esto quiere decir que los dispositivos de almacenamiento para instrucciones y datos están físicamente separados. Esto contrasta con la arquitectura de von Neumann, en donde se utiliza el mismo hardware de memoria principal para almacenar datos e instrucciones [8].

2.2.1 Tipos de Arduino en el mercado

En la actualidad existen varios modelos de Arduino en el mercado, algunos de los principales son:

- Arduino UNO

Esta es la última revisión de la placa Arduino USB básica. Se conecta al ordenador con un cable USB estándar y contiene todo lo necesario para programar la placa. Se puede ampliar con gran variedad de shields. Tiene un ATmega328, también consta de 14 pines de entrada/salida de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM, 6 entradas analógicas, un velocidad de reloj de 16 MHz y un conector ICPS.

Existen varias revisiones de esta placa, en las cuales se suelen añadir nuevas funcionalidades más útiles.

Sus principales características son:

- Memoria Flash: 32KB (ATmega328) de los cuales 0.5KB son usados por bootloader.
- SRAM: 2KB (ATmega328)
- EEPROM: 1KB (ATmega328)

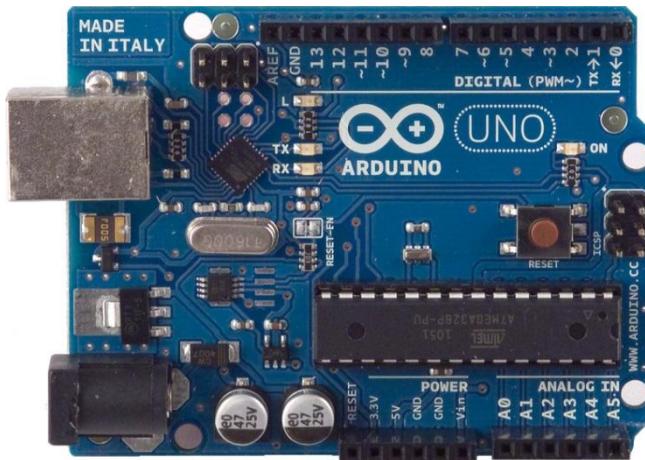


Figura 2.6 Placa Arduino UNO.

- Arduino Leonardo

Es una placa basada en el microprocesador ATmega32u4. Cuenta con 20 pines de entradas/salidas digitales (de los cuales 7 se pueden utilizar como salidas PWM y 12 como entradas analógicas), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión micro USB, un conector de alimentación, un puerto ICSP, y un botón de *reset*.

Contiene todo lo necesario para empezar a usar el microcontrolador, tan solo se tendrá que conectar a un PC con un cable USB, alimentarlo con un adaptador AC-DC o conectarle una batería para empezar.

Arduino Leonardo se distingue de todas las placas anteriores en que el ATmega32u4 incorpora comunicación USB, eliminando la necesidad de un procesador secundario, esto permite que Leonardo tome el control, por ejemplo, de nuestro teclado o ratón (para ello, se han preparado unas librerías) además de un puerto serie/COM virtual (CDC).

Sus principales características son:

- Voltaje de funcionamiento: 5V.
- Voltaje de entrada recomendado: 7 – 12 V.

- Voltaje de entrada límite: 6 -20 V.
- Pines E/S Digitales: 20.
- Entradas Analógicas: 12.
- Corriente máx. Pines E/S: 40mA.
- Intensidad en PIN 3.3V: 50mA.
- Memoria Flash: 32KB (Atmega32u4) de los cuales 4KB son de bootloader.
- SRAM: 2.5KB (Atmega32u4)
- EEPROM: 1KB (Atmega32u4)
- Frecuencia de reloj: 16MHz.



Figura 2.7 Placa Arduino Leonardo.

- Arduino Duemilanove

Versión anterior de Arduino Uno y presenta pocas diferencias con ese modelo. Basada en el ATmega168 o el ATmega328. Tiene 14 pines con entradas/salidas digitales (6 de las cuales pueden ser usadas como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un reloj de 16MHz, conexión USB, entrada de alimentación, una cabecera ISCP, y un botón de RESET.

Sus principales características son:

- Voltaje de funcionamiento: 5V.

- Voltaje de entrada recomendado: 7 – 12 V.
- Voltaje de entrada límite: 6 -20 V.
- Intensidad por PIN: 40mA.
- Intensidad en PIN: 3.3V 50mA.
- Memoria Flash: 16KB (ATmega168) o 32KB (Atmega328) de los cuales 2KB son de bootloader.
- SRAM: 1KB (ATmega168) o 2KB (Atmega328)
- EEPROM: 512 bytes (ATmega168) o 1KB (Atmega328)

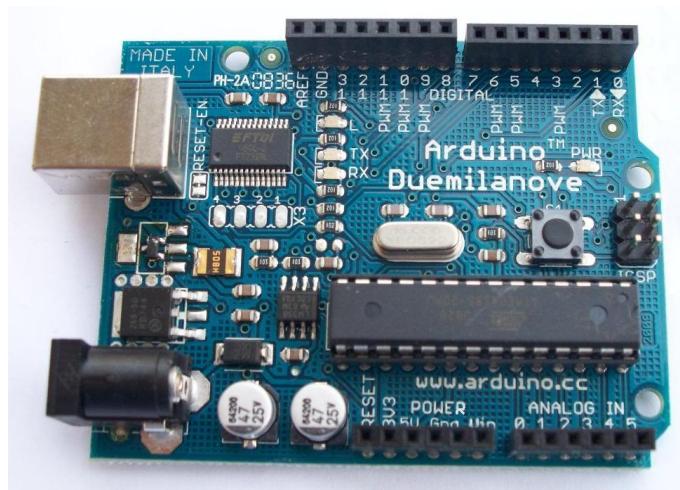


Figura 2.8 Placa Arduino Duemilanove.

- *Arduino Diecimila*

Versión Anterior a Duemilanove. Es una placa microcontroladora basada en el chip ATmega168. Tiene 14 E/S digitales (6 de las cuales se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un reloj de 16MHz, conexión USB y botón de RESET.

Sus principales características son:

- Voltaje de funcionamiento: 5V.
- Voltaje de entrada recomendado: 7 – 12 V.
- Voltaje de entrada límite: 6 -20 V.
- Intensidad por PIN de E/S: 40mA.

- Intensidad por PIN de 3.3V: 50mA.
- Memoria Flash: 16KB (siendo 2KB reservados para el gestor de arranque).
- SRAM: 1KB.
- EEPROM: 512 bytes.



Figura 2.9 Placa Arduino Diecimila.

- *Arduino Nano*

Una placa compacta diseñada para usar directamente en placas de desarrollo, el *Nano* se conecta al ordenador con un cable Mini-B USB. Basado en el ATmega328 (Arduino Nano 3.0) o ATmega168 (Arduino Nano 2.x) que se usa conectándola a una *protoboard*. Tiene más o menos la misma funcionalidad que el Arduino Duemilanove, pero con una presentación diferente. No posee conector para alimentación externa, y funciona con un cable USB Mini-B en vez del cable estándar.

Sus principales características son:

- Pines E/S Digitales: 14 (6 de los cuales proveen de salida PWM).
- Entradas Analógicas: 8.
- Corriente máx., PIN de E/S: 40 mA.
- Memoria Flash: 16KB (ATmega168) o 32KB (Atmega328) de los cuales 2KB son de bootloader.
- SRAM: 1KB (ATmega168) o 2KB (Atmega328).

-EEPROM: 512 bytes (ATmega168) o 1KB (Atmega328).

-Frecuencia de reloj: 16 MHz.

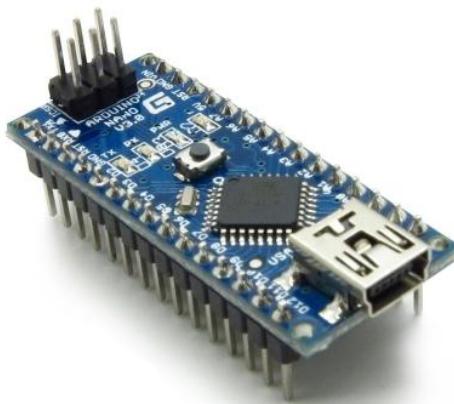


Figura 2.10 Placa Arduino Nano.

- *Arduino Mega*

Es la más grande y potente placa de Arduino, compatible con los shields de Duemilanove, Diecimila y Uno. Basada en ATmeg1280. Tiene 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 proporcionan salida PWM), 16 entradas digitales, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un reloj de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de *reset*. Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador; simplemente conectándolo al ordenador con el cable USB o alimentándolo con un transformador o batería para empezar.

Sus principales características son:

-Voltaje de funcionamiento: 5V.

-Voltaje de entrada recomendado: 7 – 12 V.

-Voltaje de entrada límite: 6 -20 V.

-Intensidad por PIN: 40mA.

-Intensidad en PIN 3.3V: 50mA.

-Memoria Flash: 128KB de los cuales 4KB son usados por bootloader.

-SRAM: 8KB

-EEPROM: 4KB



Figura 2.11 Placa Arduino Mega.

- Arduino LilyPad

Diseñado para aplicaciones sobre prendas, esta placa puede ser cosida a la ropa y es de color púrpura y con un diseño con estilo. Está basado en el ATmega 168V (de menor consumo que la versión ATmega168) o el ATmega328V.

Sus principales características son:

- Voltaje de funcionamiento: 2.7 a 5.5 V
- Voltaje de entrada: 2.7 a 5.5 V
- Digital I / O Pins: 14 (de los cuales 6 proporcionan PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente DC por Pin I / O: 40 mA
- Memoria Flash: 16 KB (de los cuales 2 KB son utilizados por el gestor de arranque)
- SRAM: 1 KB
- EEPROM: 512 bytes
- Frecuencia de reloj: 8 MHz

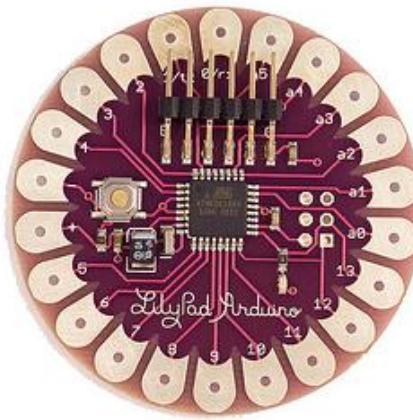


Figura 2.12 Placa Arduino LilyPad.

- Arduino Fio

Diseñada para aplicaciones inalámbricas. Incluye un zócalo para XBee, un conector para baterías LiPo y electrónica para cargar baterías. Basada en el ATmega328P. Tiene 14 pines de E/S digitales (de los cuales 6 pueden usarse como salidas PWM), 8 entradas analógicas, un resonador en placa, un botón de reinicio (*reset*), y agujeros para montar conectores de pines. Tiene conexiones para una batería de polímero de Litio e incluye un circuito de carga a través de USB. En el reverso de la placa tiene disponible un zócalo para módulos XBee.

Sus principales características son:

- Voltaje de trabajo: 3.3V
- Voltaje de Entrada: 3.35 -12 V
- Voltaje de Entrada en Carga: 3.7 - 7 V
- Corriente DC por pin E/S: 40 mA
- Memoria Flash: 32KB (de los cuales 2KB usados por bootloader)
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Frecuencia de Reloj: 8MHz

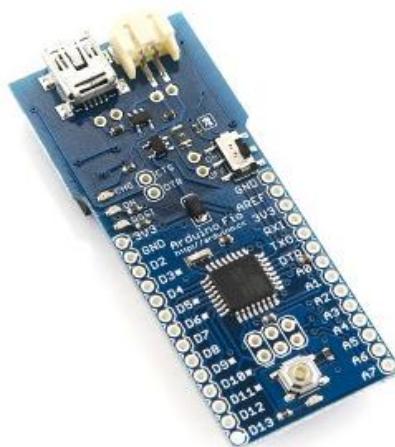


Figura 2.13 Placa Arduino Fio.

- Arduino Mini

La placa Arduino más pequeña. Funciona perfectamente en una placa de desarrollo o en aplicaciones donde el espacio es primordial. Se conecta al ordenador usando el adaptador Mini USB. Basada en el ATmega168, cuenta con 14 entradas/salidas digitales (de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas PWM), 8 entradas analógicas y un reloj de 16 MHZ. Puede ser programada con el adaptador Mini USB u otros adaptadores USB o RS232 a TTL serial. Se debe tener mucha precaución a la hora de alimentar y conectar el dispositivo, nunca alimentar con más de 9 voltios y tampoco conectar la alimentación al revés, ya que se puede acabar con él.

Sus principales características son:

- Voltaje de entrada: 7-9 V
- DC Corriente continua por pin E/S: 40 mA
- Memoria Flash: 16 KB (de las cuales 2 KB son usadas por el bootloader)
- SRAM: 1 KB
- EEPROM: 512 bytes

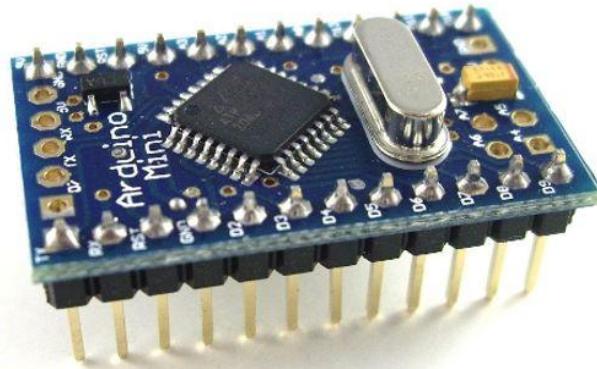


Figura 2.14 Placa Arduino Mini.

- *Arduino Pro Mini*

Como la Pro, la Pro Mini está diseñada para usuarios avanzados que requieren de bajo coste, menor tamaño y dispuestos a un poco de trabajo extra. Es una placa con un microcontrolador ATmega168. Tiene 14 E/S digitales (6 de las cuales se puedes utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador interno, botón de RESET y agujeros para el montaje de tiras de pines. Se le puede montar una tira de 6 pines para la conexión a un cable FTDI o a una placa adaptadora de la casa Sparkfun para dotarla de comunicación USB y alimentación.

Está destinada a instalaciones semi-permanentes en objetos o demostraciones. La placa viene sin conectores montados, permitiendo el uso de varios tipos de conectores o soldado directo de cables según las necesidades de cada proyecto en particular. La distribución de los pines es compatible con la Arduino Mini. Existen dos versiones de la Mini Pro, una que funciona a 3.3v y 8Mhz y otra de 5v y 16MHz.

Sus principales características son:

- Voltaje de entrada: 3.35 -12V (en el modelo de 3.3V) o 5 – 12V (en el modelo de 5V)
- Pines digitales de E/S: 14 (6 de los cuales tienen salida PWM)
- Intensidad máxima por E/S: 40 mA
- Memoria Flash: 16KB (de los cuales 2KB están reservados por el gestor de arranque)
- SRAM: 1KB
- EEPROM: 512 bytes
- Frecuencia de reloj: 8MHz (modelo de 3.3V) o 16MHz (modelo de 5V).

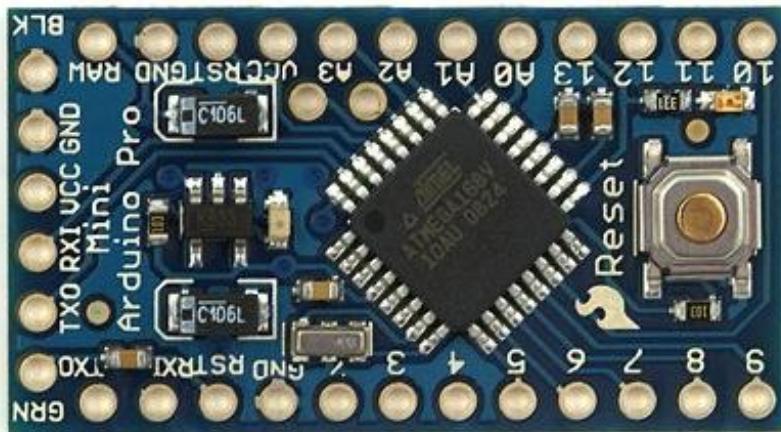


Figura 2.15 Placa Arduino Pro Mini.

2.2.2 Entorno de desarrollo de Arduino

El entorno de desarrollo en Arduino (IDE) es el encargado de la gestión de la conexión entre el PC y el hardware de Arduino con el fin de establecer una comunicación entre ellos por medio de la carga de programas. Como se puede ver en la figura 2.16, el IDE de Arduino se compone de:

- Un **editor de texto**.- donde escribir el código del programa.
- Un **área de mensajes**.- a través del cual el usuario tendrá constancia en todo momento de los procesos que se encuentren en ejecución, errores en código, problemas de comunicación, etc.
- Una **consola de texto**.- mediante la que se permite la comunicación con el hardware Arduino y viceversa.
- Una **barra de herramientas**.- donde será posible acceder a una serie de menús y a los botones con acceso directo a las principales funcionalidades de Arduino.

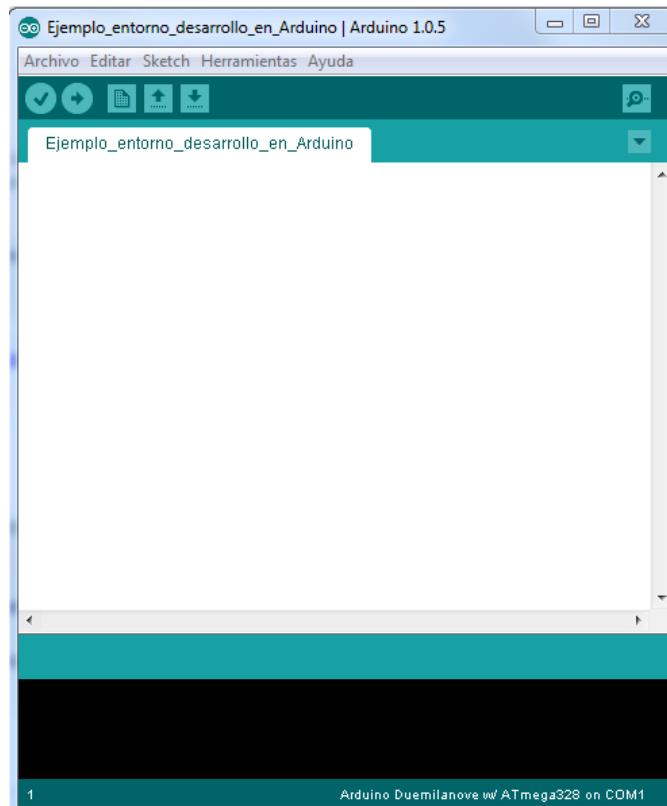


Figura 2.16 Entorno de desarrollo Arduino.

A través de la IDE de Arduino, se puede escribir el código del programa software y crear lo que se conoce por "sketch" (programa). Recibe el nombre de "sketch" y no programa porque el IDE de Arduino viene de *Processing*, y en este lenguaje de programación enfocado al mundo gráfico, cada código es considerado un boceto, en inglés "sketch".

El *sketch* permite la comunicación con la placa Arduino. Estos programas son escritos en el editor de texto, el cual admite las posibilidades de cortar, pegar, buscar y remplazar texto.

En el área de mensajes se muestra, tanto la información mientras se cargan los programas, como los posibles errores que se tengan a la hora de compilar, ya sea por problemas en el código del *sketch*, por fallo en la detección de nuestro Arduino en el puerto USB, o por cualquier otro problema que sea detectado.

La consola muestra el texto de salida para el entorno de Arduino incluyendo los mensajes de error completos y otras informaciones.

Desde la barra de herramientas se tiene acceso directo a las principales funcionalidades que ofrece el IDE de Arduino, como por ejemplo: verificar el proceso de carga, crear un nuevo *sketch*, abrir un *sketch* ya existente, guardar los programas, abrir el Monitor Serial, etc.

A continuación se describe la utilidad de cada uno de los iconos que aparecen en la pantalla principal del entorno de desarrollo de Arduino:



“Verificar”.- Esta funcionalidad se encarga de verificar el código del *sketch* en busca de posibles errores. A través del área de mensajes se le notificará al usuario el resultado de dicha verificación. En el caso de que se detecten errores en el código, éstos se detallarán junto con el número de línea en la que han sido detectados. Sólo cuando la comprobación resulta libre de errores se puede proceder a la carga del código en nuestra placa Arduino.



“Cargar”.- Permite compilar el código del *sketch* y lo carga en Arduino. Cuando la carga a terminado se informa al usuario a través del área de mensajes, y se procede a la apertura del monitor serial.



“Nuevo”.- Para la creación de un nuevo *sketch*. Abre una nueva hoja de texto donde se escribe el código correspondiente al *sketch*.



“Abrir”.- Permite abrir un *sketch* ya existente que ha sido previamente guardado. También puedes abrir cualquiera de los *sketches* que trae instalados por defecto el IDE de Arduino.



“Guardar”.- Esta funcionalidad nos permite almacenar el *sketch* que se está desarrollando en ese momento. Te permite elegir la ruta en la que quieres guardarla, y te crea automáticamente una carpeta con el mismo nombre que le des al *sketch*, guardando éste dentro de la misma.



“Monitor Serial”.- Al pinchar sobre este ícono, el entorno de desarrollo de Arduino abre una nueva ventana a través de la cual se puede ver la comunicación establecida por el puerto serie entre la placa Arduino y el PC durante la ejecución del programa. Contiene una barra de escritura mediante la que se comunica con Arduino a través de su puerto serie, por ejemplo, para seleccionar distintas opciones que contemple un posible menú creado por el usuario dentro de un código, o para enviar directamente comandos AT a una shield GPRS/GSM que se tenga montada sobre el Arduino.

También contempla la opción de seleccionar el envío de algunos caracteres junto con el texto que se introduzca en la barra de entrada del mismo, como el carácter de nueva línea, retorno de carro, o los dos. En la figura se puede ver la pantalla correspondiente al Monitor Serial y la pestaña desplegable en la que seleccionar las distintas opciones referentes a los caracteres de fin de línea.

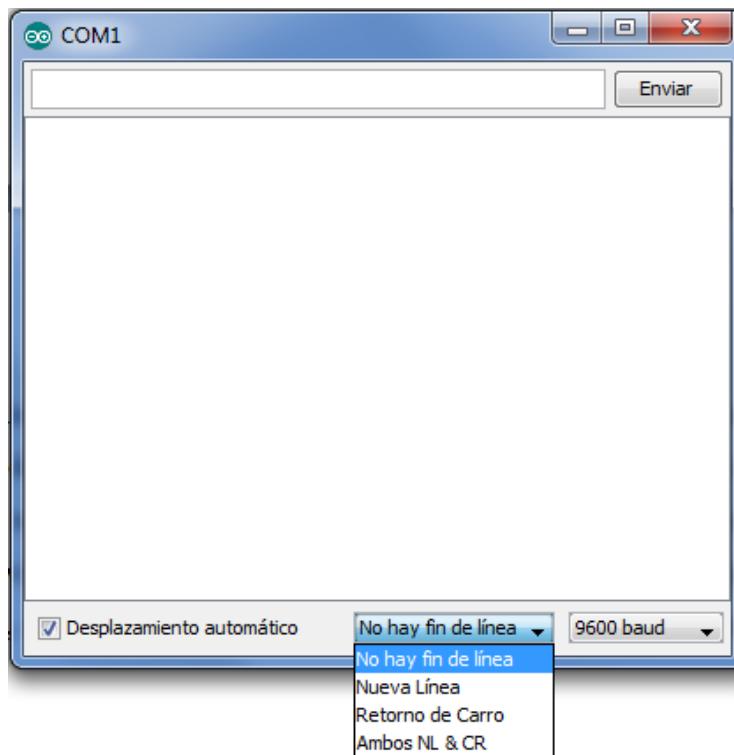


Figura 2.17 Selección de caracteres de fin de línea en la ventana "Monitor Serial"

Dentro del Monitor Serial se dispone de otra pestaña para establecer la tasa de baudios (Baudrate), que marca el número de unidades de señal transmitidas por segundo. Este valor ha de estar sincronizado con el baudrate en el que esté trabajando el Arduino, el cual puede ser establecido en el código del *sketch* mediante el comando *Serial.begin* ("valor del baudrate"), o de no ser así, se establecerá un valor por defecto. Si Monitor Serial y Arduino no están sincronizados con la misma tasa de baudios, la información que aparezca en la ventana será completamente ilegible. En la figura 2.18 aparece desplegada la pestaña para la selección de los distintos valores de baudrate disponibles.

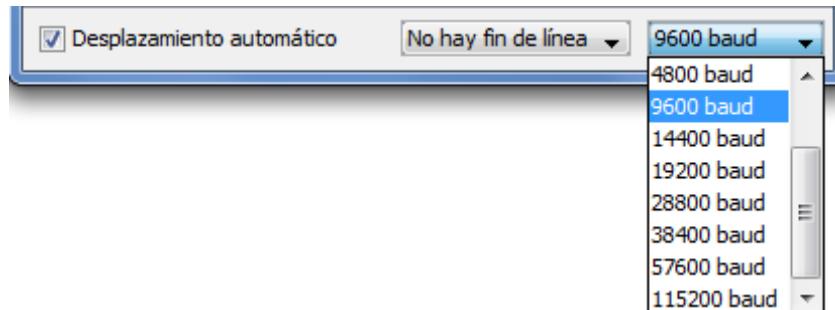


Figura 2.18 Selección del valor de 'baudrate' en la ventana "Monitor Serial".

Dentro de los menús, cabe mencionar la existencia de librerías, que pueden proporcionar funcionalidades adicionales para la utilización en *sketches*, por ejemplo para trabajar con hardware o manipular datos. Para utilizar una librería dentro de un *sketch*, se debe declarar previamente. Para ello se accede al menú “*sketch*”, y se selecciona la opción importar librerías. Dentro se busca la librería que sea de nuestro interés y se importa al *sketch*, insertando una sentencia de tipo `#include` al comienzo del mismo. Se debe tener en cuenta que al cargar un código que incluya librerías, éstas también se vuelcan en la placa junto con el resto del *sketch*, incrementando la ocupación del programa y reduciendo el espacio disponible en la memoria de Arduino [9].

2.3 Componentes del sistema

Dentro de este apartado se hablará acerca de cada uno de los componentes que forman parte de nuestro sistema de monitorización, indicando sus principales características [10]. El sistema de monitorización para la caracterización de células fotovoltaicas se basa en:

- Placa Arduino UNO.
- Sensores de temperatura y corriente.
- Display LCD 16x2

2.3.1 Placa Arduino UNO

Dentro de este proyecto la placa Arduino UNO es una pieza fundamental, se trata de una placa compuesta por un microprocesador ATMEGA328, compatible con Arduino IDE, el cual se encargara de agrupar los datos recogidos por los sensores de temperatura y corriente.

La alimentación de la placa se sitúa en 5V por medio de pilas/baterías o mediante un cable micro-USB. Junto a la entrada USB se encuentra un regulador de tensión que se

encarga de rebajar los 5V introducidos por el puerto a los 3.3V requeridos por el microcontrolador.

Sus principales características fueron comentadas en el apartado anterior. Con lo que a continuación se identificaran las partes que componen dicha placa.

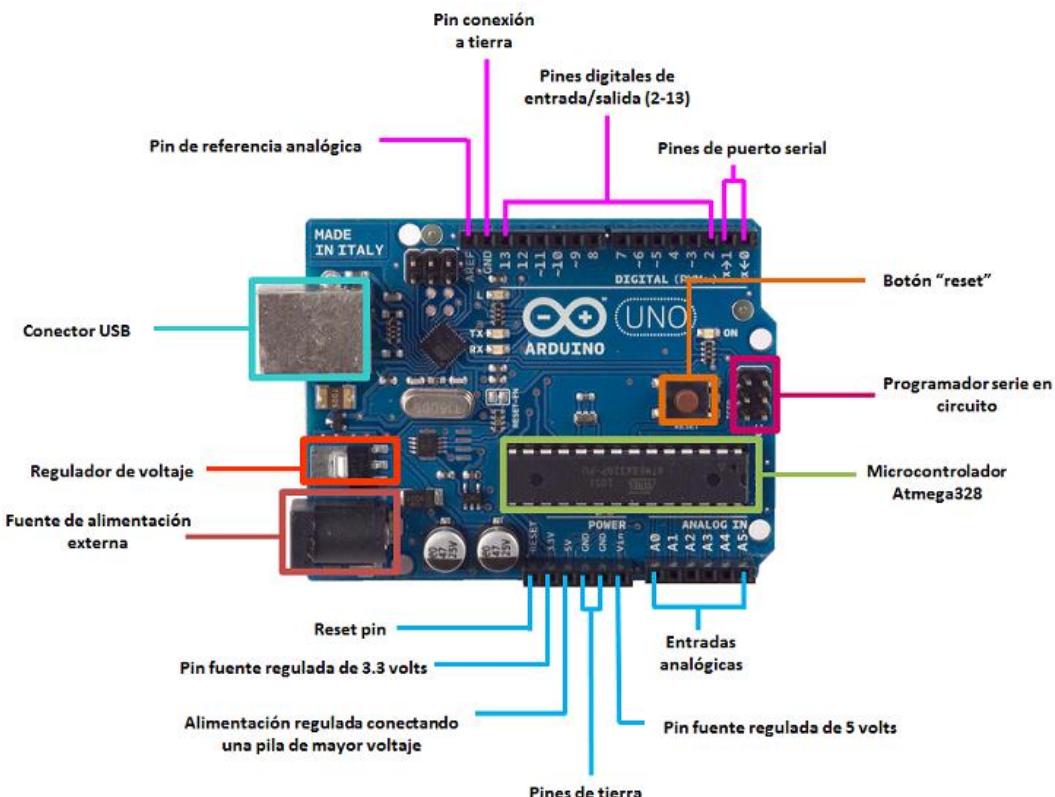


Figura 2.19 Partes de la placa Arduino UNO.

Alimentación, Arduino puede ser alimentado por dos vías:

- *conexión USB* (que proporciona 5 V).
- *jack de alimentación* (que normalmente será una pila de 9 V o fuente de alimentación, que se recomienda que esté entre 7 – 12 V).

Pines de alimentación, son para alimentar los circuitos, la placa de prototipos o *breadboard* o *protoboard*:

- 3.3 V proporciona una tensión de 3,3 V, y una intensidad máxima de 50 mA.
- 5 V proporciona una tensión de 5 V, y una intensidad máxima de 300 mA.
- *GND* es la toma de tierra, o nivel 0 V de referencia.
- *V_{in}* proporciona la tensión máxima con la que está alimentado Arduino.

Valores de entrada y de salida, en función de cómo esté siendo utilizado en pin.

- *Salida y entrada digital*: los valores de salida pueden ser 0 o 5 V (LOW) o 5 V (HIGH), y se interpretará una entrada de entre 0 y 2 V como LOW y de entre 3 y 5 V como HIGH.
- *Salida analógica*: los valores de salida van desde 0 V a 5 V en un rango de 0 a 255 (precisión de 8 bits) valores intermedios.
- *Entrada analógica*: los valores de entrada van desde 0 V a 5 V en un rango de 0 a 1023 (precisión de 10 bits) valores intermedios.

La intensidad máxima de todos estos pines es de 40 mA.

2.3.2 Sensores de temperatura y corriente

Para la medición de los parámetros principales que influyen en la caracterización de células fotovoltaicas, como son la temperatura, la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto, se ha procedido a usar sensores de bajo coste, pero con elevada fiabilidad.

Para el caso de la temperatura, factor muy relevante a la hora de la caracterización de las células fotovoltaicas, debido a influencia en el rendimiento de las mismas, se usarán dos sensores de distinto tipo de encapsulado, de modo que se pueda obtener una comparativa de los resultados obtenidos; mientras que para el caso de la corriente y tensión se usará un sensor concreto.

2.3.2.1 Sensor de temperatura DS18B20

El sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo que se comunica de forma digital. Existen dos tipos de encapsulado, el normal que cuenta con tres terminales, los dos de alimentación y el pin “*data*” y otro de tipo sumergible que será el utilizado en este proyecto.

Tiene una forma muy característica de leer los valores de temperatura. Utiliza la comunicación *OneWire*, la cual es un poco complicada para los que no tienen mucha experiencia en el área de electrónica digital. Básicamente se trata de un protocolo especial que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable, a diferencia de la mayoría de los protocolos que requiere dos vías. De hecho, Arduino posee los pines RX y TX que son los encargados de enviar y recibir información.

Las principales características de este sensor son:

- Es un termómetro digital de alta precisión, entre 9 y 12 bits de temperatura en grados Celsius (el usuario puede escoger la precisión deseada).

- Su temperatura operativa se encuentra entre -50 y 125 grados Celsius. La precisión, en el rango comprendido entre -10 y 85 grados es de ± 0.5 grados.
- Su precio es económico, su interfaz de funcionamiento es sencilla y su uso es muy provechoso para proyectos que requieran mediciones precisas y confiables.
- Se puede escoger entre el modelo sumergible y los modelos para uso en placas de circuitos.

Para la correcta captura de datos es necesario un *burden resistor*, es decir, una resistencia entre la alimentación y el bus de datos para crear un *pullup* (señal digital de subida necesaria para la transmisión de datos) desde el pin de datos y VCC.



Figura 2.20 Conexión del sensor DS18B20.

2.3.2.2 Sensor de temperatura LM35

El LM35 es un sensor de temperatura de precisión integrado, cuya tensión de salida es linealmente proporcional a la temperatura en °C (grados centígrados). El LM35 por lo tanto tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura lineal calibrada en grados Kelvin: que el usuario no está obligado a restar una gran tensión constante para obtener grados centígrados. El LM35 no requiere ninguna calibración externa o ajuste para proporcionar una precisión típica de ± 1.4 °C a temperatura ambiente y ± 3.4 °C a lo largo de su rango de temperatura (de -55 a 150 °C).

El dispositivo se ajusta y calibra durante el proceso de producción. La baja impedancia de salida, la salida lineal y la precisa calibración inherente, permiten la creación de circuitos de lectura o control especialmente sencillos. El LM35 puede funcionar con alimentación simple o alimentación doble (+ y -)

Requiere sólo 60 μ A para alimentarse, y bajo factor de auto-calentamiento, menos de 0,1 °C en aire estático. El LM35 está preparado para trabajar en una gama de temperaturas que abarca desde los -55 °C bajo cero a 150 °C, mientras que el LM35C está preparado para trabajar entre -40 °C y 110 °C (con mayor precisión).

Sus principales características son las siguientes:

- Calibrado directamente en grados Celsius (Centígrados)
- Factor de escala lineal de $+10 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
- $0,5^\circ\text{C}$ de precisión a $+25^\circ\text{C}$
- Rango de trabajo: -55°C a $+150^\circ\text{C}$
- Apropiado para aplicaciones remotas
- Bajo coste
- Funciona con alimentaciones entre 4V y 30V
- Menos de $60 \mu\text{A}$ de consumo
- Bajo auto-calentamiento ($0,08^\circ\text{C}$ en aire estático)
- Baja impedancia de salida, $0,1\text{W}$ para cargas de 1mA

Para la correcta captura de datos es necesario realizar la siguiente conexión con la placa Arduino.

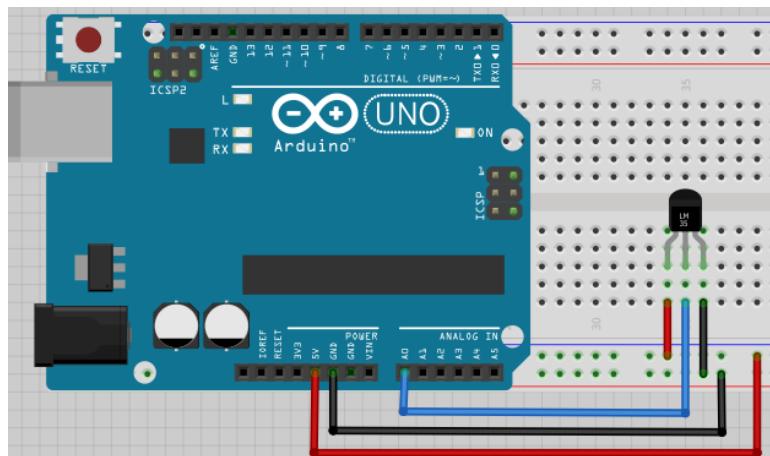


Figura 2.21 Conexión del sensor LM35 con la placa Arduino UNO.

2.3.2.3 Sensor de corriente ACS712

Este módulo integra el sensor del fabricante Allegro Microsystems ACS712 5A para crear un sensor de corriente de hasta 5A DC o AC, basado en el efecto Hall, es decir, usa el campo magnético de la corriente a medir, entregando una salida de voltaje que varía linealmente según la corriente medida.

Este sensor ACS712 es una solución para aplicaciones industriales, comerciales o sistemas de comunicación, puede ser aplicado en el control de motores, detección y manejo de carga, protección por sobre corrientes, etc.

Sus principales características son las siguientes:

- Sensibilidad de la salida: 185mV/A.
 - Voltaje de alimentación: 5V.
 - Resistencia Interna: 1.2mOHM.
 - Salida de voltaje proporcional a la corriente AC o DC.
 - Dimensiones: 31x13 mm.

El módulo comercial permite su conexión al sistema de medición de una forma sencilla y segura. A un lado del módulo se tiene un conector de tornillos al cual deben conectarse las terminales del cable cuya corriente desea medirse.

En el otro extremo del módulo, se encuentra un conector de 3 pines, el cual debe acoplarse al sistema microcontrolador. Es importante señalar que existe un completo aislamiento eléctrico entre la corriente medida y el voltaje de salida del sensor.

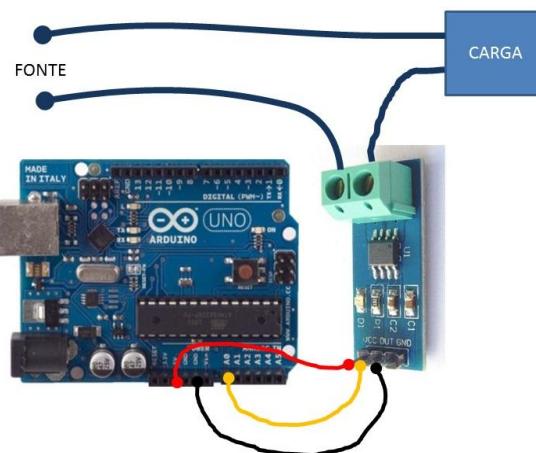


Figura 2.22 Conexión del sensor ACS712 con Arduino.

2.3.3 Display LCD 16x2

Las siglas LCD significan “*Liquid Cristal Display*” o pantalla de cristal líquido. Es una pantalla plana basada en el uso de una sustancia líquida atrapada entre dos placas de vidrio, haciendo pasar por este una corriente eléctrica a una zona específica, para que así esta se vuelva opaca, y además cuenta (generalmente) con iluminación trasera.

Las pantallas LCD de color, cada pixel individual se divide en tres células o sub pixeles con los colores RGB (Rojo, Verde y Azul) respectivamente. Y así cada pixel puede controlarse para producir una gran variedad de colores distintos.

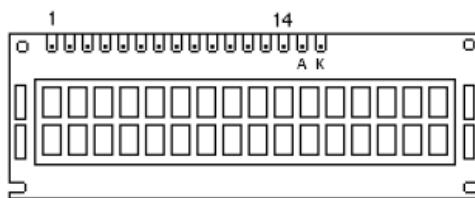


Figura 2.23 Display LCD de 16x2.

Algunos factores básicos a considerar en una LCD son:

- Tamaño
- Resolución
- Brillo
- Contraste
- Ángulo de visión
- Número de caracteres.

En este proyecto se utilizará una comunicación en paralelo, ya que se trata de la forma más directa de manejar la LCD. Estos displays se controlan muy fácilmente con una placa Arduino o un PIC y muy pocas líneas de código. A continuación se observa la correspondencia con cada uno de sus pines.



Pin No	Name	Description
1	V _{ss}	GND
2	V _{dd}	+5v
3	V _o	Contrast Control
4	RS	Register Select
5	R/W	Read/Write
6	E	Enable (<i>Strobe</i>)
7	D ₀	Data <i>LSB</i>
8	D ₁	Data
9	D ₂	Data
10	D ₃	Data
11	D ₄	Data
12	D ₅	Data
13	D ₆	Data
14	D ₇	Data <i>MSB</i>

Figura 2.24 Pines de display LCD 16x2.

- **Pin 1 (Vss):** GND o tierra.
- **Pin 2 (Vdd):** Alimentación Vcc o 5 Voltios.
- **Pin 3 (V0):** Control del contraste del display.
- **Pin 4 (RS):** Selección de registro.
0 lógico= registro de comandos (escritura)
1 lógico= registro de datos (escritura, lectura)
- **Pin 5 (R/W):**
0 lógico= Escritura del LCD
1 lógico= Lectura del LCD
- **Pin 6 (Enable):** Un 1 lógico señala el inicio de escritura o lectura del LCD, un 0 lógico, desactiva todas las funciones.
- **Pin 7-10 (D0/D3):** Pines correspondientes al bus de datos. D0 corresponde al bit menos significativo. Estos pines no se utilizan si se realizan operaciones sobre LCDs de 4 bits.
- **Pin 11-14 (D4/D7):** Pines correspondientes al bus de datos. D7 corresponde al bit más significativo.
- **Pin 15 (A):** Ánodo de la retroiluminación 5V.
- **Pin 16 (K):** Cátodo de la retroiluminación GND.

CAPITULO 3. Caracterización eléctrica de dispositivos fotovoltaicos

Se expondrán los principales parámetros de la caracterización de células fotovoltaicas y aspectos que influyen en ella.

3.1. Característica I-V

Una célula fotovoltaica es una unión PN con la particularidad de que si no está iluminada se comporta como un diodo y por tanto, la corriente es la determinada por el modelo matemático de Shockley. En cambio, al estar iluminada, a la corriente determinada por el modelo matemático de Shockley (I_D), se le tiene que sumar otra corriente, la corriente fotogenerada (I_L):

$$I = I_S e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 - I_L = I_D + I_L$$

(Ecuación 1.1)

Dónde: I_L = Corriente fotogenerada.
 I_D = Corriente diodo.

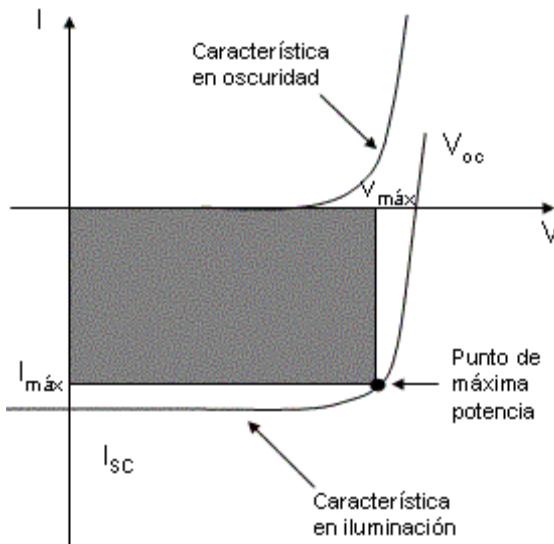


Figura 3.1 Característica de una célula fotovoltaica iluminada.

Esta corriente fotogenerada es debida a que al iluminar la célula, los fotones de la luz incidente, con energía igual o superior al ancho de la banda prohibida, generan pares electrón-hueco que son separados por el campo eléctrico de la zona de carga de espacio. Dicha corriente fotogenerada por cada célula fotovoltaica tiene el efecto de desplazar la curva I-V al cuarto cuadrante, donde se genera energía y por tanto, es la responsable de que el modelo equivalente de una célula ideal sea una fuente de corriente.

La célula solar completa tiene una característica que es el resultado del comportamiento en oscuridad e iluminación de las diferentes regiones del dispositivo.

La característica de una célula en oscuridad coincide con la de un diodo de unión, ya que la principal diferencia entre ambos dispositivos es el contacto metálico superior que

en el caso de célula presenta forma de rejilla, diseñada de tal forma que la luz pueda penetrar en el semiconductor.

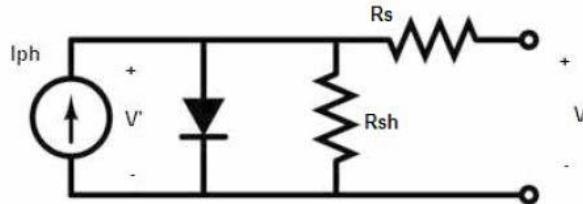


Figura 3.2 Modelo circuital de una célula fotovoltaica

Del análisis del circuito equivalente simplificado, considerando una célula solar ideal con resistencia serie (R_s) nula y resistencia paralelo (R_{sh}) infinita, la expresión de corriente de salida resulta,

$$I = I_{SC} - I_0(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Donde I_{SC} corresponde a la corriente de cortocircuito, en sustitución de la corriente fotogenerada I_{ph} , las cuales coinciden en el caso ideal. El término negativo corresponde a un diodo ideal con una corriente inversa de saturación I_0 , es la corriente saliente de la célula solar por el lado p en condiciones de cortocircuito, se conoce simplemente como corriente de cortocircuito y es una magnitud fundamental en las características de una célula solar.

La característica corriente-tensión de una célula solar iluminada, representada en el primer cuadrante, es la siguiente:

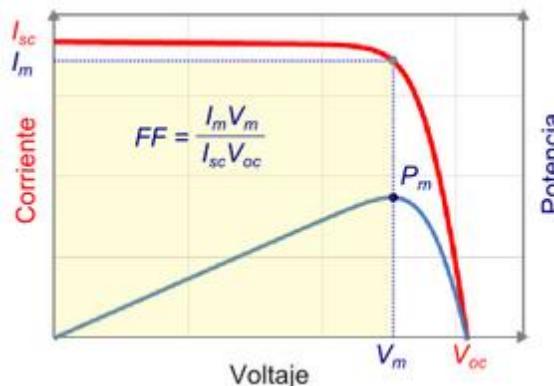


Figura 3.3 Característica I-V de la célula solar (Fuente: UNIA).

Los parámetros fotovoltaicos que determinan la calidad de las células, se obtienen bajo las Condiciones Estándar de Medida (STC, *Standard Test Conditions*), es decir, con

una radiación de 1000W/m^2 , una temperatura ambiente de 25°C y un determinado espectro de luz, el típico del centro de Europa, con un factor de masa de aire (AM) de 1,5.

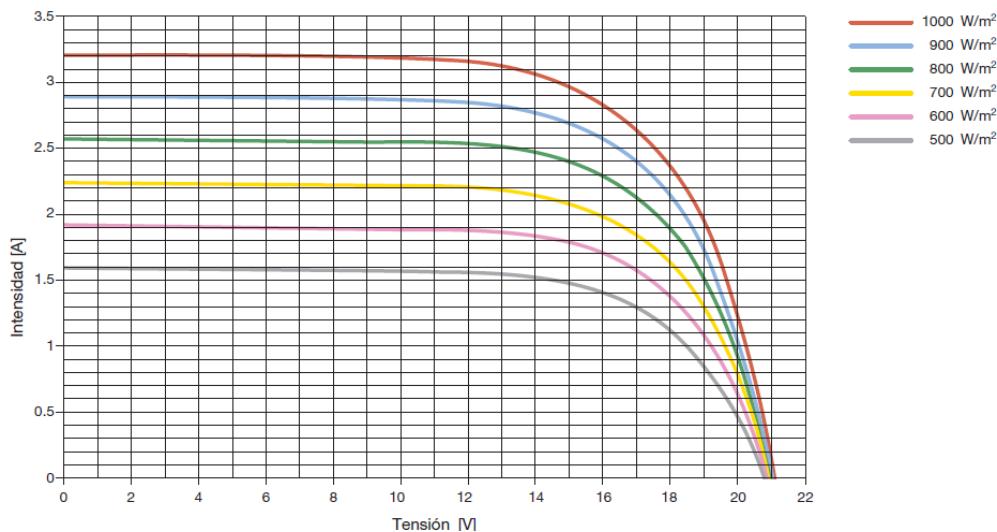


Figura 3.4 Variación de la tensión y la corriente en función de la radiación incidente
(Fuente: *Mcgraw-Hill*)

Sus parámetros fundamentales son los siguientes:

V_{oc} → *Tensión en circuito abierto*. Es la máxima tensión que puede entregar una célula a corriente nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura. Su medida se realiza conectando un voltímetro entre sus bornes.

$$V_{oc} = V_T - \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

I_{sc} → *Corriente en cortocircuito*. Es la máxima corriente que puede entregar una célula a tensión nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura. Se puede medir directamente con un amperímetro conectado a la salida de la célula FV.

I_m → *Corriente a máxima potencia*. Es la corriente que entrega la célula a potencia máxima bajo unas determinadas condiciones de radiación y temperatura. Se utiliza como corriente nominal de la célula.

V_m → *Tensión a máxima potencia*. Es la tensión que entrega la célula a potencia máxima bajo unas condiciones de radiación y temperatura. Se utiliza como tensión nominal de la célula.

P_m → *Punto de Máxima Potencia (MPP)*. Es el punto de la curva característica de modulo dependiente de la insolación y la temperatura en el que el generador solar entrega la máxima potencia.

$$P_m = V_m * I_m$$

(Ecuación 1.4)

FF → *Factor de forma (Fill Factor)*. El factor FF es un número sin dimensiones que cuantifica la relación que hay entre la potencia máxima y la potencia que sería generada por una hipotética célula solar cuya característica corriente-tensión fuera un rectángulo perfecto de lados I_{SC} y V_{OC}.

$$FF = \frac{V_m * I_m}{I_{SC} * V_{OC}}$$

(Ecuación 1.5)

η → *Eficiencia de conversión*. La eficiencia o rendimiento de conversión es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica capaz de hacer operar un circuito, se define como el cociente entre la potencia máxima entregada por la célula solar y la potencia recibida del Sol. Se indica la potencia incidente (P_{in}) en W/m², y el área de la célula (A) en m².

$$\eta = \frac{P_m}{A * P_{in}}$$

(Ecuación 1.6)

SR → *Respuesta espectral*. Es el cociente entre la densidad de corriente de cortocircuito y la densidad espectral de potencia incidente para una longitud de onda determinada. Esta magnitud indica en qué longitudes de onda es más eficiente la célula solar en términos absolutos.

$$SR \lambda = \frac{J_{ph}(\lambda)}{I(\lambda)}$$

(Ecuación 1.7)

QE → *Eficiencia cuántica*. Es el cociente entre el número de portadores colectados y el número de fotones incidentes para una longitud de onda determinada. Es una magnitud sin dimensiones. La eficiencia cuántica se corresponde también con la eficiencia de colección de las diferentes longitudes de onda en términos relativos.

$$QE \lambda = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\Phi(\lambda)}$$

(Ecuación 1.8)

Se relaciona la eficiencia cuántica con la respuesta espectral de la siguiente manera.

$$SR \lambda = q \frac{\Phi(\lambda)}{I(\lambda)} QE(\lambda)$$

(Ecuación 1.9)

3.2 Influencia de la temperatura

Los módulos fotovoltaicos funcionan mejor en climas fríos, siempre y cuando no se superen ciertos límites, esto se debe a que las celdas son dispositivos electrónicos reales y generan electricidad partiendo de luz y no del calor y como la mayoría de los dispositivos electrónicos, las celdas fotovoltaicas funcionan con mayor eficiencia a temperaturas frías.

Al aumentar la temperatura de la célula empeora el funcionamiento de la misma, por ejemplo:

- La intensidad de cortocircuito sufre un ligero incremento. Conocer este efecto es muy importante debido a que la radiación varía todo el día y será necesario colocar los paneles de manera que se pueda cambiar su posición a lo largo del tiempo que se requiera.
- El voltaje de circuito abierto disminuye aproximadamente 2.3 mV/ °C.
- El factor de forma y el rendimiento de los módulos decrecen.

El calentamiento de una célula provoca directamente una disminución de su grado de eficiencia, estando determinada su temperatura de operación por la temperatura ambiente, las características del encapsulado, la intensidad de la luz solar que incide en el módulo y de otras variables como la velocidad del viento.

El efecto de esta variación de la temperatura en los parámetros característicos, que determinan la calidad de las células, y los paneles solares es el que sigue a continuación. La corriente de cortocircuito (I_{SC}) aumenta con la temperatura debido a que se reduce la energía de gap (E_g) y por tanto un mayor número de fotones tienen suficiente energía para crear parejas electrón-huecos. Sin embargo, este efecto no es muy elevado y en la mayoría de los casos puede considerarse despreciable.

Un efecto más notable afecta a la tensión en circuito abierto (V_{oc}) (y a la tensión de operación con una carga determinada) al factor de forma (FF) y a la potencia máxima (P_m).

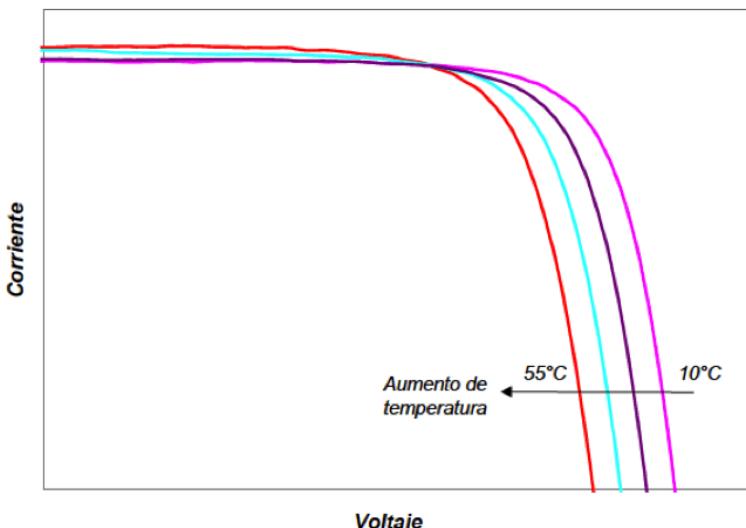


Figura 3.5 Influencia de la temperatura en parámetros fundamentales
(Fuente: *Europe SunFields*)

3.3 Importancia de la respuesta espectral

En el año 1666 el gran científico Isaac Newton (1643-1726) pudo “descomponer” con un prisma de vidrio la luz blanca del Sol en los “siete” colores característicos de su espectro y recomponer de nuevo el rayo de luz blanca a partir de sus colores con un segundo prisma. Newton había descubierto la dispersión de la luz por la materia, un aspecto que resultó esencial para la comprensión de la naturaleza física de la luz.

Hubo que esperar ciento cincuenta años hasta que en 1814, el físico alemán Joseph Von Fraunhofer (1787-1826) observara unas líneas o rayas oscuras (más de 600) en el espectro de la luz solar, una observación anterior de líneas oscuras en 1802, fue realizada por el físico y químico británico William Wollaston (1766-1828) que fueron interpretadas en 1859 por los también físicos alemanes Robert-Wilhelm Bunsen (1811-1899) y Gustav-Robert Kirchhoff (1824-1887) como absorciones de la luz por los átomos.

Poco después un número de científicos observaron rayas brillantes muy estrechas y bien definidas en el espectro de la luz, emitidas por llamas, arcos voltaicos y chispas. Había nacido la espectroscopía.

Utilizando esto los primeros espectroscopistas, pudieron determinar que los elementos y compuestos químicos emiten tres tipos de espectro general. El espectro de emisión

continuo, emitido principalmente por sólidos o líquidos incandescentes, que no muestran ningún tipo de línea o raya brillante u oscura cuando la luz emitida por los mismos es observada en los espectroscopios de más alto poder de resolución. Si por otra parte aparecen rayas oscuras en un espectro de emisión continuo se tiene entonces un espectro de absorción, denominando a esas rayas o líneas de absorción.



Figura 3.6 Espectro de emisión



Figura 3.7 Espectro de absorción

Por otra parte existen los espectros de emisión de bandas, que consisten en grupos de líneas brillantes que parecen ser continuas en espectroscopias de bajo poder de resolución. Este tipo de espectro es emitido cuando pequeñas piezas de material de un compuesto son calentados en una llama o con un electrodo.

Por último, los espectros de emisión de líneas que se originan en la luz emitida por fuentes que contienen únicamente elementos químicos puros. Así, las rayas y bandas observadas en éstos resultan ser características de los elementos químicos individuales y de los compuestos químicos respectivamente cuando son excitados en determinadas condiciones.

De hecho, los espectros de cada elemento o compuesto son como una “huella dactilar” que identifica a los mismos, son por ello llamados espectros característicos. Así, algunos elementos como por ejemplo el helio (He) fueron detectados por su “huella espectroscópica” en el espectro de radiación solar antes de que él fuera detectado como elemento en la Tierra.

Un espectro atómico es la radiación característica emitida por los átomos de un elemento individual en una llama o en un gas excitado por una descarga eléctrica (por ejemplo un plasma generado en un proceso de soldadura). Cuando esa radiación es observada a través de un espectrómetro, la radiación aparece como un conjunto de líneas estrechas o rayas discretas cada una de un color particular o longitud de onda. Las posiciones e intensidades de cada una de las rayas son características de cada elemento. La longitud de onda de estas líneas se debe determinar con gran precisión para una correcta identificación de las mismas.

El primer avance significativo en la compresión de estas líneas de emisión se produjo en 1885 cuando un profesor de matemáticas de escuela suiza llamado Johann J. Balmer (1825-1898) encontró que las rayas en la región del espectro visible del espectro de hidrógeno, el cual contiene cuatro rayas una roja, otra azul y dos violeta, con una longitud de onda de 656.3 , 486.1 , 434.1 , y 410.2 nm respectivamente; producido por el análisis espectroscópico de la luz emitida por átomos de hidrógeno, conocidas por ello ahora como *serie Balmer*[11].

La distribución espectral de la energía procedente del Sol se extiende en una región de longitudes de onda que abarca desde aproximadamente 300nm a 4 μ m, correspondiente a la distribución desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, pasando por la región de la luz visible.

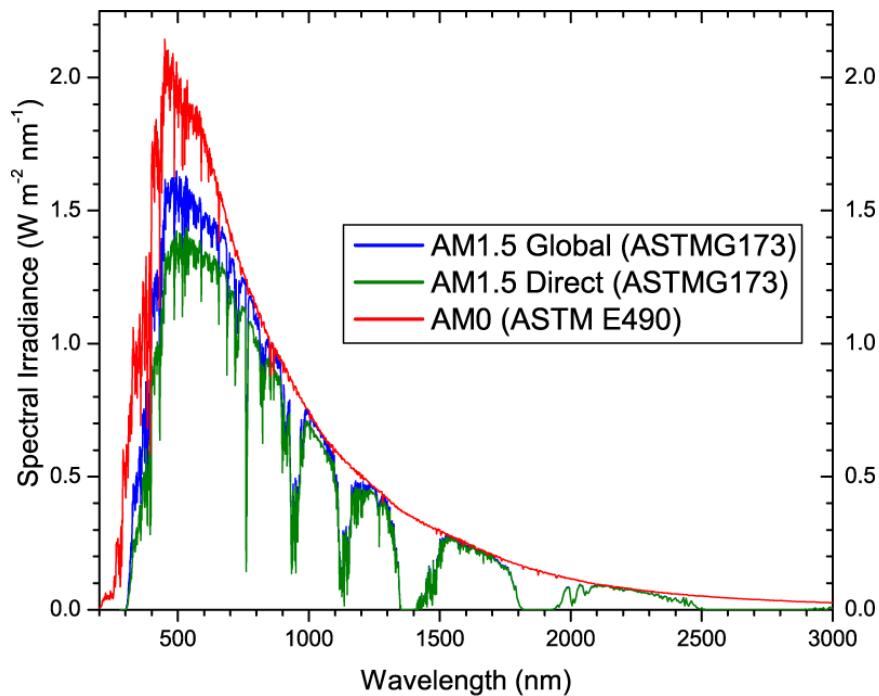


Figura 3.8 Respuesta espectral del Sol (Fuente: <http://www.energiasustentables.com>).

Para su correcto estudio se diferencian dos espectros, el espectro solar extra atmosférico, denominado AM0 y el espectro para aplicaciones terrestres, denominado AM1.5. El espectro AM 1.5 se utiliza para todas las medidas y calibraciones necesarias para células y módulos fotovoltaicos terrestres, mientras que el espectro AM0 es el que se usa en aplicaciones espaciales (por ejemplo para paneles fotovoltaicos empleados en satélites).

La Figura 3.8 nos muestra la densidad espectral de potencia, vatios por unidad de superficie y longitud de onda. Como se puede observar se concentra una mayor energía en la zona correspondiente a las longitudes de onda del espectro visible, desde los 380 nm del violeta a los 740 nm del color rojo. La magnitud que mide la radiación solar como la energía por unidad de tiempo y área es la irradiancia (W/m^2), valor que se obtendrá al integrar la densidad espectral de potencia respecto de λ en todo el espectro. Esta medida realizada en el exterior de la atmósfera, conocida como constante solar, indica un valor promedio de 1360 W/m^2 , válido para el espectro AM0. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, por ejemplo, son absorbidas por los gases de la atmósfera: es por este motivo que la irradiancia del espectro utilizado para medidas terrestres es de un valor menor que la constante solar. Al incorporar las bandas de absorción de la atmósfera el valor de irradiancia para el espectro AM1.5 es de 827 W/m^2 , normalizada hasta 1000 W/m^2 [12].

3.4 Proceso de medida

En la actualidad se puede diferenciar entre dos procesos para la caracterización de células fotovoltaicas. Por un lado el proceso básico de caracterización paso a paso en el laboratorio mediante el cual se realiza un estudio de los parámetros fundamentales de la célula mediante su caracterización en oscuridad e iluminación; y por otro lado el método utilizado en la industria que se basa en el uso de simuladores solares. A continuación se hará un pequeño resumen de en qué consiste cada método.

1. Medida en el laboratorio

Para la caracterización, se tomaran medidas de intensidad frente a voltaje para cada célula en dos situaciones distintas, en oscuridad y bajo iluminación.

Estas medidas se repetirán a diversas temperaturas (por ejemplo 25°C, 40°C, 55°C) con el fin de ver la variación de los parámetros característicos con la misma.

Toma de medidas en oscuridad

El trabajo en oscuridad tiene como objeto calcular los parámetros, que definen las características de una célula, según el modelo teórico.

Para obtener las medidas se puede considerar el siguiente circuito al cual se le conecta una resistencia entre los bornes de la célula.

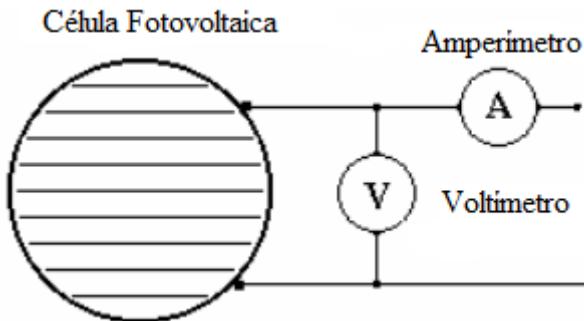


Figura 3.9 Circuito de medida en oscuridad.

Los valores de voltaje recomendados para cada célula están comprendidos aproximadamente entre -0,5V y 0,6V por célula. De la representación gráfica de I frente a V , se obtiene una curva que debe corresponderse con el comportamiento eléctrico del modelo. De la aproximación de estos puntos se obtienen los parámetros de la célula.

Para simplificar la obtención de los parámetros, en la región de la gráfica obtenida para voltajes bajos (aprox. de -0,5V hasta -0,3V) puede considerarse despreciable la parte exponencial que describe el comportamiento del diodo. Igualmente puede considerarse despreciable el término I_{RS}/R_{Sh} , quedando finalmente la siguiente ecuación:

$$I = I_O - \frac{1}{R_{Sh}} * V$$

(Ecuación 1.10)

Esta ecuación tiene la forma de una recta, y de la aproximación por mínimos cuadrados de los puntos tomados, pueden obtenerse los valores de I_O (corte con el eje Y) y R_{Sh} (inversa de la pendiente de la recta).

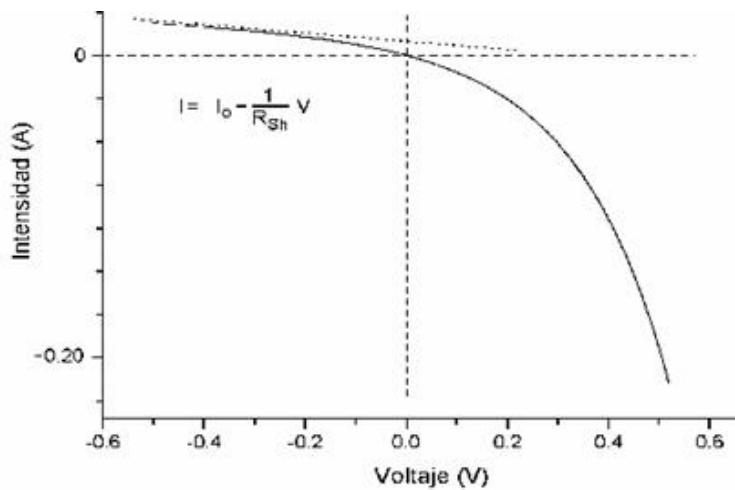


Figura 3.10 Obtención de valores I_o y R_{Sh} .

Una vez calculados estos valores y tomando ya todos los puntos de la gráfica, resultará más sencillo calcular el resto de parámetros, utilizando para ello un ajuste no lineal de la ecuación completa.

Toma de medidas bajo iluminación

El trabajo en iluminación permitirá valorar el funcionamiento de la célula bajo estas condiciones, una vez ya conocidos los parámetros característicos calculados en oscuridad, y teniendo I_L como única variable. Para ello, se realiza el montaje de la figura 3.12 y se ilumina la célula siguiendo las condiciones estándar de medida, se toman medidas de intensidad frente a voltaje, colocando una resistencia entre los bornes de la célula. Para evitar el calentamiento de la célula debido a la lámpara, ésta se conectará brevemente durante la recogida de cada pareja de datos, dejando que repose entre medida y medida.

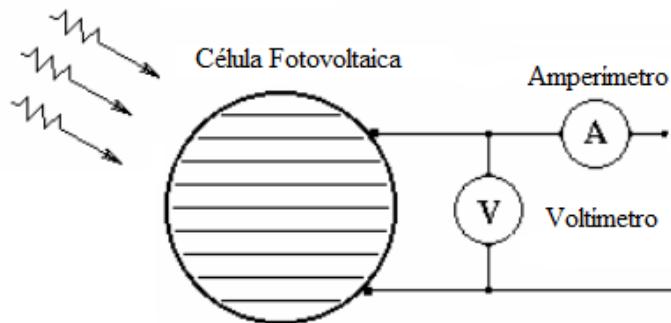


Figura 3.11 Circuito de medida en iluminación.

En esta ocasión, la resistencia es utilizada como resistencia de carga. Debe elegirse de forma adecuada dicha resistencia con cada célula para que abarque de manera más o menos uniforme el rango de medida. La curva obtenida en iluminación deberá coincidir con la obtenida en oscuridad, pero desplazada verticalmente hacia abajo una cierta cantidad que será I_L .

Del ajuste de esta nueva curva se podrán obtener los parámetros de trabajo propios de cada célula:

- I_{SC} : corriente de cortocircuito.
- V_{OC} : voltaje a circuito abierto.
- I_m : intensidad a máxima potencia.
- V_m : voltaje a máxima potencia.
- P_m : potencia máxima extraíble.
- FF: factor de forma.

También se podrá estudiar la diferencia de los rendimientos luminosos entre las células, al haber sido iluminadas todas con la misma fuente, comparando la potencia producida por unidad de superficie en cada una de ellas.

2. Medida en la industria

Como se ha comentado anteriormente, para realizar este tipo de caracterización en la industria se han creado simuladores solares, los cuales agilizan este proceso.

Son dispositivos capaces de generar luz con un espectro determinado, en particular semejante al del Sol. En cuanto al presente proyecto, interesaría obtener el espectro AM1.5, puesto que se trata del espectro solar de referencia para aplicaciones fotovoltaicas (plano inclinado con una inclinación de 37° hacia el ecuador, apuntando al Sol, que se encuentra en un ángulo de 48,2° respecto a la Zenith y con una irradiancia total de 1000 W/m²).

Para ello se utilizan lámparas de arco, generalmente de tipo xenón, con un diseño completamente reflectante, para evitar una cierta distorsión. Para conseguir un espectro similar a la luz solar se utilizan varios filtros conectados en serie, que atenúan la respuesta espectral de la lámpara xenón, consiguiendo una similitud con el espectro solar.

Los simuladores solares están clasificados en términos de mayor a menor exactitud y precisión en A, B y C.

Clase A: Simuladores solares con no uniformidad temporal e inestabilidad menor al 2%.

Clase B: Inestabilidad menor 5%.

Clase C: Inestabilidad menor 10%.

Pese a tratarse de dispositivos usados en la industria se deben de seguir unas pautas para la correcta utilización en la caracterización de células y paneles fotovoltaicos. Los aspectos principales son:

- La fuente de luz utilizada, como se comentó anteriormente, debe ser de tipo xenón, pero debe de ir acompañada de una serie de filtros apropiados, para conseguir una respuesta espectral similar a la del Sol.
- Falta de uniformidad espacial, es decir, si no se garantiza una iluminación uniforme, se producen errores de caracterización.
- Estimación de la eficiencia, será quizás una de las mayores fuentes de error en la caracterización, puesto que no se identifica correctamente el área activa de las células.

Otro aspecto a tener en cuenta, es que se debe tratar de realizar las medidas siempre con la colocación de las células o paneles sobre fondos de color negro, de modo que se puedan evitar todas las reflexiones y refracciones de la fuente de luz.

A continuación se muestra un claro ejemplo de un simulador solar [13].



Figura 3.12 Ejemplo de simulador solar.

CAPITULO 4. Diseño y medidas experimentales

En este capítulo se exponen las medidas realizadas para la caracterización de células fotovoltaicas y la implementación de un sistema para la automatización de dicho proceso mediante hardware *open source*.

4.1. Objetivos

Dentro de este capítulo se realizarán una serie de medidas experimentales para la caracterización de tres tipos de células fotovoltaicas: monocristalina, policristalina y de capa fina. Para ello se obtendrán sus valores de corriente de cortocircuito y tensión en circuito abierto, parámetros fundamentales en la caracterización, mediante la iluminación de distintos tipos de fuentes de luz y controlando uno de los aspectos que influyen significativamente en el rendimiento de las células, como es la temperatura.

Con esto se hará una comparativa de los valores obtenidos. Además, se procederá a la monitorización de estos valores, mediante el uso de hardware *open source* (Arduino), el cual se encargara de procesar y visualizar los datos obtenidos a través de un display LCD.

Por último, se indicarán los pasos a realizar en un guión de prácticas diseñado en el contexto del presente trabajo, para que el alumno comprenda y se familiarice con todo el proceso de caracterización.

4.2. Estudio de la respuesta espectral de las fuentes de iluminación empleadas

Con este estudio se pretende conocer el comportamiento de cada una de las luminarias, así como hacer entender al alumno (en una posible práctica diseñada a partir de este trabajo) la importancia de la respuesta espectral de cada elemento en estos procesos mediante una comparativa.

En primer lugar se han seleccionado dos luminarias de distinto tipo, para poder observar sus diferencias respecto a la respuesta espectral.

Por un lado una luminaria compuesta en su totalidad por un conjunto de LEDs (*Light Emitting Diode, Diodo emisor de luz*), los cuales no irradian calor, lo que permite evitar una elevación en la temperatura de trabajo (este tipo de lámparas son conocidas como *fuentes de luz fría*). Para este proyecto se ha adquirido el modelo “**Led Reflector Lamp**”, suministrado por el fabricante RS (Amidata) con una potencia de 4 W y un ángulo del haz de 120° [14].



Figura 4.1 Lámpara LED Reflector.

Por otro lado, se ha optado por una luminaria de tipo halógeno, que aunque no cumpla un requisito primordial, como es el de ser una fuente de luz fría, puede servir para que el alumno tenga una visión completa de la influencia de este parámetro en la caracterización. Para este proyecto se ha escogido el modelo “**Espectro Total Viva-Lite MR16**”, del fabricante Viva Lite; siendo su principal característica la posibilidad de simular el espectro solar, ya que en el diseño se incorpora un filtro. Además posee una potencia de 50 W, una tensión nominal de 12 V y un ángulo de 10° [15].



Figura 4.2 Lámpara halógena espectro total.

Gracias al espectrómetro ECONIC de BWTEK y mediante una fibra óptica P400-2-SR (núcleo de 400 μ m y SR: *Solarization Resistant* (Resistente a la solarización)), se han caracterizado cada una de las luminarias, procurando realizar el proceso en una zona oscura, de forma que la luz de fondo no influya en las medidas.

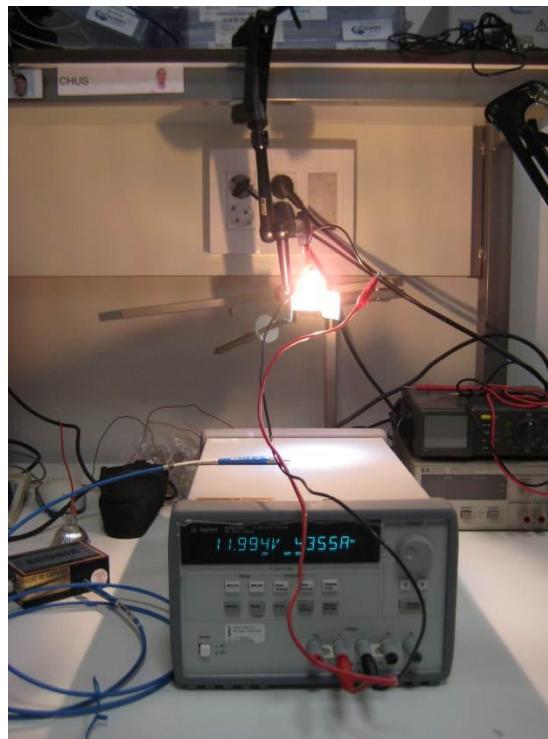


Figura 4.3 *Setup* para obtener las respuestas espectrales.

Se han obtenido las siguientes respuestas espectrales para cada una de las luminarias.

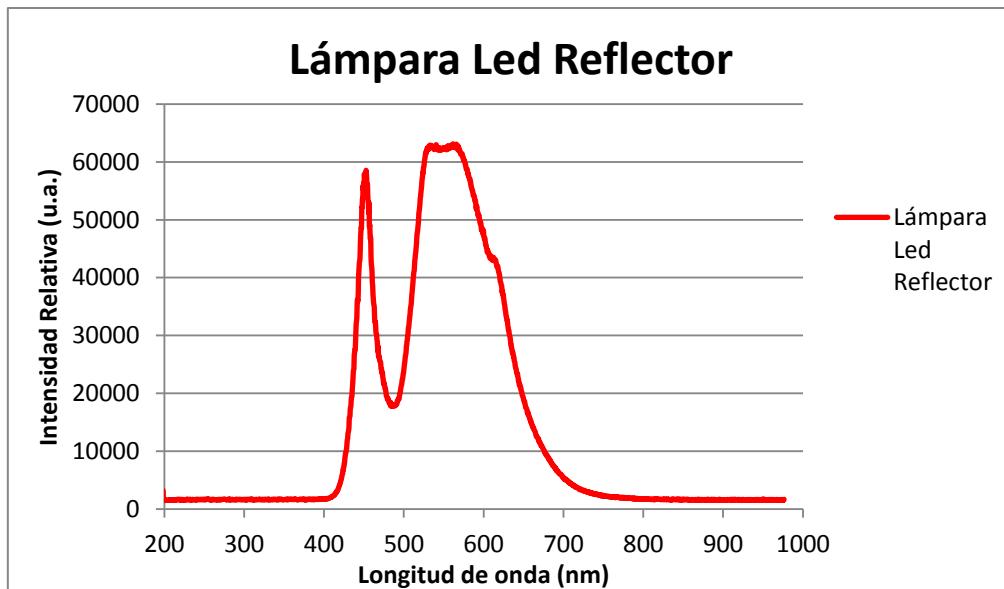


Figura 4.4 Respuesta espectral lámpara LED reflector.

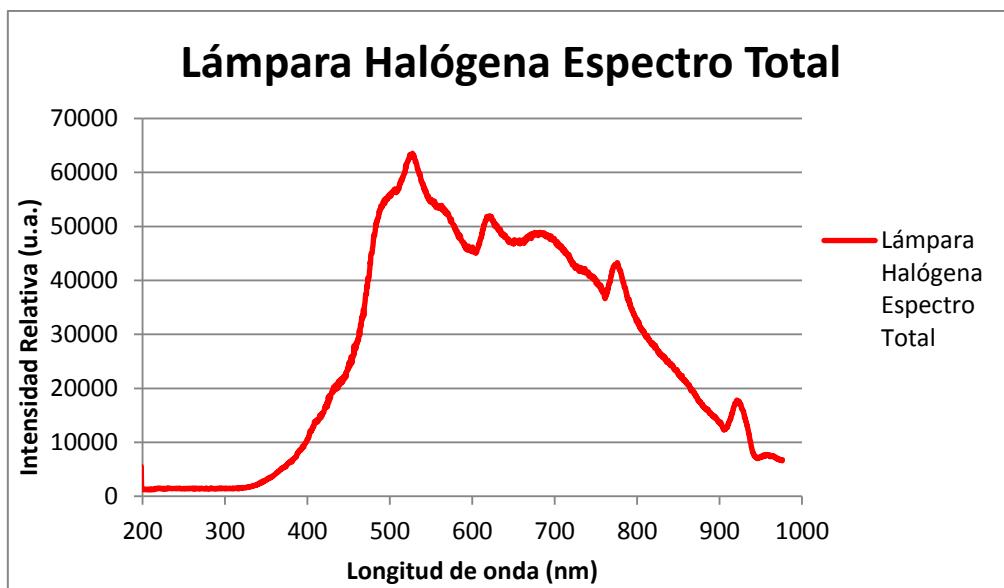


Figura 4.5 Respuesta espectral lámpara espectro total.

Una vez se han obtenido las respuestas espectrales de la luminarias se debe de tener en cuenta que las células fotovoltaicas están compuestas de Silicio, cuya respuesta espectral se muestra a continuación.

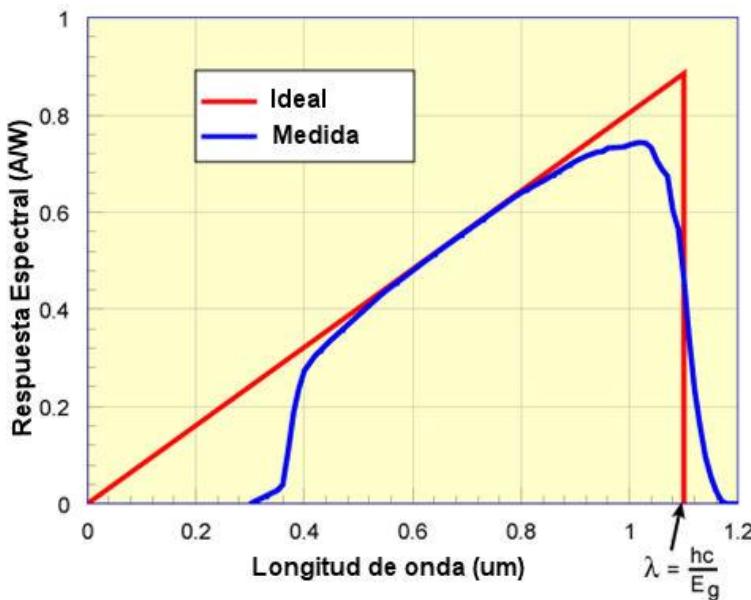


Figura 4.6 Respuesta espectral del silicio.

De este modo a la vista de los resultados obtenidos y de lo comentado anteriormente, la luminaria idónea para el proceso de caracterización sería la *Led Reflector Lamp*, por tratarse de una fuente de iluminación fría, frente a la lámpara de espectro total de tipo halógeno, ya que al irradiar calor producirá unas variaciones notables en los parámetros eléctricos de las células durante la caracterización.

Pese a esto, se podría indicar que la lámpara de espectro total, a la vista de la respuesta espectral, se trata de una luminaria apta, ya que su anchura espectral es muy elevada en el rango de interés y además proporciona un elevado valor de cuentas en torno al rango de mejor eficiencia de la célula. Cabe destacar su similitud con el espectro solar, lo que la convierte en un producto muy interesante en este proyecto, ya que se podrá simular, aún de manera burda, el comportamiento de las células trabajando en el exterior.

Para poder observar esta prestación de la luminaria, a continuación se muestra la respuesta espectral del Sol, viendo su similitud con la respuesta espectral de la lámpara halógena de espectro total. En la figura 4.7, se muestran los 3 espectros solares, en rojo el *AM0*, que corresponde con la medida fuera de la atmósfera, en verde el *AM1.5 Directo* en condiciones estándar de medida y por último el azul *AM1.5 Global*. Siendo el *AM1.5* el espectro usado en la caracterización de células fotovoltaicas.

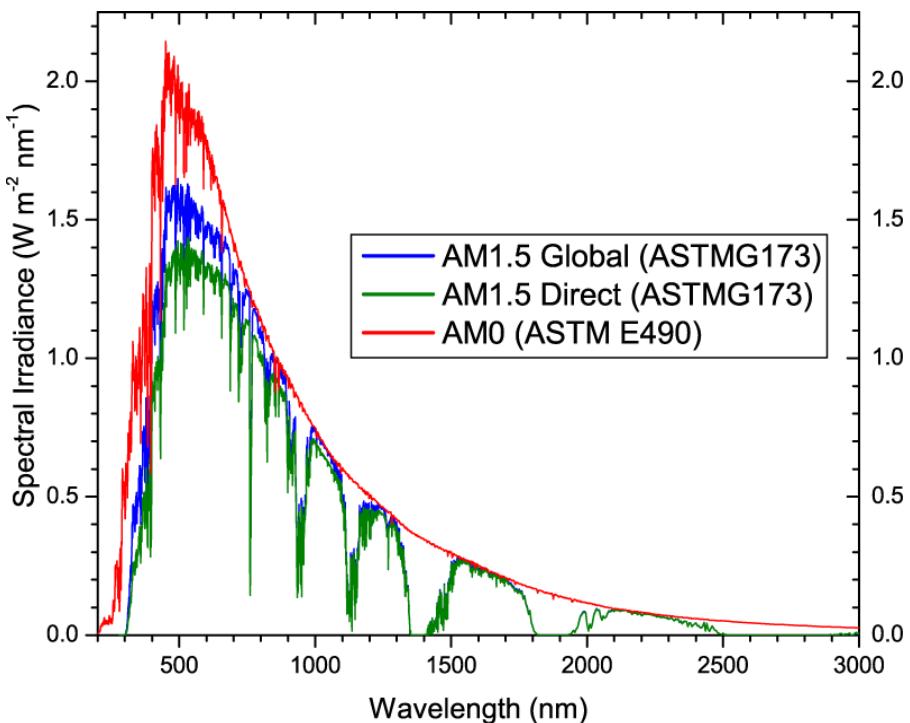


Figura 4.7 Respuesta espectral del Sol.

4.3. Caracterización de células fotovoltaicas

El estudio para la caracterización fotovoltaica consiste en obtener medidas de los parámetros significativos de las células, por un lado la corriente de cortocircuito (I_{SC}) y por otro, la tensión de circuito abierto (V_{OC}). Siempre bajo condiciones de iluminación y controlando la temperatura en el proceso. Además también sería posible obtener estos parámetros para una carga determinada.

La caracterización experimental se ha realizado con el *Setup* que se muestra en la Figura 4.8.

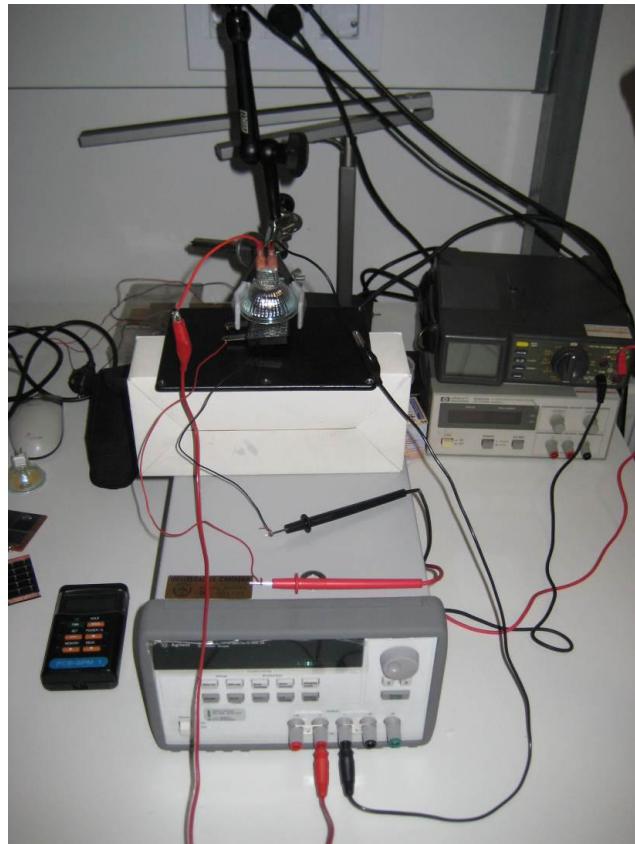


Figura 4.8 *Setup* de caracterización de las células.

Se dispone de tres tipos de células fotovoltaicas: monocristalina, policristalina y capa fina, que se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 respectivamente. Cada una de ellas ha sido iluminada con las distintas lámparas, caracterizadas en el apartado anterior. Para este punto es importante tener en cuenta la irradiancia de cada lámpara, puesto que cuanto mayor sea, mejores valores de potencia se obtendrán.

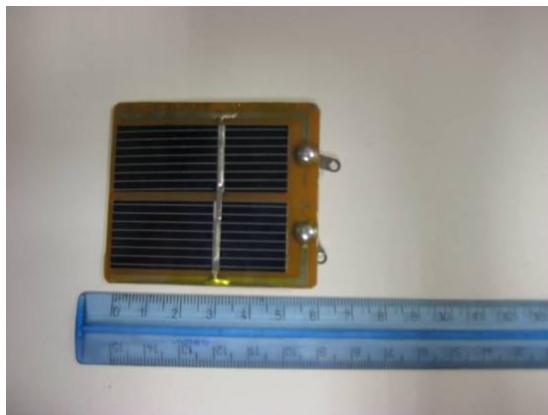


Figura 4.9 Célula Monocristalina.



Figura 4.10 Célula Policristalina.

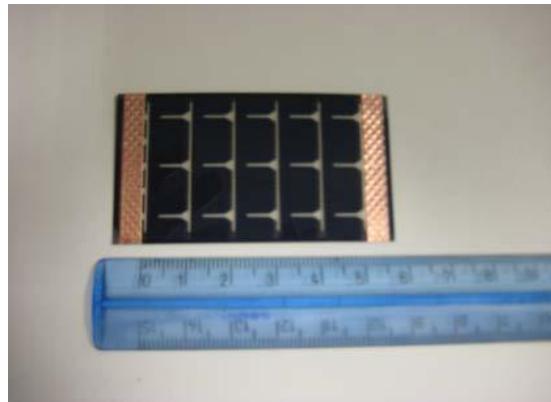


Figura 4.11 Célula de Capa Fina.

Es difícil obtener un valor fijo de irradiancia para las luminarias, pero se intentará controlar este aspecto mediante el uso de un solarímetro, y conseguir valores aproximados para cada proceso, de modo que se puedan validar los test de medidas.

A lo largo de este proyecto se realizaron varios métodos de medida con el fin de obtener uno que, mediante el uso de hardware *open source*, permitiera obtener medidas correctas de la caracterización.

1º Método mediante multímetro

Este primer método sirve como introducción para el proceso de caracterización. Se hará el estudio de los parámetros fundamentales mediante el uso de un multímetro, como el que se observa en la figura 4.12.



Figura 4.12 Multímetro JHR modelo MY67.

En primer lugar se mide la tensión en circuito abierto (V_{OC}), para lo que se debe poner el multímetro en la opción de voltímetro y colocar cada uno de sus terminales a un terminal de la célula. Para la obtención de la corriente de cortocircuito (I_{SC}), se debe tener en cuenta que hay que cambiar la opción del multímetro, esta vez, en modo amperímetro y de nuevo colocar sus terminales a cada terminal de la célula. De este modo iluminando las células con las distintas lámparas e intentando mantener el mismo valor de irradiancia, se obtienen los siguientes valores.

LAMPARA LED REFLECTOR			
W/m² = 120	V_{oc}	I_{sc}	Potencia
Monocristalina	1,069 V	38,4 mA	41,04 mW
Policristalina	0,475 V	58,4 mA	27,74 mW
Capa Fina	3,88 V	10,6 mA	41,12 mW

Tabla 1.1 Caracterización I-V lámpara LED Reflector.

LAMPARA ESPECTRO TOTAL			
W/m² = 183	V_{oc}	I_{sc}	Potencia
Monocristalina	0,976 V	7,23 mA	7,05 mW
Policristalina	0,285 V	5,01 mA	1,42 mW
Capa Fina	0,938V	0,18 mA	1,68 mW

Tabla 1.2 Caracterización I-V lámpara Espectro Total.

Gracias a este método se puede tener una idea general de los valores de corriente y tensión máximo que se pueden obtener para dicho valor de irradiancia, los cuales serán útiles para los sucesivos métodos.

2º Método mediante el uso de sensores de temperatura y corriente junto con Arduino

Se realizará la conexión de los sensores de temperatura a la placa Arduino como se indica en las figuras 4.13 y 4.14, respectivamente. Se configura la placa Arduino de modo que se puedan leer valores de temperatura. A través del *pin* analógico (A2) se obtendrá el valor recogido por el sensor LM35 (analógico) y a través del *pin* digital (D2) se recoge el valor correspondiente al sensor DS18B20 (digital).

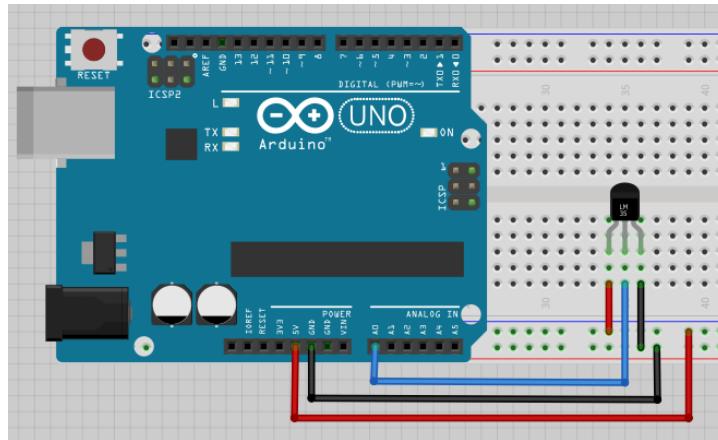


Figura 4.13 Conexión sensor LM35 con Arduino UNO.

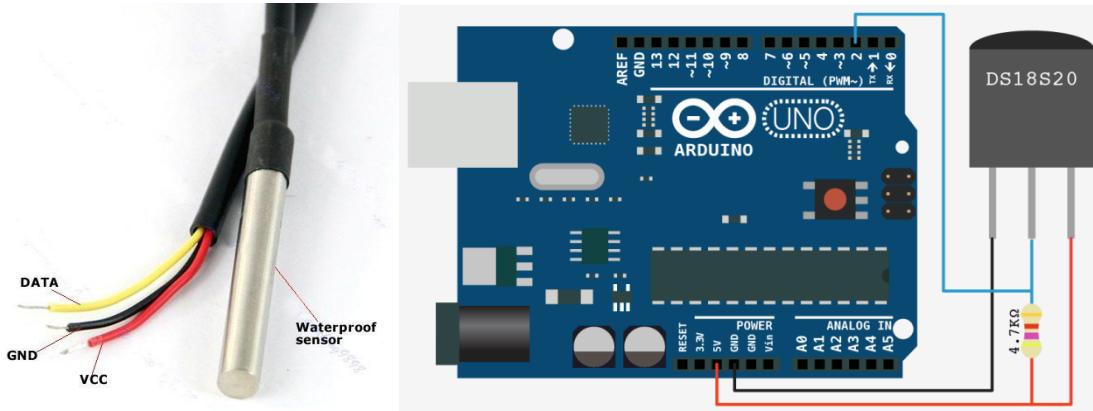


Figura 4.14 Conexión sensor DS18B20 sumergible con Arduino UNO.

Para poder leer los valores de ambos sensores de temperatura, se debe abrir el software de Arduino IDE y programar los *sketches* necesarios para la lectura de los datos. Un *sketch* se trata de un programa derivado del lenguaje de programación *Wiring*. Su estructura y su sintaxis es igual que la de C, de hecho todas las librerías de C y algunas de C++ se pueden utilizar con Arduino. La estructura básica de un *sketch* es muy similar a la de cualquier programa en C con algunas diferencias impuestas por el hecho de que la plataforma interactúa directamente con el medio físico que le rodea.

Estos *sketches* podrán ser observados en el Anexo I de este documento.

Cabe destacar que el primer paso es instalar en nuestro Arduino IDE dos librerías para poder manejar el sensor DS18B20, por un lado *DallasTemperatura.h* correspondiente al termómetro de Dallas y por otro, *OneWire.h*, debido a que este sensor utiliza la comunicación *OneWire*, que básicamente se trata de un protocolo especial que permite enviar y recibir datos utilizando un solo cable, a diferencia de la mayoría de los

protocolos que requiere dos vías. De hecho, Arduino posee los pines RX y TX que son los encargados de enviar y recibir información.

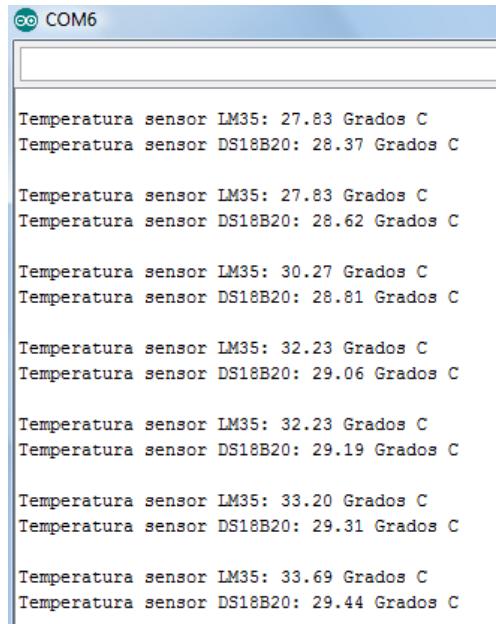


Figura 4.15 Resultados sensores de temperatura a través de Arduino IDE.

Para el caso del sensor ACS712 se realiza el siguiente montaje. Este sensor permite obtener la corriente de cortocircuito que generan las células, colocando los terminales como se muestra en la figura. Para obtener la tensión de circuito abierto, bastará con colocar uno de los terminales de la célula directamente a una entrada analógica de Arduino. A continuación se crea el *sketch* correspondiente para las medidas mediante el software Arduino IDE.

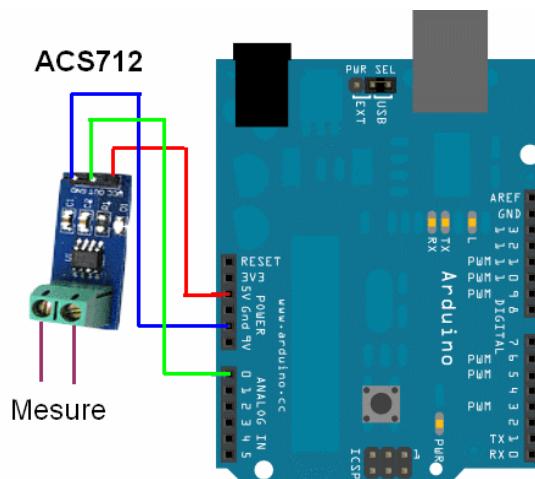


Figura 4.16 Conexión sensor ACS712 con Arduino UNO.

Antes de realizar el *sketch* hay que de tener en cuenta que Arduino posee un convertidor ADC, con lo que los valores que interpreta llamados “cuentas” de 0 a 1024, equivalen a un valor de tensión entre 0 y 5 voltios, por este motivo es necesario calcular unos coeficientes de corrección para el cálculo de la V_{oc} y la I_{sc} , como se indican en el *sketch* que se muestra en el Anexo I.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de utilizar el sensor ACS712, es que siempre devuelve la mitad de su valor de entrada. Luego en este caso, que se alimenta con 5 voltios (1024), nuestro circuito será de 2.5 voltios (512). Para obtener correctamente el coeficiente de corrección, se debe calcular el valor de intensidad máxima en el circuito, después se calcula el número de cuentas que se obtiene para ese valor de intensidad y gracias a esto se obtiene un coeficiente para poder calcular el valor de I_{sc} .

Se observa que, pese a que se trata de un sensor que cumple muchas de las características que en un primer momento se tenían en cuenta, en el presente trabajo no será útil. Esto es debido a que las corrientes que proporcionan las células son muy pequeñas, es decir, las corrientes se encuentran por debajo del fondo de escala que detecta el sensor, siendo imposible realizar una medida idónea de los parámetros en este caso. Posteriormente se desestimó el uso del sensor ACS712 5Amp para la caracterización de este tipo de células.

3º Método mediante circuito básico y Arduino

Se decidió implementar un circuito mediante el cual se pudiera obtener un fondo de escala más bajo y de este modo poder caracterizar las células mediante Arduino de una forma más precisa.

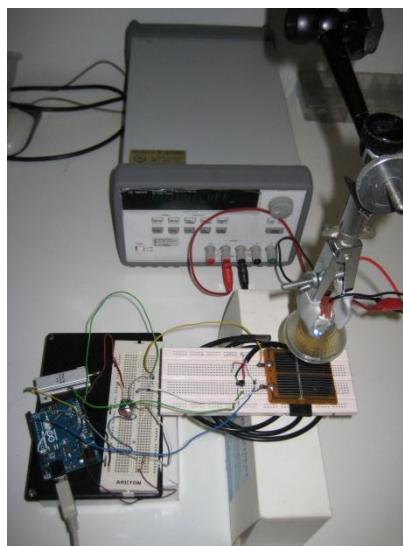


Figura 4.17 *Setup* de caracterización de las células.

En primer lugar se bajó el valor de alimentación a 4 Voltios, ya que sabiendo que las células no sobrepasan este valor, como se vio en la caracterización mediante el primer método, se consigue tener un mejor fondo de escala. Para ello se conectó un divisor de tensión en el *pin* Aref de Arduino (siempre que se haga uso de este tipo de alimentación en Arduino se debe tener en cuenta que en el *sketch* hay que incluir la orden *analogReference (EXTERNAL)*).

Por otro lado, se propuso colocar una resistencia de valor muy pequeño (2,2 ohmios) entre los bornes de la célula para poder obtener la caída de tensión en ella mediante Arduino y así poder calcular al valor de I_{SC} correspondiente. Por último, se añadió un *switch* para intercalar las medidas, es decir, obtener el valor de V_{oc} y cambiando el *switch* el valor de I_{SC} , conectando la salida del circuito al *pin* analógico (A0) de Arduino.

Para el caso de las temperaturas se mantuvieron los esquemas y conexiones, mediante los sensores anteriormente citados.

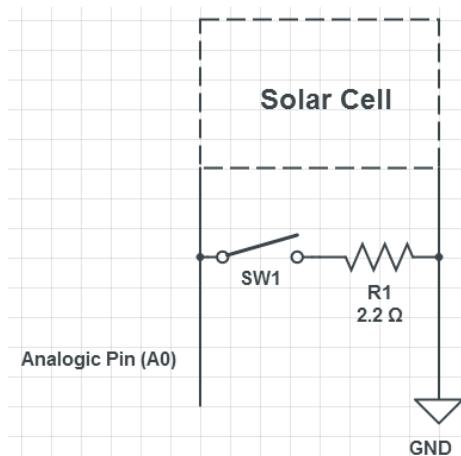


Figura 4.18 Esquemático del circuito básico.

LAMPARA LED REFLECTOR

$W/m^2 = 105,5$	V_{oc}	I_{SC}	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	1,046 V	43,010 mA	44,98 mW	21,48 °C	21,62 °C
Policristalina	0,442 V	53,300 mA	23,55 mW	20,57 °C	21,25 °C
Capa Fina	4,233V	4,100 mA	17,35 mW	21,06 °C	21,15 °C

Tabla 1.3 Caracterización I-V lámpara LED Reflector.

LAMPARA ESPECTRO TOTAL

W/m² = 128	Voc	Isc	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	0,971 V	16,400 mA	15,92 mW	21,97 °C	22,12 °C
Policristalina	0,303 V	10,250 mA	3,10 mW	21,97 °C	22,69 °C
Capa Fina	1,57 V	No detecta	No posible	22,95 °C	23,40 °C

Tabla 1.4 Caracterización I-V lámpara Espectro Total.

Pese a los cambios realizados respecto al método anterior, no se consigió obtener unos resultados idóneos, debido nuevamente al fondo de escala. Los resultados oscilaban entre valores muy pequeños, lo que provocaba que no fueran detectados mediante Arduino.

Se debe destacar que ya en este método, cuando a las células se las ilumina mediante la lámpara halógena de espectro total, la temperatura en el proceso varía, lo que ocasiona que los resultados oscilen.

4º Método mediante circuito completo y Arduino

Por todo lo comentado anteriormente, se decidió implementar un circuito más preciso. De modo que se pudiera conseguir un fondo de escala adecuado y obtener mediante Arduino unos resultados correctos.

En primer lugar, se decidió cambiar la resistencia asociada a la célula por una de menor valor en este caso de 0,025 Ohmios. Después se realizó un circuito que, mediante un chip TC4427 (un driver de alta velocidad) se consigue acondicionar la señal a un nivel de tensión y corriente óptimos. Además, se añadió un relé de la marca OMRON modelo G5LA-1-E, el cual se encarga de controlar la medida, de modo que se pueda obtener el valor de I_{SC} y V_{OC} de forma alternativa, conectándolo a través del *pin* digital (D3). Finalmente se decidió hacer uso de un amplificador operacional en modo diferencial, A.O. MCP6042, conectado a una de las entradas analógicas de Arduino (A1), para obtener un resultado óptimo de la medida de I_{SC} . La entrada analógica de Arduino (A0), se encargará de devolver el valor de V_{OC} . Por otro último, se mantiene la conexión de los sensores de temperatura como en casos anteriores. Además se añade un botón para controlar cuando realizar la medida y cuando parar mediante el *pin* digital (D4).

En líneas generales se diseñó el siguiente esquemático.

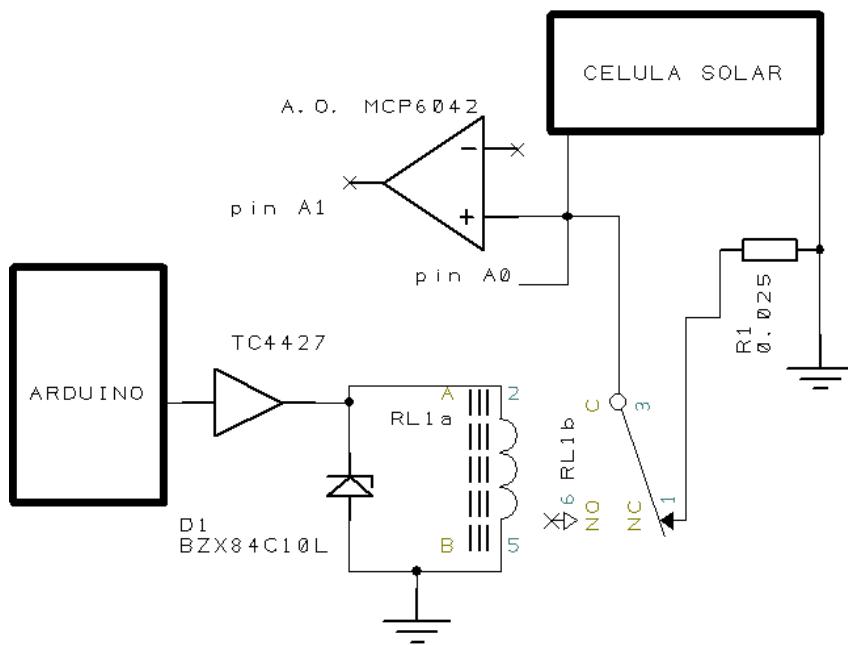


Figura 4.19 Esquemático del circuito completo.

Gracias a esta implementación se consigue controlar el proceso de caracterización de las células mediante Arduino de una forma bastante precisa. Debido a esto, se decidió realizar una PCB del circuito implementado, para facilitar su conexión con el hardware *open source* y conseguir un *set-up* de medida de mejor calidad.

4.4. Diseño de PCB para la monitorización.

Partiendo del esquemático final construido anteriormente, se realizó el diseño de una PCB mediante el software DesignSpark PCB [16]. Para mejorar el diseño anterior se decidió añadir a las entradas y salidas circuitos de desacople para evitar ruidos y conseguir medidas más precisas.

El proceso de la creación de la PCB se divide en diferentes partes.

- Selección de los distintos componentes que formarán parte del circuito, creando el esquemático completo con sus conexiones correctamente, siguiendo el boceto creado en el apartado anterior. El esquemático se muestra en el Anexo I.
- Obtener el diseño PCB, para poder crear la máscara que servirá más adelante para realizar la placa diseñada.

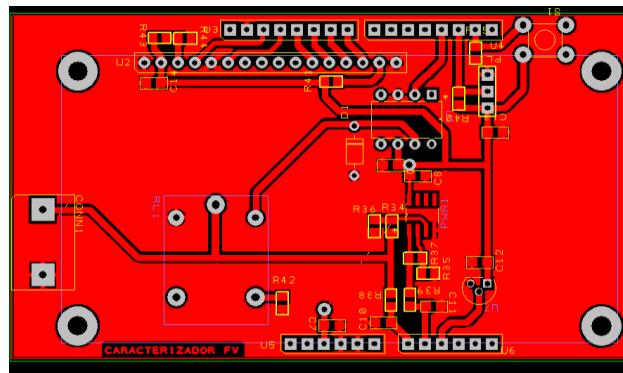


Figura 4.20 Diseño PCB mediante DesignSpark.

- c) A continuación se procede a insolar. Para ello se introduce la placa junto a la máscara en una cámara de insolación, mediante la cual protegerá las pistas que quedarán impresas en la placa.



Figura 4.21 Proceso de velado de la PCB.

- d) Posteriormente, una vez transcurrido el tiempo de insolación correspondiente (aproximadamente 3 minutos y medio), se saca la placa y se introduce en un líquido revelador, para dejar expuesto el cobre a eliminar de la PCB.



Figura 4.22 Cámara extractora.

- e) Seguidamente se procede a eliminar el cobre expuesto en la fase de ataque químico. En esta fase, mediante una mezcla de ácido clorhídrico y agua oxigenada, se consigue eliminar de la placa el exceso de cobre quedando las pistas correctamente definidas.

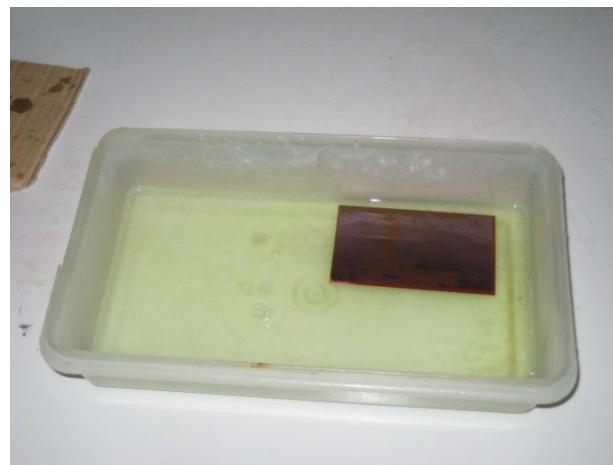


Figura 4.23 Limpieza de la PCB, mediante ácido y agua oxigenada.

- f) Despues se limpia, se seca y se comprueba que todas las pistas y conexiones del circuito se encuentran en perfecto estado para su utilización, es decir, se verifica que no exista ninguna unión innecesaria o algun cortocircuito.

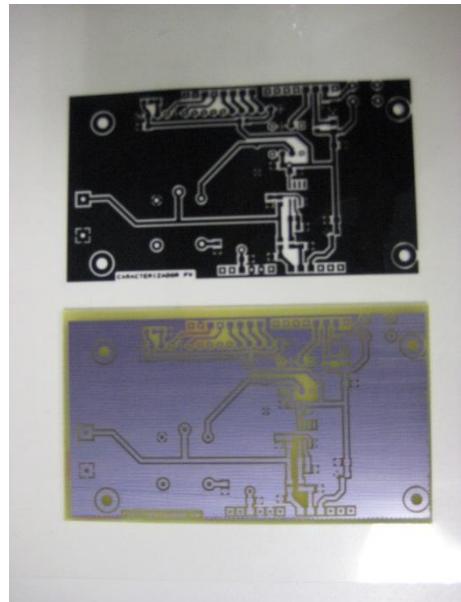


Figura 4.24 Comprobación final de la PCB.

- g) Por último, se realizan los taladrados y se sueldan los componentes a la PCB para tener finalmente la placa completa.

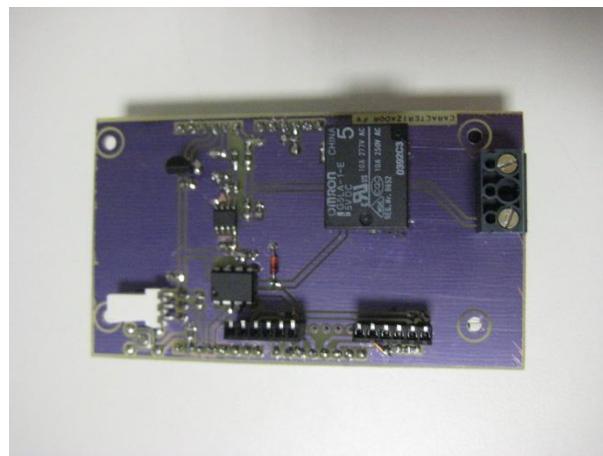


Figura 4.25 Placa Final.

4.5. Resultados finales de la caracterización.

A continuación se realiza el montaje entre la placa Arduino UNO, la PCB diseñada y un display LCD de 16x2, mediante el cual se muestran los parámetros fundamentales de las células, así como los valores recogidos por los dos sensores de temperatura.

Para programar este display correctamente ha de hacerse uso de la librería *LiquidCrystal.h*, la cual se incluirá en el software Arduino IDE y en el *sketch* correspondiente, como se puede observar en el Anexo I de este documento.

Seguidamente se monta la PCB sobre Arduino UNO y se conecta encima de ella el display de 16x2, como se indica en la figura.

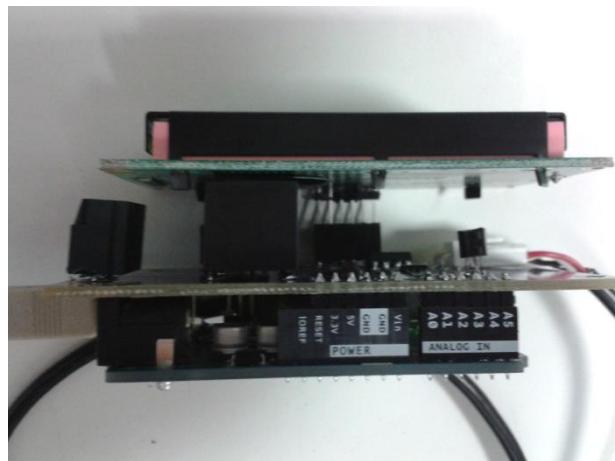


Figura 4.26 Conexión Arduino, PCB y LCD.

Tras todo lo anterior se realiza la caracterización de las células teniendo en cuenta siempre los valores de irradiancia y de temperatura durante el proceso. Para el caso de la lámpara Led Reflector.

LAMPARA LED REFLECTOR

$W/m^2 = 103,8$	Voc	Isc	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	1,04 V	36,85 mA	38,32 mW	21,00 °C	21,37 °C
Policristalina	0,44 V	54,15 mA	23,82 mW	21,00 °C	21,50 °C
Capa Fina	4,25V	6,41 mA	27,24 mW	21,48 °C	21,69 °C

Tabla 1.5 Caracterización I-V lámpara LED Reflector

Comprobación de los resultados mediante el multímetro.

LAMPARA LED REFLECTOR					
W/m² = 105,5	Voc	Isc	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	1,04 V	43,010 mA	44,73 mW	21,48 °C	21,65 °C
Policristalina	0,442 V	53,300 mA	23,55 mW	21,40 °C	21,37 °C
Capa Fina	4,233V	4,100 mA	17,35 mW	21,06 °C	21,25 °C

Tabla 1.6 Caracterización I-V lámpara LED Reflector.

Ahora para el caso de la lámpara de espectro total

LAMPARA ESPECTRO TOTAL					
W/m² = 190	Voc	Isc	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	0,97 V	7,64 mA	7,41 mW	22,95 °C	23,62 °C
Policristalina	0,28 V	5,03 mA	1,40 mW	22,95 °C	23,56 °C
Capa Fina	0,93 V	0,1 mA	0,09 mW	21,48 °C	22,56 °C

Tabla 1.7 Caracterización I-V lámpara Espectro Total.

Comprobación de los resultados mediante el multímetro.

LAMPARA ESPECTRO TOTAL					
W/m² = 190	Voc	Isc	Potencia	LM35	DS18B20
Monocristalina	0,970 V	6,423 mA	6,23 mW	21,97 °C	22,12 °C
Policristalina	0,283 V	5,012 mA	1,41 mW	21,97 °C	22,69 °C
Capa Fina	0,937 V	0,1 mA	0,09 mW	22,95 °C	23,44 °C

Tabla 1.8 Caracterización I-V lámpara Espectro Total.

La diferencia entre los datos obtenidos con una luminaria Led Reflector sobre la de espectro total es debida a varios aspectos. Por un lado, la lámpara Led Reflector es más directiva por usar tecnología LED que la de espectro total, con lo que la mayoría de la luz irradia la célula, cosa que en el caso de la de espectro total no sucede, ya que parte de la luz emitida no incidirá sobre la célula.

Y por otro lado, la temperatura, ya que la lámpara de tipo espectro total irradia calor, lo que ocasiona desviaciones en los valores de potencia en la caracterización.



Figura 4.27 Proceso de medición.

A la vista de los datos obtenidos, se puede observar como el circuito implementado para la caracterización de células fotovoltaicas es adecuado para medir los parámetros fundamentales del proceso. Se debe tener en cuenta la influencia de la temperatura en el caso de la luminaria de tipo halógeno de espectro total, con la cual, a medida que la temperatura aumente, implicará variaciones en los parámetros fundamentales. Concretamente, cuando la temperatura aumenta, la I_{SC} aumenta ligeramente y la V_{oc} disminuye.

Otro aspecto a tratar en la caracterización es el de la irradiancia. A continuación se muestran unos gráficos en los que se observa su influencia en los parámetros básicos de la célula, para el caso de la luminaria de espectro total tomado valores para distintas irradiancias 190W/m^2 , 480W/m^2 , 884W/m^2 , 1069W/m^2 y 1599W/m^2 .

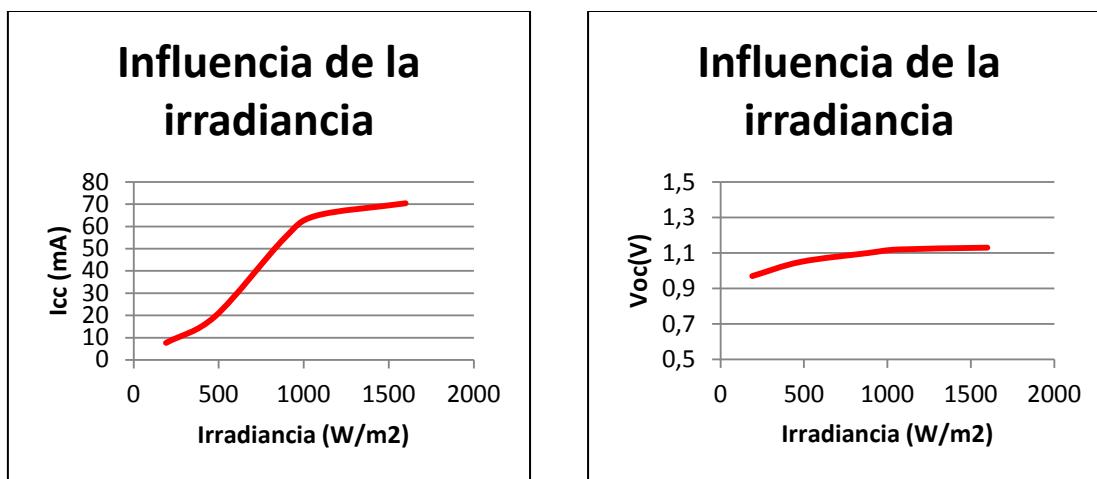


Figura 4.28 Caracterización en función de la irradiancia (célula monocristalina).

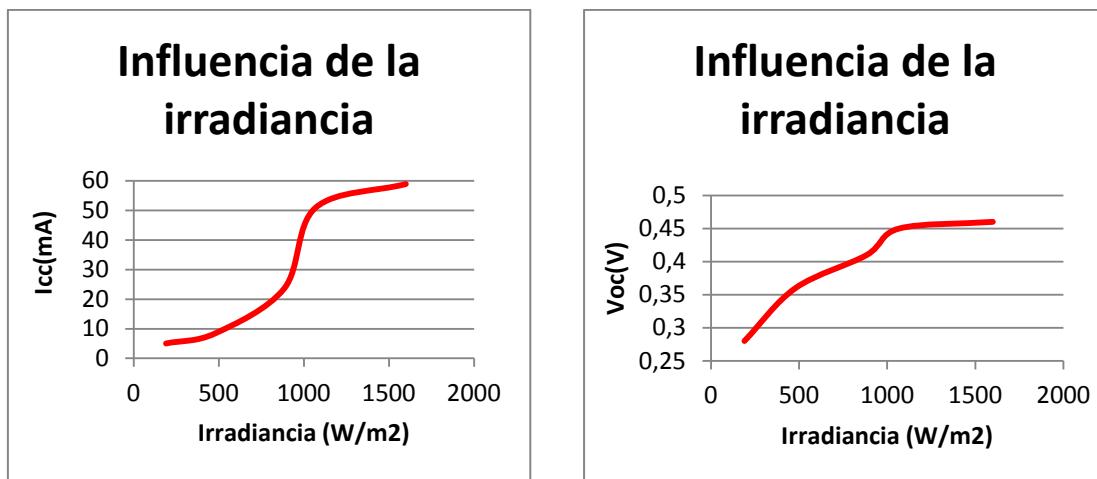


Figura 4.29 Caracterización en función de la irradiancia (célula policristalina).

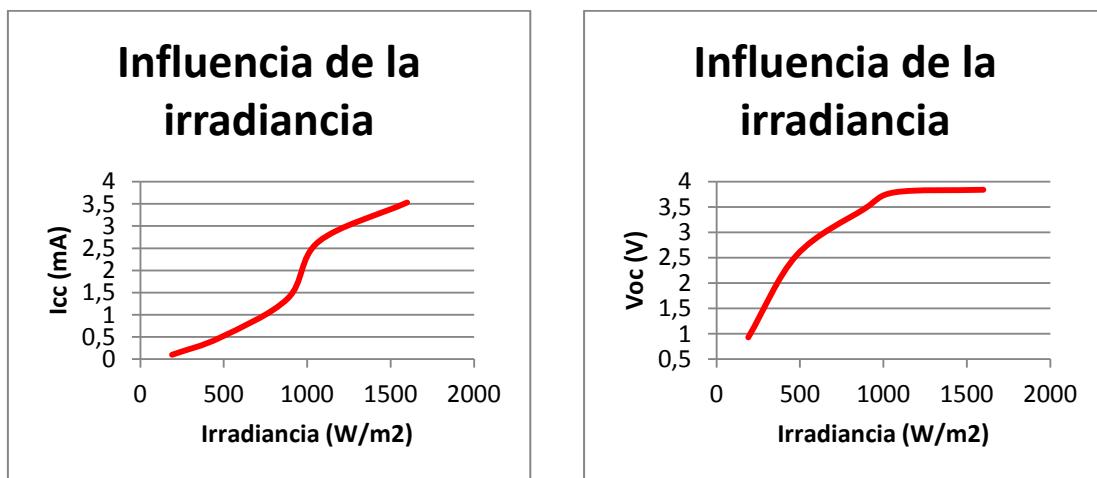


Figura 4.30 Caracterización en función de la irradiancia (célula capa fina).

A medida que ésta aumenta, se observa como la V_{OC} aumenta muy ligeramente y la I_{sc} en cierta medida debería tener una tendencia aproximadamente lineal con respecto al valor de irradiancia.

4.6. Desarrollo de la práctica.

Con el fin de servir como práctica para las asignaturas comentadas anteriormente, se ha diseñado un guión de prácticas para el alumno, de modo que comprenda el proceso de caracterización de las células fotovoltaicas, los aspectos externos que influyen en ella y poder familiarizarse con entornos de hardware *open source*, concretamente Arduino. En el Anexo II se puede observar el guión completo propuesto.

CAPITULO 5. Conclusiones y líneas futuras

Se presentarán brevemente las conclusiones extraídas del desarrollo de este proyecto y se expondrán posibles líneas futuras que complementen este trabajo.

5.1. Conclusiones

En este proyecto se ha trabajado en la caracterización de células fotovoltaicas mediante el uso de hardware *open source*, planteando adicionalmente una posible práctica para las asignaturas comentadas anteriormente.

Con el presente trabajo se ha mostrado, en primer lugar, la importancia del tipo de fuente de luz para la caracterización de dispositivos fotovoltaicos. Mediante el estudio realizado se ha observado que las fuentes de luz LED, son las más idóneas por tratarse de fuentes de luz fría, es decir, no irradian calor, con lo que se consigue que el factor *temperatura* no influya en la caracterización eléctrica de este tipo de dispositivos, además de tratarse de fuentes de luz más directivas.

Respecto a la temperatura se ha observado cómo influye en los parámetros fundamentales de las células. En concreto se ve cómo, si se aumenta la temperatura, esto provoca que la corriente de cortocircuito (I_{SC}) aumente ligeramente, pero en cambio la tensión de circuito abierto (V_{OC}) desciende del orden de 2,3 mV/ °C. Lo que provoca que decrezca tanto el rendimiento como el factor de forma de las células.

En relación al otro aspecto fundamental en la caracterización, como es la irradiancia, cabe destacar que mediante el estudio realizado se detecta como cuando se va aumentando este valor, la corriente de cortocircuito (I_{SC}) tiende a tener una dependencia aproximadamente lineal. La tensión de circuito abierto (V_{OC}) también aumenta, pero de forma mucho más lenta.

Para el proceso de caracterización cabe destacar la importancia de un correcto *Setup* para realizar las medidas, es decir, mantener la misma distancia entre la fuente de luz y la célula en todos los procesos, además de realizar la caracterización en condiciones de oscuridad, de modo que la luz ambiente no influya en las medidas.

Mediante el uso del hardware *open source* se consigue monitorizar el proceso, de modo que se automatiza, siendo menos compleja su implementación. Consiguiendo tener un *Setup* de medida móvil, mediante el cual se pueda realizar la medida en cualquier sitio. Además de conseguir un fin didáctico de cara al alumno, ya que también se ha diseñado una posible práctica de laboratorio.

Para resaltar la vigencia de los estudios llevados a cabo en este proyecto, se hace referencia a un artículo publicado en la revista *Nature Photonics* de Junio de 2012, por Henry J. Snaith, en el que se tratan los errores más comunes cometidos en la caracterización de células fotovoltaicas, provocando con ello resultados inválidos de

eficiencia, además de indicar el uso de algunas precauciones, las cuales se han intentado tomar en la medida de lo posible, ya que no se dispone de ningún simulador solar. Además, este artículo servirá como material de “conocimientos previos” para el alumno de cara a la realización de la práctica, lo que se explica en el Anexo II de este documento.

5.2. Líneas futuras

Como posibles líneas futuras se puede destacar la posibilidad de tratar de diseñar un simulador solar de bajo coste. De este modo se conseguiría una fuente de iluminación idónea y lo más parecida a la utilizada en la industria, cumpliendo los requisitos básicos.

Por otro lado se podría estudiar la posible utilización del hardware diseñado para la caracterización de paneles o sistemas fotovoltaicos más complejos, no solo de células fotovoltaicas.

Otra línea importante, ya que este proyecto se enmarca en la posible implementación de una práctica para la caracterización de células fotovoltaicas, sería la posibilidad de extraer el método para el estudio de la energía eólica. Es decir, mediante el diseño propuesto poder controlar aspectos fundamentales como son la potencia respecto de la velocidad del viento, mediante un pequeño *Setup*. Para ello mediante el diseño de un pequeño aerogenerador, el cual se introduciría en un túnel de viento, se podría caracterizar la curva velocidad de viento vs. Potencia, así como poder realizar modificaciones en cuanto a las variaciones obtenidas al cambiar el número de palas o su orientación (*pitch*)

REFERENCIAS

- [1] Boletín Oficial del Estado, Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de Enero, nº 24, Sec. I. Pág. (8068-8072).
- [2] Boletín Oficial del Estado, Ley 2/2011, de 4 de Marzo, nº 55, Sec. I. Pág. (25033-25235).
- [3] Boletín Oficial del Estado, Directiva 2009/28/CE, de 23 de Abril, nº 140, Sec. I. Pág. (16-62).
- [4] <http://www.idae.es/index.php?id.29/relmenu.327/mod.pags/mem.detalle>
- [5] Plan de Energías Renovables 2011 – 2020.
- [6] Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 661/2007, de 25 de Mayo, nº 126, Sec. I. Pág. (22846-22886).
- [7] Boletín Oficial del Estado, Real Decreto 314/2006, de 17 de Marzo, nº 74, Sec. I. Pág. (11816-11831).
- [8] <http://www.arduino.cc/>
- [9] <http://arduino.cc/en/Main/Software>
- [10] es.rs-online.com/web
- [11] P. Crespo, *Historia de la física cuántica*, Col.legi d'enginyers industrials de Catalunya, Barcelona, Spain.
- [12] Christiana Honsberg and Stuart Bowden, *Standard Solar Spectra*, PV EDUCATION.ORG, Appendices
- [13] Henry J.Snaith, *The perils of Solar cell efficiency measurements*, Nature Photonics, Junio 2012, vol. 6.
- [14] es.rs-online.com/web
- [15] <http://www.ecogaia.com/tienda/vmchk/luz-full-spectrum/halogenas-20w-mr16/flypage.tpl.html>

[16] <http://www.rs-online.com/designspark/electronics/>

BIBLIOGRAFIA

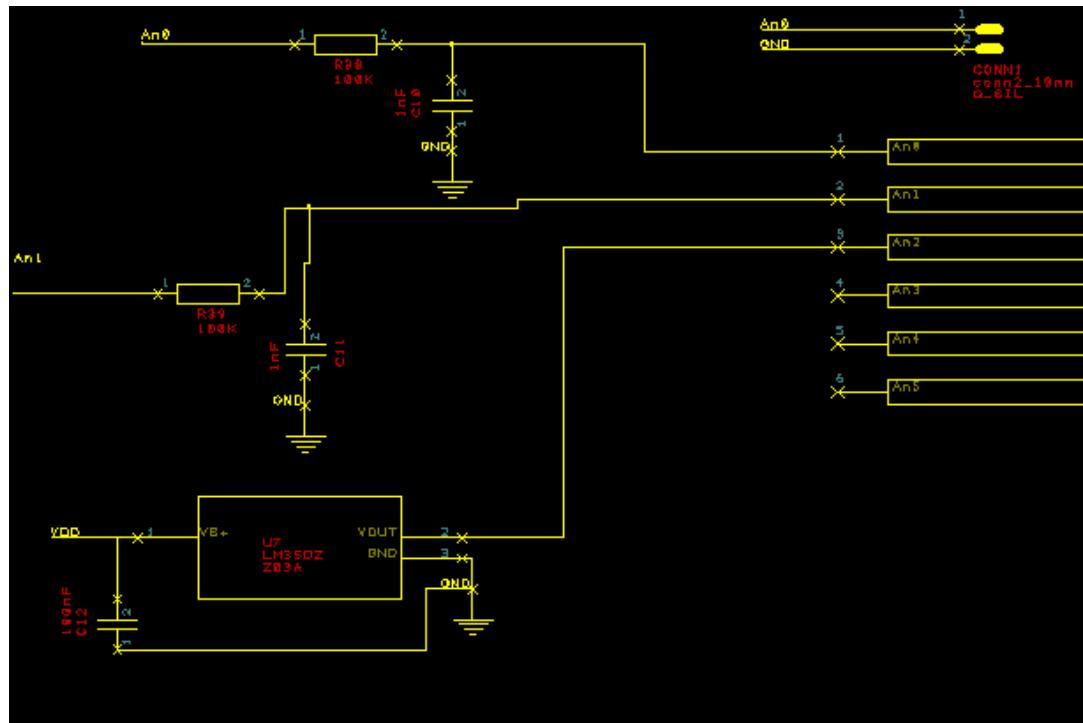
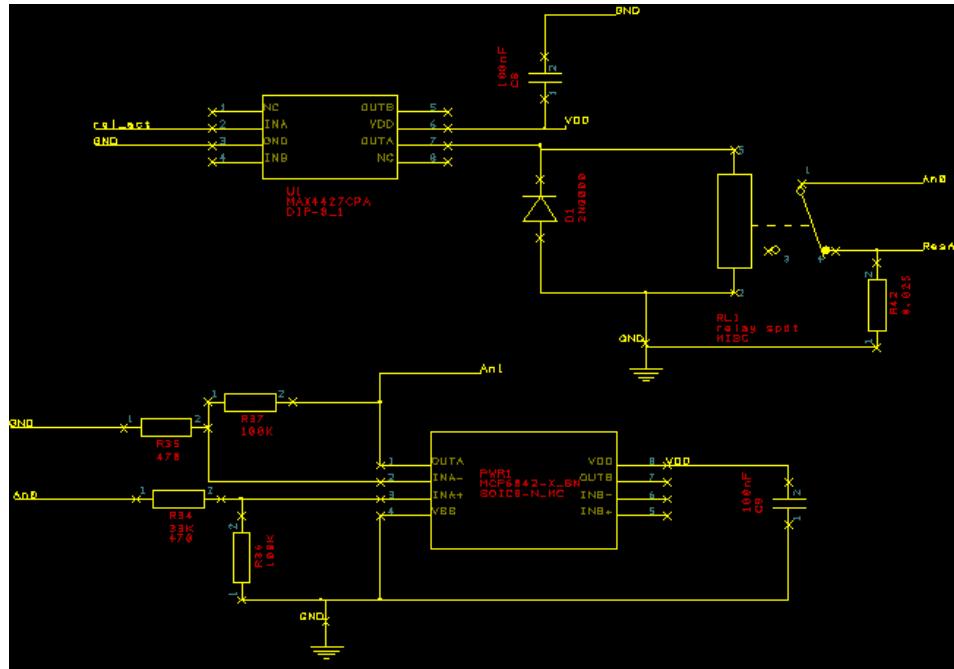
- José M. Fernández Salgado, *Guía completa de la energía solar fotovoltaica*.
- Falk Antony, Christian Dürschner, Karl-Heinz Remmers, *Fotovoltaica para profesionales: Diseño, instalación y comercialización*.
- A. Fuentes, M. Álvarez, *Prácticas de energía solar fotovoltaica*.
- Massimo Banzi, *Introducción a Arduino*.
- Autores varios, *Libro básico de Arduino*.
- Brian Evans, *Arduino programing notebook*.

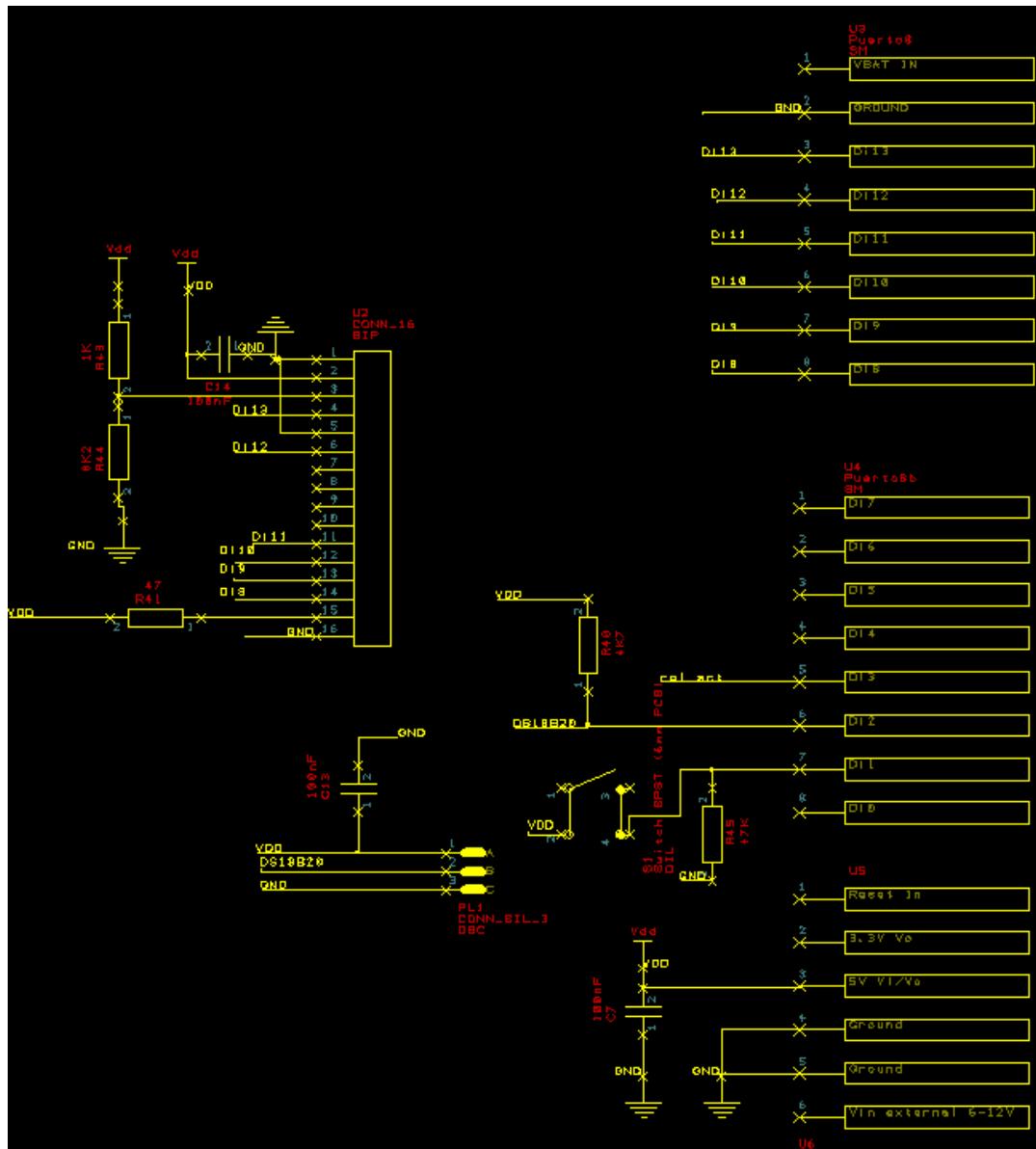
ANEXO I. Esquemáticos y *sketches*

Se expondrán los esquemáticos y los *sketches* utilizados en este documento.

ESQUEMATICOS

- Esquemático del diseño final para la creación de la PCB, diseñado mediante el software DesignSpark PCB y mostrado en partes.





SKETCHES realizados con software IDE Arduino 1.0.5.

A. *Sketch* para obtener los valores de temperatura mediante los sensores LM35 y DS18B20

```
// Script para leer temperatura utilizando sensor LM35 y DS18B20

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

// El DS18B20 usa el protocolo 1-wire para comunicarse, por ello debemos instanciar un objeto con el pin del sensor...

OneWire oneWire(2);

// Y después instanciar los sensores pasando el objeto anterior:

DallasTemperature sensores(&oneWire);

// Declaración de variables

float tempC;

int tempPin = 0; // Definimos la entrada en pin A0

void setup()

{

    // Abre puerto serial y lo configura a 9600 bps

    Serial.begin(9600);

    sensores.begin();

}

void loop()

{

    // Lee el valor desde el sensor

    tempC = analogRead(tempPin);

    // Se lee la temperatura de todos los sensores conectados al pin digital

    sensores.requestTemperatures();

    // Convierte el valor a temperatura
```

```
tempC = (5.0 * tempC * 100.0)/1024.0;  
  
// Envía el dato al puerto serial  
  
Serial.print("Temperatura sensor LM35: ");  
  
Serial.print(tempC);  
  
Serial.print(" Grados C\n");  
  
// El método getTempCByIndex nos devuelve un float de la temperatura del sensor  
  
Serial.print("Temperatura sensor DS18B20: ");  
  
Serial.print( sensores.getTempCByIndex(0) );  
  
Serial.println(" Grados C\n");  
  
delay(1000);  
  
}
```

B. *Sketch* para obtener los valores de corriente y tensión mediante el sensor ACS712.

```
int sensorValue;  
  
int sensorValue1;  
  
void setup()  
{  
    Serial.begin(9600); // establece el puerto serie a 9600  
}  
  
void loop()  
{  
    sensorValue = analogRead(0)*1.0; // leer pin de entrada analógica 0  
    sensorValue1 = analogRead (2)*1.0; // leer pin de entrada analógica 2  
  
    Serial.print("La tensión en circuito abierto es :");  
  
    Serial.print((sensorValue1/1024.0) * 5.0); // imprime el valor leído aplicando la relación cuentas voltios  
  
    Serial.println(" V.");
```

```
Serial.print("La corriente de cortocircuito es :");  
Serial.print((512 - sensorValue) * 37.037); // aplico factor de corrección  
Serial.println(" mA.");  
Serial.print("\n");  
delay(900); // espera 900ms para próxima lectura  
}
```

C. Sketch final para todos los componentes del *Setup*, Arduino, PCB y LCD.

```
#include <LiquidCrystal.h> // Librería para el control del LCD  
#include <OneWire.h>  
#include <DallasTemperature.h>  
  
OneWire oneWire(2); // El DS18B20 usa el protocolo 1-wire para comunicarse, por ello debemos instanciar un objeto con el pin del sensor  
  
DallasTemperature sensores(&oneWire); // y después instanciar los sensores pasando el objeto anterior  
  
LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8);  
  
// Declaración de variables  
  
float tempC;  
  
int tempPin = 2; // Definimos la entrada en pin A2  
  
//Declaración de variables de corriente  
  
int val_V = 0;  
  
float sum_val_V=0;  
  
float val_med_V=0;  
  
float val_Voc=0;  
  
int val_I = 0;  
  
float sum_val_I=0;  
  
float val_med_I=0;  
  
float val_Isc=0;  
  
void setup()
```

```
{  
  Serial.begin(9600);          // establece el puerto serie a 9600  
  
  sensores.begin();           // Se inicializan los sensores  
  
  val_V=analogRead(0);        // lee pin de entrada analógica 0 y el primer valor será despreciado para el promedio  
  
  val_I=analogRead(1);  
  
  pinMode(4, INPUT);          // Se encarga de controlar el botón y se define como pin de entrada  
  pinMode(3, OUTPUT);         // Se encarga de controlar el relé y se define como pin de salida  
  
  lcd.begin (16,2);  
  
  lcd.setCursor(0,0);         //Posición en la LCD  
  
  lcd.print("V=");            //Para pintar por la LCD  
  
  lcd.setCursor(8,0);  
  
  lcd.print("T1=");  
  
  lcd.setCursor(0,1);  
  
  lcd.print("I=");  
  
  lcd.setCursor(8,1);  
  
  lcd.print("T2=");  
  
}  
  
void loop()  
{  
  while(digitalRead(4)==0)  
  {  
  }  
  
  tempC = analogRead(tempPin); // Lee el valor desde el sensor  
  
  sensores.requestTemperatures(); // Se lee la temperatura de todos los sensores conectados al pin digital  
  
  tempC = (5.0 * tempC * 100.0)/1024.0; // Convierte el valor a temperatura  
  
  Serial.print("Sensor LM35: "); // Envía el dato al puerto serial  
  
  Serial.print(tempC);
```

```
Serial.print(" Grados C\n");

Serial.print("Sensor DS18B20: "); // El método getTempCByIndex nos devuelve un float de la temperatura del sensor que le indiquemos como parámetro

Serial.print( sensores.getTempCByIndex(2) );

Serial.println(" Grados C\n");

lcd.setCursor(11,0);

lcd.print(tempC);

lcd.setCursor(11,1);

lcd.print(sensores.getTempCByIndex(2));

digitalWrite(3, HIGH);

delay(100);

// Calculo para la VOC

sum_val_V=0;

//Bucle for para calcular el promedio de 20 cuentas

for (int i=0; i<20;i++)

{

    val_V=analogRead(0);

    sum_val_V+=val_V;

    delay(1);

}

val_med_V=sum_val_V/20;

Serial.print("Número de cuentas:");

Serial.print(val_med_V);           // imprime el valor leído

Serial.println(" cuentas.");

val_Voc = (val_med_V * 5)/1024;

Serial.print("La tensión de circuito abierto es :");

Serial.print(val_Voc,3);

Serial.println(" V.");
```

```
Serial.print("\n");
lcd.setCursor(2,0);
lcd.print(val_Voc);
digitalWrite(3, LOW);
delay(500);

// Calculo para la ISC

sum_val_I=0;

//Bucle for para calcular el promedio de 20 cuentas

for (int i=0; i<20;i++)

{
    val_I=analogRead(1);
    sum_val_I+=val_I;
    delay(1);
}

val_med_I=sum_val_I/20;

Serial.print("Número de cuentas:");

Serial.print(val_med_I);           // imprime el valor leído

Serial.println(" cuentas.");

val_Isc = val_med_I * 0.37;        //Valor por el coeficiente calculado

Serial.print("La corriente de cortocircuito es :");

Serial.print(val_Isc,3);

Serial.println(" mA.");

Serial.print("\n");

lcd.setCursor(2,1);

lcd.print(val_Isc);

delay(100);           // espera 100ms para próxima lectura

}
```

ANEXO II. Estudio previo y guión de prácticas

Se expondrán una propuesta de estudio previo y un guión de prácticas para el alumno.

Caracterización de células fotovoltaicas mediante hardware open source

1

1. Objetivos

Esta práctica tiene como objetivo principal iniciarse en la caracterización eléctrica de células fotovoltaicas; así como en la comprensión de la influencia que ciertos parámetros, como por ejemplo la temperatura, tienen en el rendimiento de las células o paneles fotovoltaicos. La obtención de dichos datos se realizará mediante la utilización de hardware *open source* (Arduino).

2. Introducción

2.1. Caracterización de células fotovoltaicas

El proceso de caracterización de células fotovoltaicas consiste en la obtención de la característica I-V de cada célula.

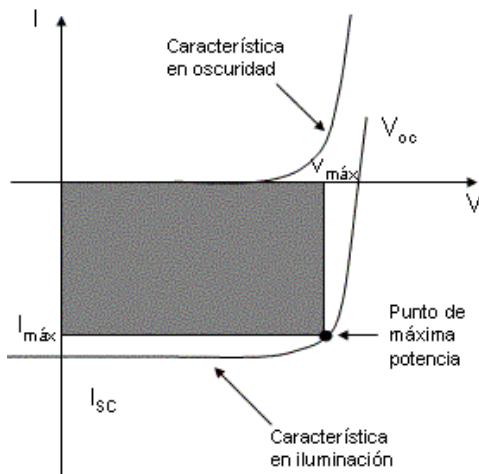


Figura 1.1 Curva I-V de una célula fotovoltaica.

Para la creación de dicha curva es necesaria la obtención de dos parámetros fundamentales como son la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la tensión en circuito abierto (V_{oc}). Siendo:

I_{SC} = La máxima corriente que puede entregar una célula a tensión nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura.

V_{OC} = La máxima tensión que puede entregar una célula a corriente nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura.

Se debe tener en cuenta que para la caracterización fotovoltaica, ésta se realiza normalmente siguiendo las condiciones estándar de medida (CEM), definidas del modo siguiente:

- Irradiancia (GSTC): 1000 W/m^2
- Distribución espectral: AM 1,5 G
- Incidencia normal
- Temperatura de célula: 25°C

Bajo estas condiciones, y una vez obtenidos los parámetros fundamentales, es necesario calcular la potencia y eficiencia de las células.

2.2. Hardware *open source*: Arduino

Otro aspecto a tener en cuenta en la realización de esta práctica es el uso de hardware *open source* para la visualización y monitorización de los resultados.

Cuando se habla de hardware *open source* (*hardware de código abierto*), se refiere a un hardware cuyo diseño se hace disponible públicamente para que cualquier persona lo pueda estudiar, modificar, distribuir, materializar y vender, tanto el original como otros objetos basados en ese diseño.

Las principales características son:

- Permitir su modificación y distribución.
- Se debe ofrecer el software indispensable para la correcta escritura del código libre.
- La licencia no debe restringir que se venda o comparta la documentación.

Una de las empresas que mayor tendencia han marcado en este tipo de hardware es, “**Arduino**”. Se trata de una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos, basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

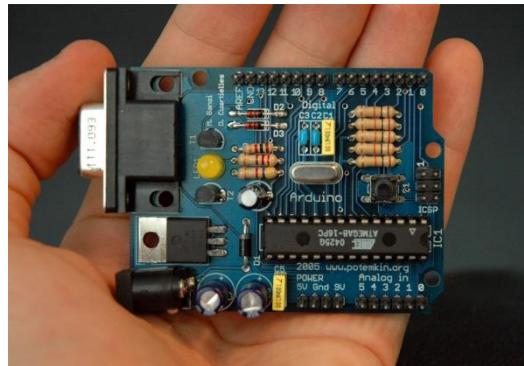


Figura 1.2 Ejemplo de placa Arduino.

3. Obtención de los datos para la caracterización

Como punto de partida de todo proceso de caracterización fotovoltaica, es necesario conocer el comportamiento de las células. La célula solar completa tiene una característica que es el resultado del comportamiento en oscuridad e iluminación de las diferentes regiones del dispositivo.

La característica de una célula en oscuridad coincide con la de un diodo de unión, ya que la principal diferencia entre ambos dispositivos es el contacto metálico superior que en el caso de célula presenta forma de rejilla.

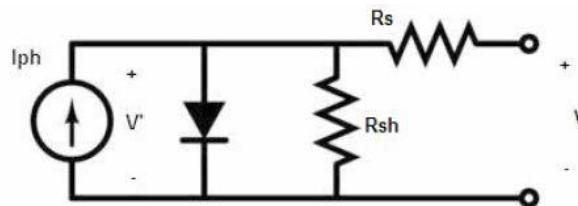


Figura 1.3 Modelo circuital de una célula fotovoltaica

Del análisis del circuito equivalente simplificado, considerando una célula solar ideal con resistencia serie (R_s) nula y resistencia paralelo (R_{sh}) infinita, la expresión de corriente de salida resulta,

$$I = I_{SC} - I_0(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde I_{SC} corresponde a la corriente de cortocircuito. El término negativo corresponde a un diodo ideal con una corriente inversa de saturación I_{SC} (corriente saliente de la célula solar por el lado p (de la unión PN) en condiciones de cortocircuito).

Sus parámetros fundamentales, además de los comentados anteriormente son:

P_m → Punto de Máxima Potencia (MPP). Es el punto de la curva característica de módulo dependiente de la insolación y la temperatura en el que el generador solar entrega la máxima potencia. Siendo V_m e I_m los valores de tensión y corriente máximos de la célula.

$$P_m = V_m * I_m \quad (\text{Ec. 2})$$

η → La eficiencia o rendimiento de conversión. Se define como el cociente entre la potencia máxima (eléctrica) entregada por la célula solar P_m y la potencia recibida del Sol. Se indica la potencia incidente (P_{in}) en W/m², y el área de la célula (A) en m².

$$\eta = \frac{P_m}{A * P_{in}} \quad (\text{Ec. 3})$$

A lo largo de esta práctica se procederá a caracterizar tres tipos de células, monocristalina, policristalina y de capa fina. Todas ellas fabricadas de silicio cuya respuesta espectral es la siguiente.

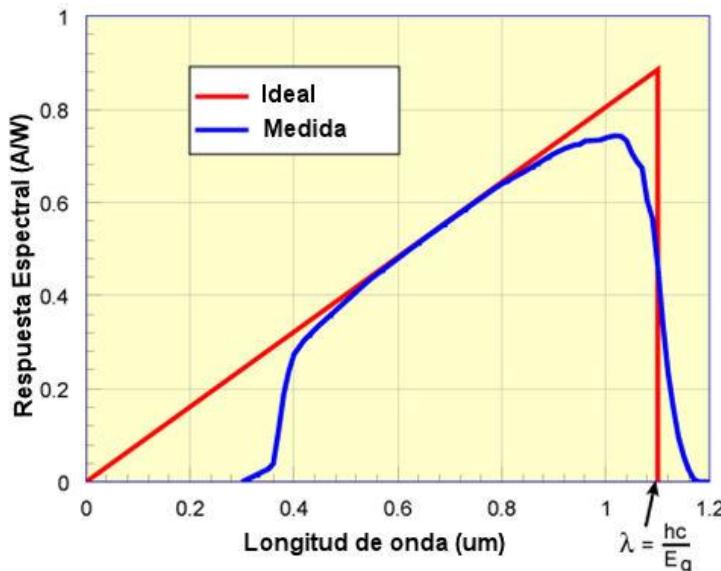


Figura 1.4 Respuesta espectral del silicio.

Se emplearán condiciones de iluminación distintas, mediante luminarias de tipo LED y luminarias de tipo halógeno.

4. Desarrollo de la práctica

La práctica se va a desarrollar considerando los siguientes puntos

1. Obtener las respuestas esenciales de cada lámpara y comparar los resultados.
2. Calcular los parámetros fundamentales de la célula mediante el uso de un multímetro y mediante Arduino. Comparar los resultados obtenidos.
3. Observar la temperatura en el proceso y estimar su influencia.
4. Mediante la lámpara de tipo halógena, variar su irradiancia y obtener la característica I-V para cada tipo de célula. Comentar las conclusiones obtenidas.

 1

Mediante el uso del espectrómetro y el software BWSpec, obtener la respuesta espectral de dos luminarias distintas.

- Luminaria LED Reflector Lamp, compuesta por LEDs de color blanco.
- Luminaria halógena de espectro total, cuya principal característica es poder imitar la respuesta del Sol.

Compara ambos espectros y comenta de manera razonada cuál consideras mejor para el proceso de caracterización de las células fotovoltaicas.

 2

Calcular los parámetros fundamentales de las células (I_{SC} y V_{OC}) utilizando el multímetro y mediante el hardware *open source*

- a) Medición mediante multímetro.

Para calcular la corriente de cortocircuito (I_{SC}) se debe conectar el multímetro en modo amperímetro y medir entre los terminales de la célula, respetando siempre el positivo y negativo. Para calcular la tensión en circuito abierto (V_{OC}) el procedimiento es el mismo, pero debemos cambiar el multímetro a modo voltímetro.

b) Medición mediante hardware *open source*.

Para realizar la medida, se debe conectar la placa Arduino, la PBC y la pantalla LCD a nuestro PC, mediante el cable de conexión. Además de conectar la célula en los terminales correspondiente de la PCB. Seguidamente se abre el software IDE de Arduino y se introduce el *sketch* de medida. De modo que se obtienen los valores de I_{SC} , V_{OC} y temperatura de funcionamiento de la célula.

A continuación se muestra la estructura de un *sketch* para familiarizarse con el entorno Arduino IDE.

Primero: Se introducirán, si fueran necesarias, las bibliotecas para la programación

```
# include < >
```

Segundo: La configuración de nuestra placa (*Setup*), esta se ejecutará tan solo una vez, cuando iniciemos nuestro Arduino.

```
void setup() {
```

Aquí vendrán las configuraciones de nuestro pines como entradas o salidas y la configuración del puerto serie si es necesaria. Como veis debe estar todo incluido entre llaves.

```
}
```

Tercero: Programa que ejecutará cíclicamente (*loop*).

```
void loop() {
```

Aquí pondremos las instrucciones que ejecutará nuestro programa.

```
}
```

c) Obtener los valores de potencia y eficiencia de las células.



Empleando la lámpara halógena, observar la importancia de la temperatura en el proceso. Comentar como influye en los parámetros fundamentales de la célula.



Observar la importancia de la irradiancia en el proceso. Comentar como influye en los parámetros fundamentales de la célula.

Para ello mediante la lámpara de tipo halógena, se obtendrán distintos valores de irradiancia. Estos valores de irradiancia se consiguen variando la intensidad de la luminaria y mediante el uso de un solarímetro. Obtener los valores de I_{SC} y V_{OC} para cada valor de irradiancia y observar su influencia.

Célula monocristalina

IRRADIANCIA	V_{OC}	I_{SC}
200 W/m ²		
400 W/m ²		
600 W/m ²		
800 W/m ²		
1000 W/m ²		

Célula policristalina

IRRADIANCIA	V_{OC}	I_{SC}
200 W/m ²		
400 W/m ²		
600 W/m ²		
800 W/m ²		
1000 W/m ²		

Célula de capa fina

IRRADIANCIA	Voc	Isc
200 W/m ²		
400 W/m ²		
600 W/m ²		
800 W/m ²		
1000 W/m ²		

Estudio Previo

Para facilitar al alumno la comprensión de la práctica, será necesario la lectura del artículo publicado en la revista *Nature Photonics* de Junio de 2012, por Henry J. Snaith, en el que se tratan los errores más comunes cometidos en la caracterización de células fotovoltaicas, provocando con ello resultados inválidos de eficiencia, además de indicar el uso de algunas precauciones.

<http://www.nature.com/nphoton/journal/v6/n6/full/nphoton.2012.119.html>

ANEXO III. Hojas de características

Se mostrarán las hojas de características de los componentes utilizados en este proyecto.

LM35

Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

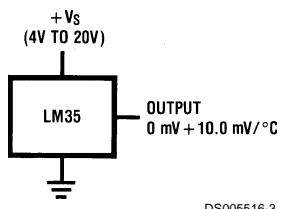
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only 60 μA from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40 to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

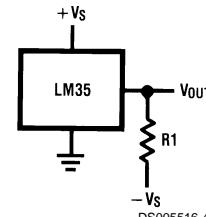
Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear $+ 10.0 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^\circ\text{C}$)
- Rated for full -55 to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than 60 μA current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, 0.1Ω for 1 mA load

Typical Applications



**FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor
($+2^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$)**

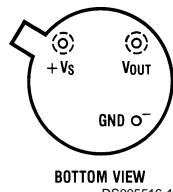


Choose $R_1 = -V_S/50 \mu\text{A}$
 $V_{OUT} = +1,500 \text{ mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $= +250 \text{ mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $= -550 \text{ mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Connection Diagrams

TO-46
Metal Can Package*

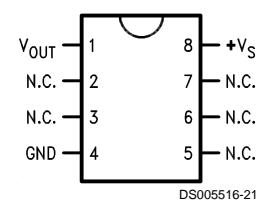


*Case is connected to negative pin (GND)

**Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or
LM35DH**

See NS Package Number H03H

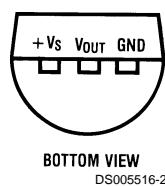
SO-8
Small Outline Molded Package



N.C. = No Connection

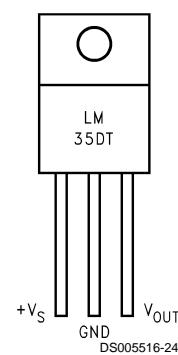
Top View
Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

TO-92
Plastic Package



**Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ**
See NS Package Number Z03A

TO-220
Plastic Package*



*Tab is connected to the negative pin (GND).

Note: The LM35DT pinout is different than the discontinued LM35DP.

Order Number LM35DT
See NS Package Number TA03F

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp.:	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-220 Package,	-65°C to +150°C
Lead Temp.:	
TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds)	300°C

TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
SO Package (Note 12)	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V
Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)	
LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A=+25^\circ C$	± 0.2	± 0.5		± 0.2	± 0.5		°C
	$T_A=-10^\circ C$	± 0.3			± 0.3		± 1.0	°C
	$T_A=T_{MAX}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		°C
	$T_A=T_{MIN}$	± 0.4	± 1.0		± 0.4		± 1.5	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.18		± 0.35	± 0.15		± 0.3	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	$+10.0$	$+9.9,$ $+10.1$		$+10.0$		$+9.9,$ $+10.1$	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A=+25^\circ C$	± 0.4	± 1.0		± 0.4	± 1.0		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	± 0.5		± 3.0	± 0.5		± 3.0	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A=+25^\circ C$	± 0.01	± 0.05		± 0.01	± 0.05		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02		± 0.1	± 0.02		± 0.1	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S=+5V, +25^\circ C$	56	67		56	67		µA
	$V_S=+5V$	105		131	91		114	µA
	$V_S=+30V, +25^\circ C$	56.2	68		56.2	68		µA
	$V_S=+30V$	105.5		133	91.5		116	µA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ C$	0.2	1.0		0.2	1.0		µA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	µA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	µA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1, $I_L=0$</i>	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J=T_{MAX}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			°C

Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A=+25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 1.0	± 1.5	± 0.4	± 1.0	± 1.5	$^\circ\text{C}$
	$T_A=-10^\circ\text{C}$	± 0.5			± 0.5			$^\circ\text{C}$
	$T_A=T_{\text{MAX}}$	± 0.8	± 1.5		± 0.8			$^\circ\text{C}$
	$T_A=T_{\text{MIN}}$	± 0.8			± 0.8			$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A=+25^\circ\text{C}$				± 0.6	± 1.5	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
	$T_A=T_{\text{MAX}}$				± 0.9			$^\circ\text{C}$
	$T_A=T_{\text{MIN}}$				± 0.9			$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.3		± 0.5	± 0.2		± 0.5	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+10.0$	$+9.8, +10.2$		$+10.0$		$+9.8, +10.2$	$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$	$T_A=+25^\circ\text{C}$	± 0.4	± 2.0	± 5.0	± 0.4	± 2.0	± 5.0	mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	± 0.5			± 0.5			mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A=+25^\circ\text{C}$	± 0.01	± 0.1	± 0.2	± 0.01	± 0.1	± 0.2	mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	± 0.02			± 0.02			mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S=+5V, +25^\circ\text{C}$	56	80	158	56	80	138	μA
	$V_S=+5V$	105			91			μA
	$V_S=+30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		μA
	$V_S=+30V$	105.5			91.5			μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0	3.0	0.2	2.0	3.0	μA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5			0.5			μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.7	+0.39		+0.7	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L=0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J=T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours	± 0.08			± 0.08			$^\circ\text{C}$

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S=+5\text{Vdc}$ and $I_{\text{LOAD}}=50 \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is $400^\circ\text{C}/\text{W}$, junction to ambient, and $24^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is $180^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is $220^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is $90^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mv}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in $^\circ\text{C}$).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

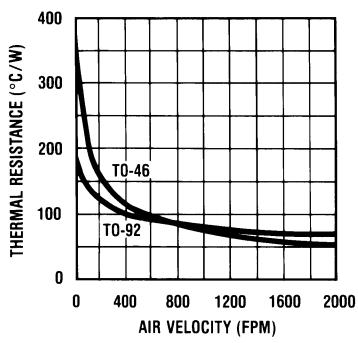
Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a $1.5 \text{ k}\Omega$ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

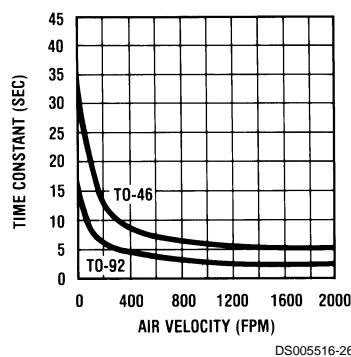
Typical Performance Characteristics

Thermal Resistance
Junction to Air



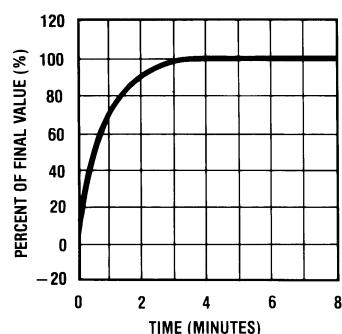
DS005516-25

Thermal Time Constant



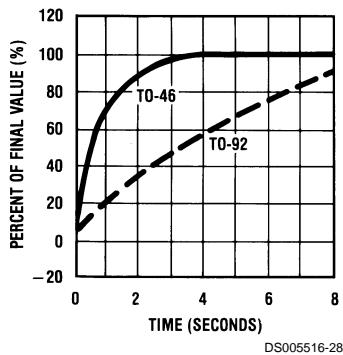
DS005516-26

Thermal Response
in Still Air



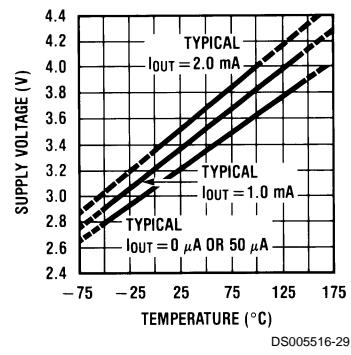
DS005516-27

Thermal Response in
Stirred Oil Bath



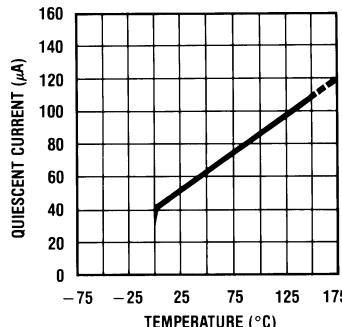
DS005516-28

Minimum Supply
Voltage vs. Temperature



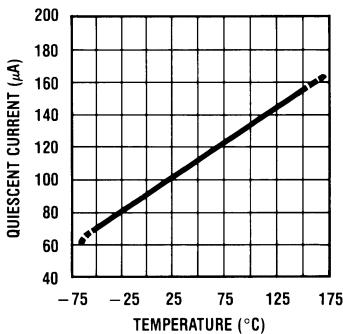
DS005516-29

Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 1.)



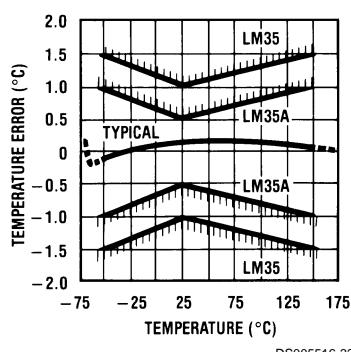
DS005516-30

Quiescent Current
vs. Temperature
(In Circuit of Figure 2.)



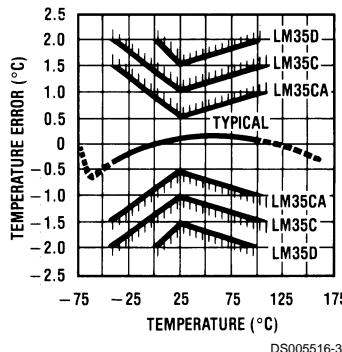
DS005516-31

Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)



DS005516-32

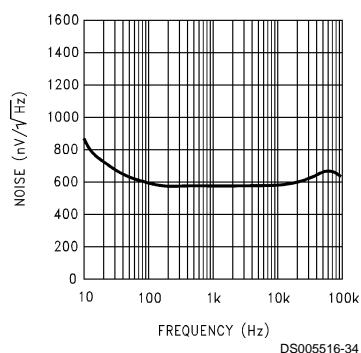
Accuracy vs. Temperature
(Guaranteed)



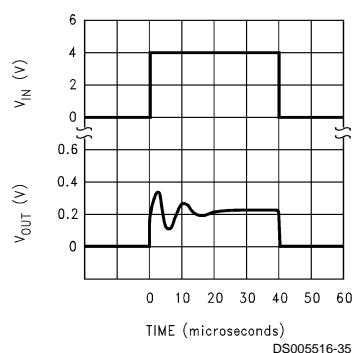
DS005516-33

Typical Performance Characteristics (Continued)

Noise Voltage



Start-Up Response



Applications

The LM35 can be applied easily in the same way as other integrated-circuit temperature sensors. It can be glued or cemented to a surface and its temperature will be within about 0.01°C of the surface temperature.

This presumes that the ambient air temperature is almost the same as the surface temperature; if the air temperature were much higher or lower than the surface temperature, the actual temperature of the LM35 die would be at an intermediate temperature between the surface temperature and the air temperature. This is especially true for the TO-92 plastic package, where the copper leads are the principal thermal path to carry heat into the device, so its temperature might be closer to the air temperature than to the surface temperature.

To minimize this problem, be sure that the wiring to the LM35, as it leaves the device, is held at the same temperature as the surface of interest. The easiest way to do this is to cover up these wires with a bead of epoxy which will insure that the leads and wires are all at the same temperature as the surface, and that the LM35 die's temperature will not be affected by the air temperature.

The TO-46 metal package can also be soldered to a metal surface or pipe without damage. Of course, in that case the V- terminal of the circuit will be grounded to that metal. Alternatively, the LM35 can be mounted inside a sealed-end metal tube, and can then be dipped into a bath or screwed into a threaded hole in a tank. As with any IC, the LM35 and accompanying wiring and circuits must be kept insulated and dry, to avoid leakage and corrosion. This is especially true if the circuit may operate at cold temperatures where condensation can occur. Printed-circuit coatings and varnishes such as Humiseal and epoxy paints or dips are often used to insure that moisture cannot corrode the LM35 or its connections.

These devices are sometimes soldered to a small light-weight heat fin, to decrease the thermal time constant and speed up the response in slowly-moving air. On the other hand, a small thermal mass may be added to the sensor, to give the steadiest reading despite small deviations in the air temperature.

Temperature Rise of LM35 Due To Self-heating (Thermal Resistance, θ_{JA})

	TO-46, no heat sink	TO-46*, small heat fin	TO-92, no heat sink	TO-92**, small heat fin	SO-8 no heat sink	SO-8** small heat fin	TO-220 no heat sink
Still air	400°C/W	100°C/W	180°C/W	140°C/W	220°C/W	110°C/W	90°C/W
Moving air	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W	105°C/W	90°C/W	26°C/W
Still oil	100°C/W	40°C/W	90°C/W	70°C/W			
Stirred oil	50°C/W	30°C/W	45°C/W	40°C/W			
(Clamped to metal, Infinite heat sink)		(24°C/W)				(55°C/W)	

*Wakefield type 201, or 1" disc of 0.020" sheet brass, soldered to case, or similar.

**TO-92 and SO-8 packages glued and leads soldered to 1" square of 1/16" printed circuit board with 2 oz. foil or similar.

Typical Applications

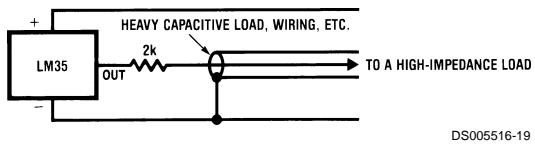


FIGURE 3. LM35 with Decoupling from Capacitive Load

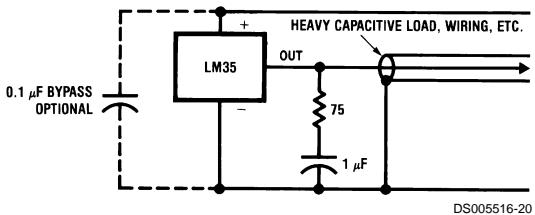


FIGURE 4. LM35 with R-C Damper

CAPACITIVE LOADS

Like most micropower circuits, the LM35 has a limited ability to drive heavy capacitive loads. The LM35 by itself is able to drive 50 pF without special precautions. If heavier loads are anticipated, it is easy to isolate or decouple the load with a resistor; see *Figure 3*. Or you can improve the tolerance of capacitance with a series R-C damper from output to ground; see *Figure 4*.

When the LM35 is applied with a 200Ω load resistor as shown in *Figure 5*, *Figure 6* or *Figure 8* it is relatively immune to wiring capacitance because the capacitance forms a bypass from ground to input, not on the output. However, as with any linear circuit connected to wires in a hostile environment, its performance can be affected adversely by intense electromagnetic sources such as relays, radio transmitters, motors with arcing brushes, SCR transients, etc, as its wiring can act as a receiving antenna and its internal junctions can act as rectifiers. For best results in such cases, a bypass capacitor from V_{IN} to ground and a series R-C damper such as 75Ω in series with 0.2 or 1 μF from output to ground are often useful. These are shown in *Figure 13*, *Figure 14*, and *Figure 16*.

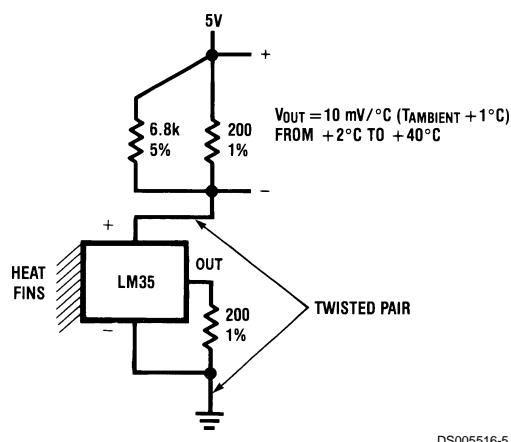


FIGURE 5. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Grounded Sensor)

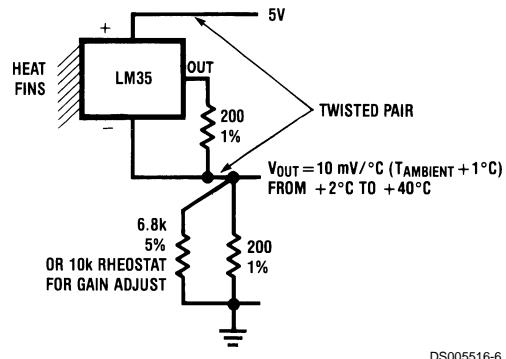


FIGURE 6. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

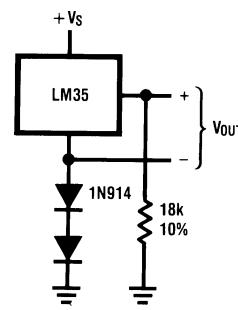


FIGURE 7. Temperature Sensor, Single Supply, -55° to $+150^{\circ}$ C

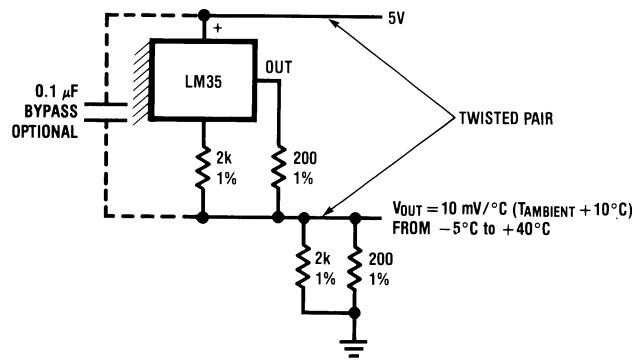


FIGURE 8. Two-Wire Remote Temperature Sensor (Output Referred to Ground)

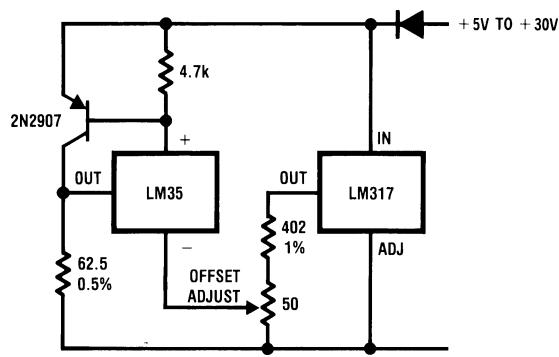


FIGURE 9. 4-To-20 mA Current Source (0° C to $+100^{\circ}$ C)

Typical Applications (Continued)

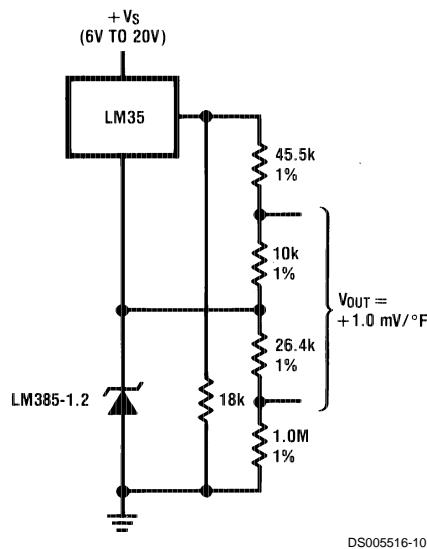


FIGURE 10. Fahrenheit Thermometer

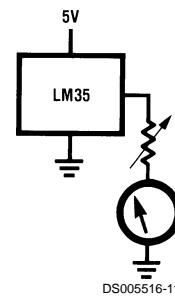
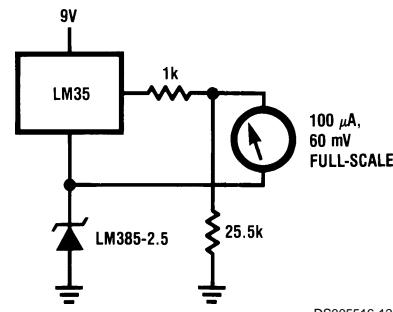
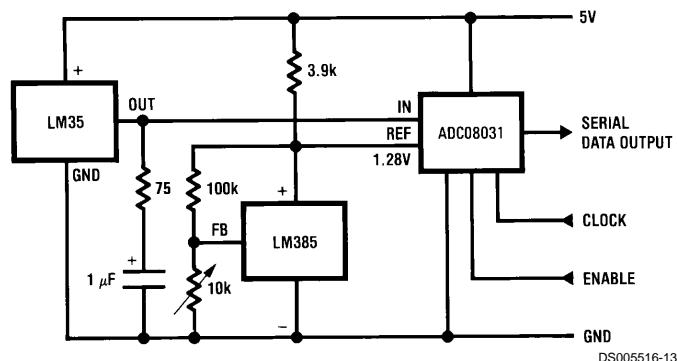
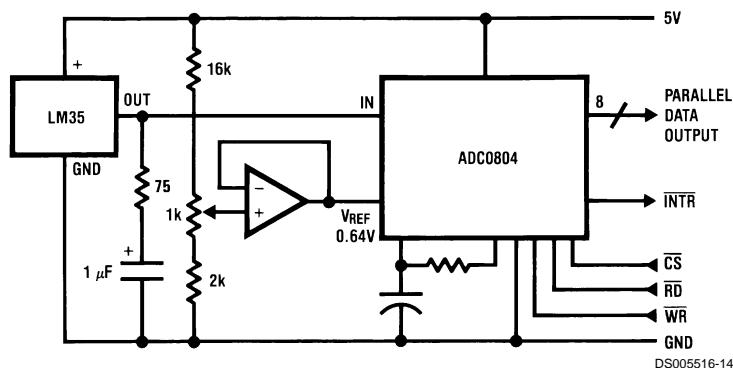
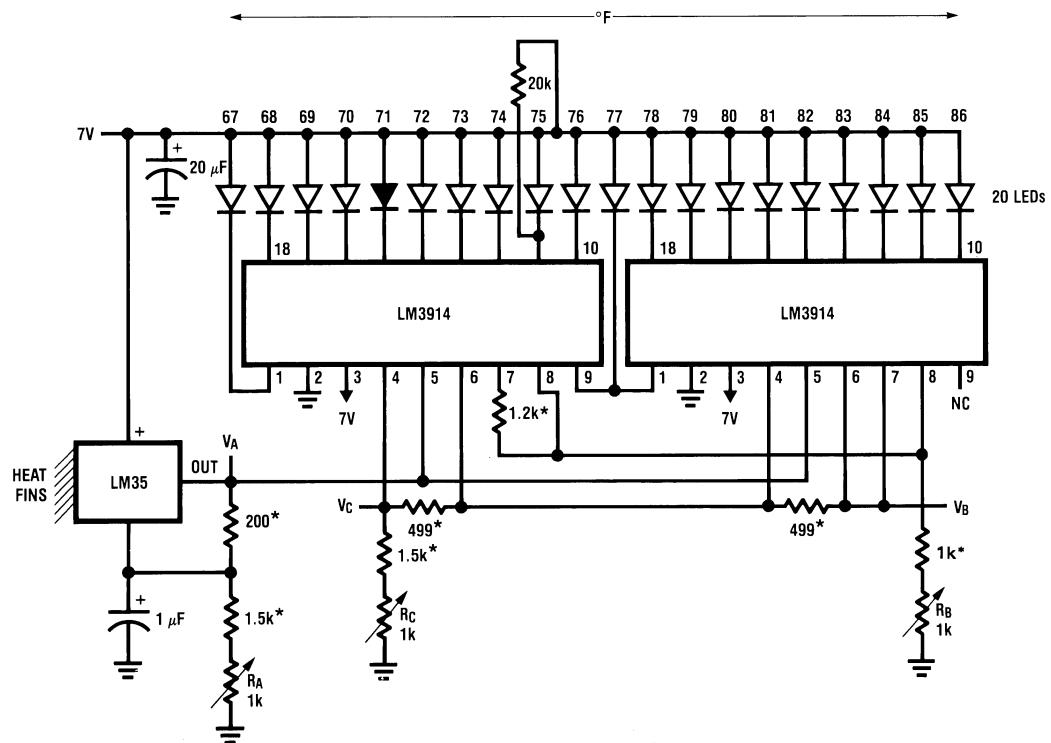


FIGURE 11. Centigrade Thermometer (Analog Meter)

FIGURE 12. Fahrenheit Thermometer Expanded Scale Thermometer
(50° to 80° Fahrenheit, for Example Shown)FIGURE 13. Temperature To Digital Converter (Serial Output) ($+128^{\circ}\text{C}$ Full Scale)FIGURE 14. Temperature To Digital Converter (Parallel TRI-STATE™ Outputs for Standard Data Bus to μP Interface) (128°C Full Scale)

Typical Applications (Continued)

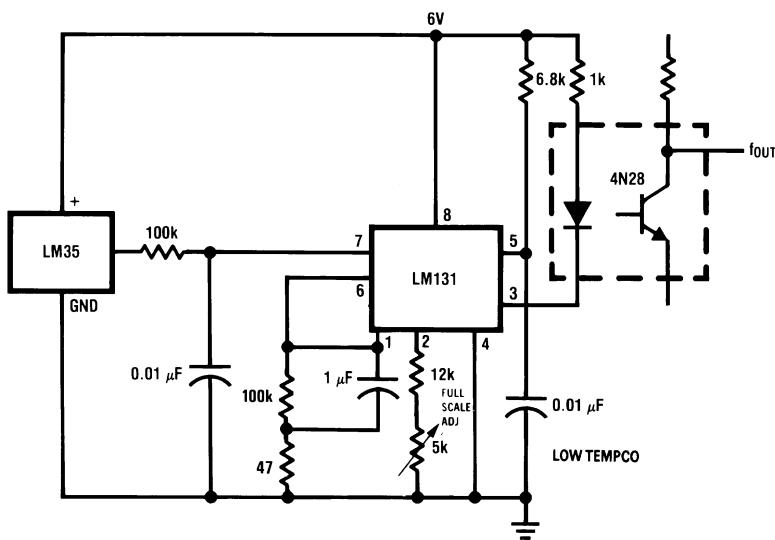


DS005516-16

*=1% or 2% film resistor

Trim R_B for $V_B=3.075V$ Trim R_C for $V_C=1.955V$ Trim R_A for $V_A=0.075V + 100mV/C \times T_{ambient}$ Example, $V_A=2.275V$ at $22^\circ C$

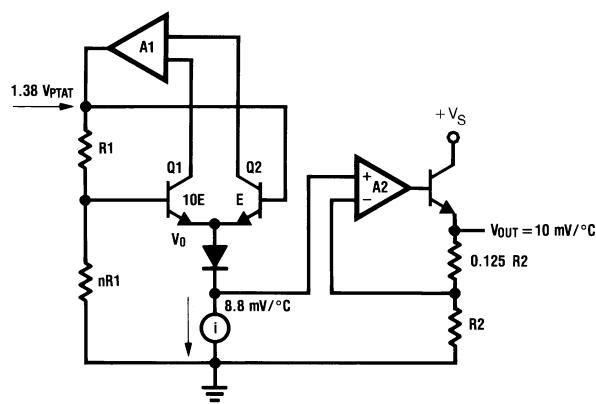
FIGURE 15. Bar-Graph Temperature Display (Dot Mode)



DS005516-15

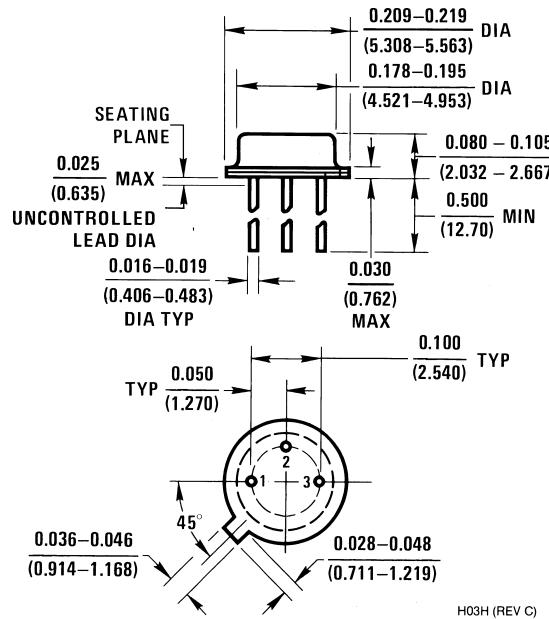
FIGURE 16. LM35 With Voltage-To-Frequency Converter And Isolated Output
($2^\circ C$ to $+150^\circ C$; 20 Hz to 1500 Hz)

Block Diagram

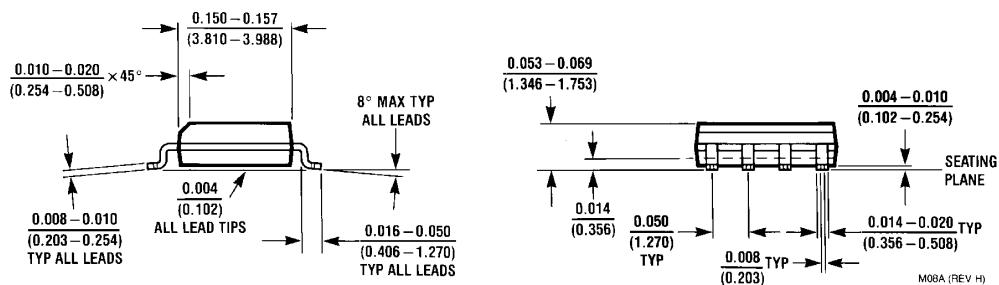
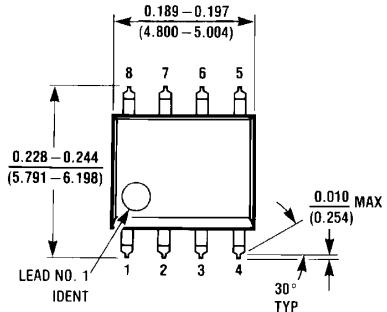


DS005516-23

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted

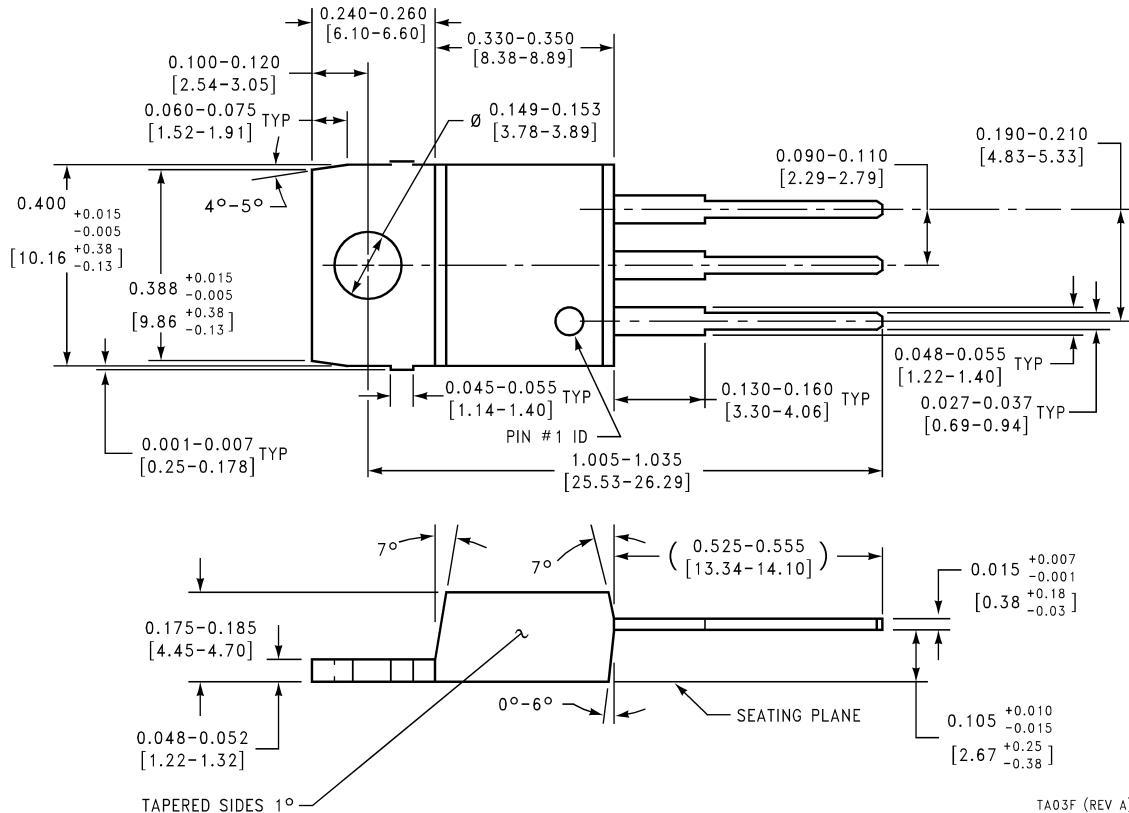


TO-46 Metal Can Package (H)
Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH,
LM35CAH, or LM35DH
NS Package Number H03H



**SO-8 Molded Small Outline Package (M)
Order Number LM35DM
NS Package Number M08A**

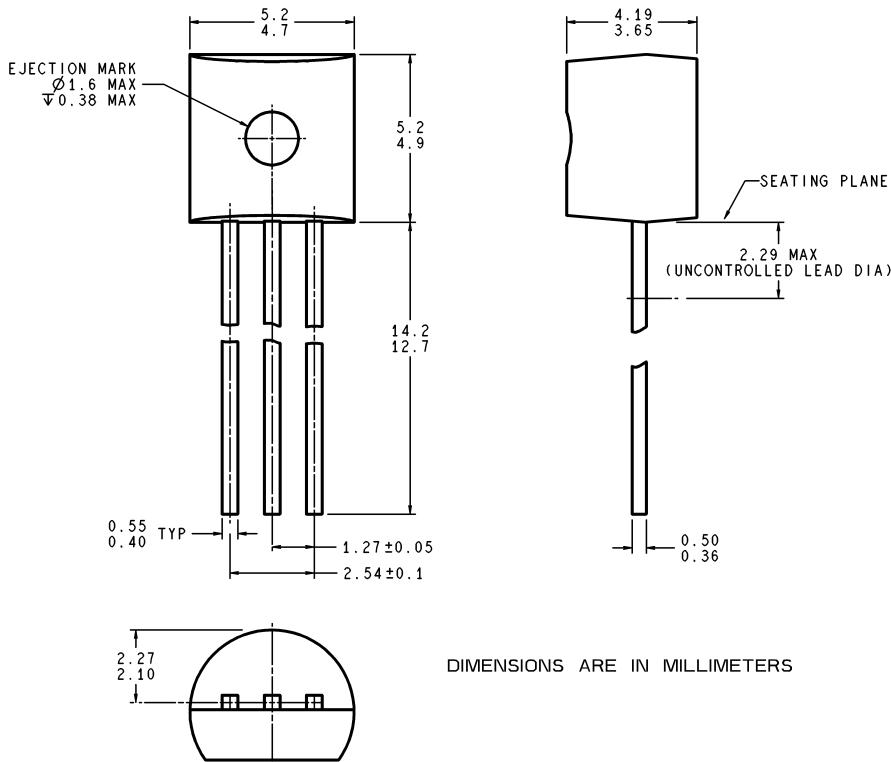
Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



**Power Package TO-220 (T)
Order Number LM35DT
NS Package Number TA03F**

Physical Dimensions

inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Z03A (Rev. G)

TO-92 Plastic Package (Z)
Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
NS Package Number Z03A

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
 Americas
 Tel: 1-800-272-9959
 Fax: 1-800-737-7018
 Email: support@nsc.com
 www.national.com

National Semiconductor Europe
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86
 Email: europe.support@nsc.com
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group
 Tel: 65-2544466
 Fax: 65-2504466
 Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-3-5639-7560
 Fax: 81-3-5639-7507



www.dalsemi.com

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer

FEATURES

- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line. Power supply range is 3.0V to 5.5V
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- $\pm 0.5^\circ\text{C}$ accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

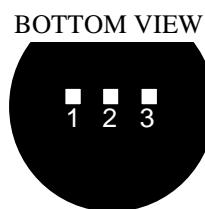
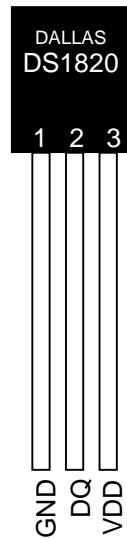
DESCRIPTION

The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

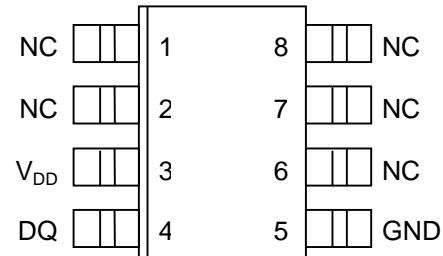
Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.

PIN ASSIGNMENT



DS18B20 To-92
Package



DS18B20Z
8-Pin SOIC (150 mil)

PIN DESCRIPTION

GND	- Ground
DQ	- Data In/Out
V _{DD}	- Power Supply Voltage
NC	- No Connect

DETAILED PIN DESCRIPTION Table 1

PIN 8PIN SOIC	PIN TO92	SYMBOL	DESCRIPTION
5	1	GND	Ground.
4	2	DQ	Data Input/Output pin. For 1-Wire operation: Open drain. (See “Parasite Power” section.)
3	3	V _{DD}	Optional V_{DD} pin. See “Parasite Power” section for details of connection. V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.

DS18B20Z (8-pin SOIC): All pins not specified in this table are not to be connected.

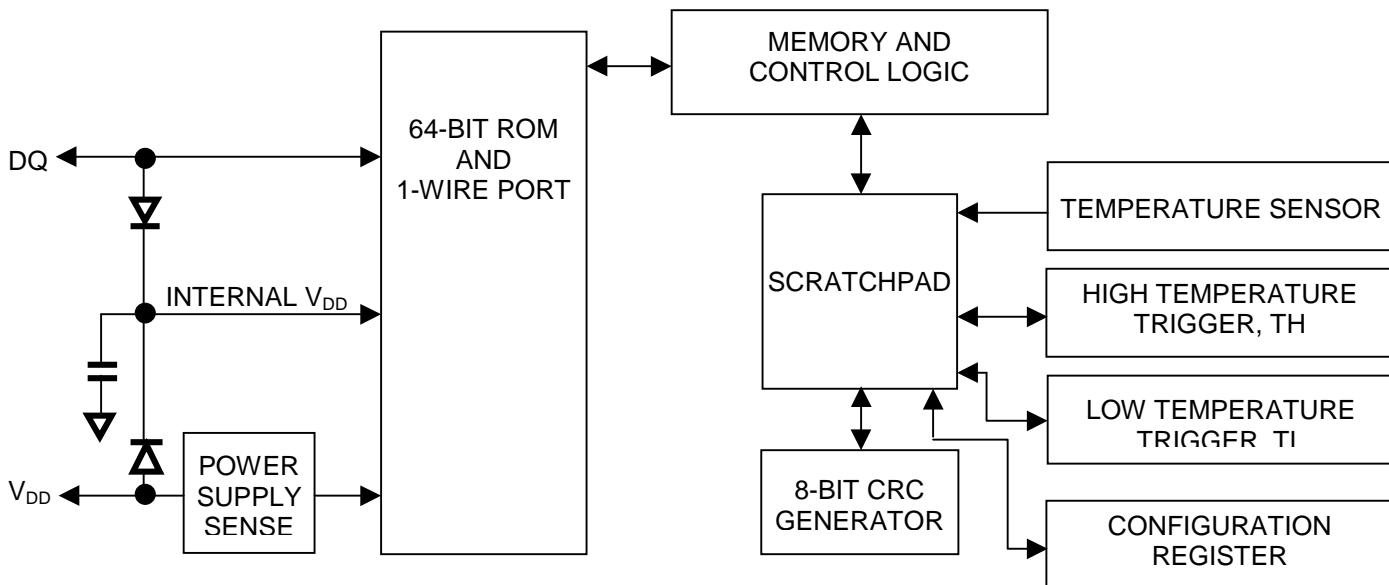
OVERVIEW

The block diagram of Figure 1 shows the major components of the DS18B20. The DS18B20 has four main data components: 1) 64-bit lasered ROM, 2) temperature sensor, 3) nonvolatile temperature alarm triggers TH and TL, and 4) a configuration register. The device derives its power from the 1-Wire communication line by storing energy on an internal capacitor during periods of time when the signal line is high and continues to operate off this power source during the low times of the 1-Wire line until it returns high to replenish the parasite (capacitor) supply. As an alternative, the DS18B20 may also be powered from an external 3 volt - 5.5 volt supply.

Communication to the DS18B20 is via a 1-Wire port. With the 1-Wire port, the memory and control functions will not be available before the ROM function protocol has been established. The master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. These commands operate on the 64-bit lasered ROM portion of each device and can single out a specific device if many are present on the 1-Wire line as well as indicate to the bus master how many and what types of devices are present. After a ROM function sequence has been successfully executed, the memory and control functions are accessible and the master may then provide any one of the six memory and control function commands.

One control function command instructs the DS18B20 to perform a temperature measurement. The result of this measurement will be placed in the DS18B20’s scratch-pad memory, and may be read by issuing a memory function command which reads the contents of the scratchpad memory. The temperature alarm triggers TH and TL consist of 1 byte EEPROM each. If the alarm search command is not applied to the DS18B20, these registers may be used as general purpose user memory. The scratchpad also contains a configuration byte to set the desired resolution of the temperature to digital conversion. Writing TH, TL, and the configuration byte is done using a memory function command. Read access to these registers is through the scratchpad. All data is read and written least significant bit first.

DS18B20 BLOCK DIAGRAM Figure 1



PARASITE POWER

The block diagram (Figure 1) shows the parasite-powered circuitry. This circuitry “steals” power whenever the DQ or V_{DD} pins are high. DQ will provide sufficient power as long as the specified timing and voltage requirements are met (see the section titled “1-Wire Bus System”). The advantages of parasite power are twofold: 1) by parasiting off this pin, no local power source is needed for remote sensing of temperature, and 2) the ROM may be read in absence of normal power.

In order for the DS18B20 to be able to perform accurate temperature conversions, sufficient power must be provided over the DQ line when a temperature conversion is taking place. Since the operating current of the DS18B20 is up to 1.5 mA, the DQ line will not have sufficient drive due to the 5k pullup resistor. This problem is particularly acute if several DS18B20s are on the same DQ and attempting to convert simultaneously.

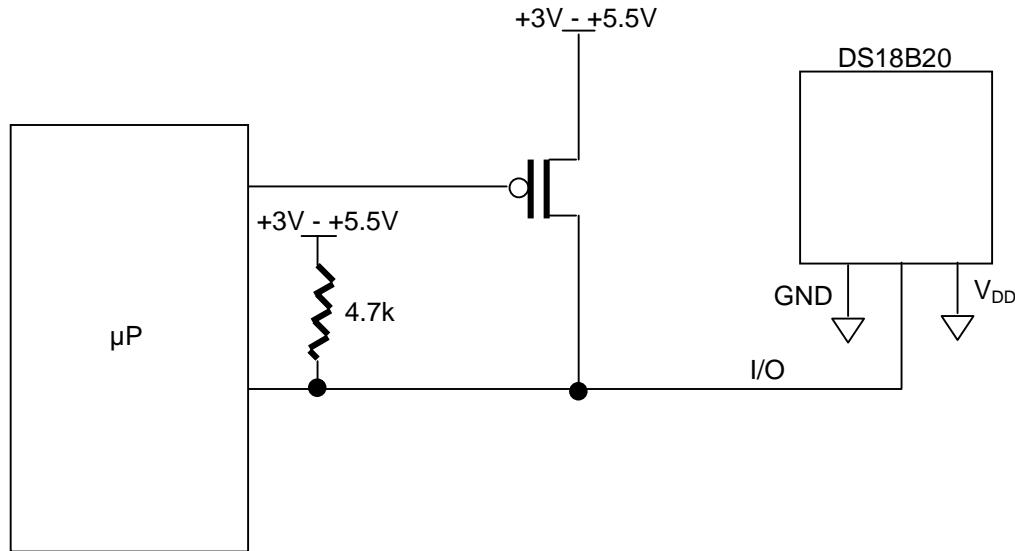
There are two ways to assure that the DS18B20 has sufficient supply current during its active conversion cycle. The first is to provide a strong pullup on the DQ line whenever temperature conversions or copies to the E² memory are taking place. This may be accomplished by using a MOSFET to pull the DQ line directly to the power supply as shown in Figure 2. The DQ line must be switched over to the strong pullup within 10 μ s maximum after issuing any protocol that involves copying to the E² memory or initiates temperature conversions. When using the parasite power mode, the V_{DD} pin must be tied to ground.

Another method of supplying current to the DS18B20 is through the use of an external power supply tied to the V_{DD} pin, as shown in Figure 3. The advantage to this is that the strong pullup is not required on the DQ line, and the bus master need not be tied up holding that line high during temperature conversions. This allows other data traffic on the 1-Wire bus during the conversion time. In addition, any number of DS18B20s may be placed on the 1-Wire bus, and if they all use external power, they may all simultaneously perform temperature conversions by issuing the Skip ROM command and then issuing the Convert T command. Note that as long as the external power supply is active, the GND pin may not be floating.

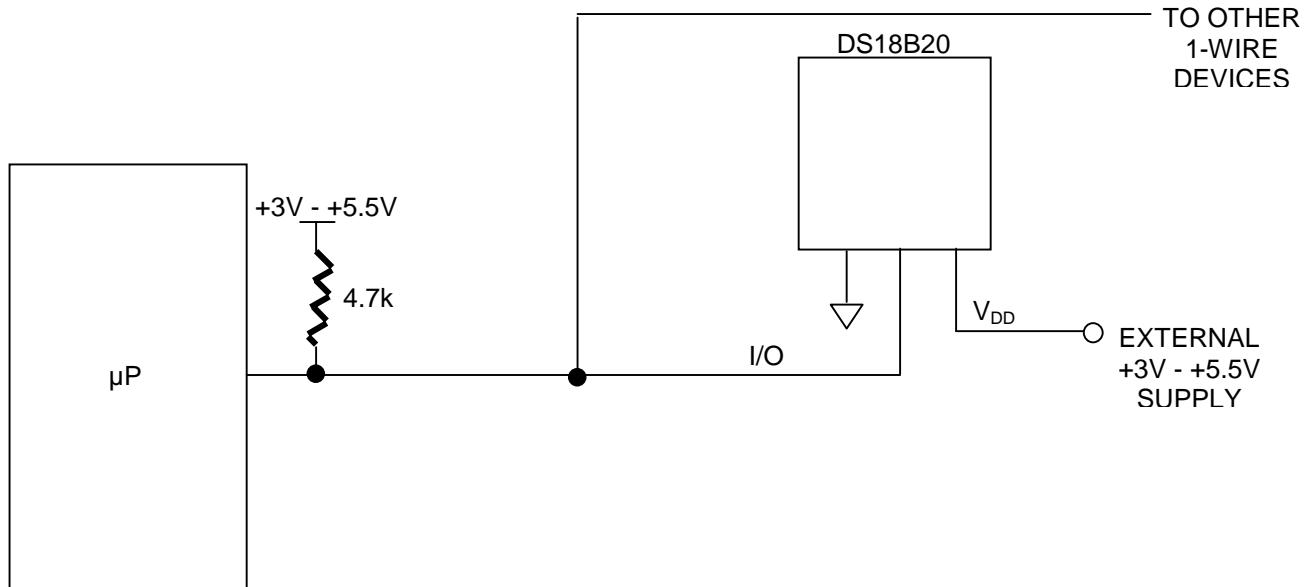
The use of parasite power is not recommended above 100°C, since it may not be able to sustain communications given the higher leakage currents the DS18B20 exhibits at these temperatures. For applications in which such temperatures are likely, it is strongly recommended that V_{DD} be applied to the DS18B20.

For situations where the bus master does not know whether the DS18B20s on the bus are parasite powered or supplied with external V_{DD} , a provision is made in the DS18B20 to signal the power supply scheme used. The bus master can determine if any DS18B20s are on the bus which require the strong pullup by sending a Skip ROM protocol, then issuing the read power supply command. After this command is issued, the master then issues read time slots. The DS18B20 will send back "0" on the 1-Wire bus if it is parasite powered; it will send back a "1" if it is powered from the V_{DD} pin. If the master receives a "0," it knows that it must supply the strong pullup on the DQ line during temperature conversions. See "Memory Command Functions" section for more detail on this command protocol.

STRONG PULLUP FOR SUPPLYING DS18B20 DURING TEMPERATURE CONVERSION Figure 2



USING V_{DD} TO SUPPLY TEMPERATURE CONVERSION CURRENT Figure 3

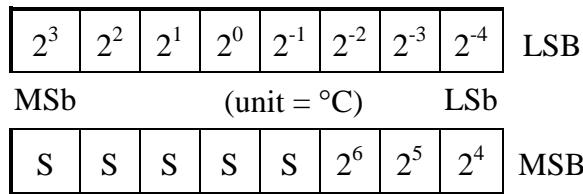


OPERATION - MEASURING TEMPERATURE

The core functionality of the DS18B20 is its direct-to-digital temperature sensor. The resolution of the DS18B20 is configurable (9, 10, 11, or 12 bits), with 12-bit readings the factory default state. This equates to a temperature resolution of 0.5°C, 0.25°C, 0.125°C, or 0.0625°C. Following the issuance of the Convert T [44h] command, a temperature conversion is performed and the thermal data is stored in the scratchpad memory in a 16-bit, sign-extended two's complement format. The temperature information can be retrieved over the 1-Wire interface by issuing a Read Scratchpad [BEh] command once the conversion has been performed. The data is transferred over the 1-Wire bus, LSB first. The MSB of the temperature register contains the “sign” (S) bit, denoting whether the temperature is positive or negative.

Table 2 describes the exact relationship of output data to measured temperature. The table assumes 12-bit resolution. If the DS18B20 is configured for a lower resolution, insignificant bits will contain zeros. For Fahrenheit usage, a lookup table or conversion routine must be used.

Temperature/Data Relationships Table 2



TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85°C	0000 0101 0101 0000	0550h*
+25.0625°C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125°C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5°C	0000 0000 0000 1000	0008h
0°C	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10.125°C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625°C	1111 1110 0110 1111	FF6Fh
-55°C	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power on reset register value is +85°C.

OPERATION - ALARM SIGNALING

After the DS18B20 has performed a temperature conversion, the temperature value is compared to the trigger values stored in TH and TL. Since these registers are 8-bit only, bits 9-12 are ignored for comparison. The most significant bit of TH or TL directly corresponds to the sign bit of the 16-bit temperature register. If the result of a temperature measurement is higher than TH or lower than TL, an alarm flag inside the device is set. This flag is updated with every temperature measurement. As long as the alarm flag is set, the DS18B20 will respond to the alarm search command. This allows many DS18B20s to be connected in parallel doing simultaneous temperature measurements. If somewhere the temperature exceeds the limits, the alarming device(s) can be identified and read immediately without having to read non-alarming devices.

64-BIT LASERED ROM

Each DS18B20 contains a unique ROM code that is 64-bits long. The first 8 bits are a 1-Wire family code (DS18B20 code is 28h). The next 48 bits are a unique serial number. The last 8 bits are a CRC of the first 56 bits. (See Figure 4.) The 64-bit ROM and ROM Function Control section allow the DS18B20 to operate as a 1-Wire device and follow the 1-Wire protocol detailed in the section “1-Wire Bus System.” The functions required to control sections of the DS18B20 are not accessible until the ROM function protocol has been satisfied. This protocol is described in the ROM function protocol flowchart (Figure 5). The 1-Wire bus master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. After a ROM function sequence has been successfully executed, the functions specific to the DS18B20 are accessible and the bus master may then provide one of the six memory and control function commands.

CRC GENERATION

The DS18B20 has an 8-bit CRC stored in the most significant byte of the 64-bit ROM. The bus master can compute a CRC value from the first 56-bits of the 64-bit ROM and compare it to the value stored within the DS18B20 to determine if the ROM data has been received error-free by the bus master. The equivalent polynomial function of this CRC is:

$$\text{CRC} = X^8 + X^5 + X^4 + 1$$

The DS18B20 also generates an 8-bit CRC value using the same polynomial function shown above and provides this value to the bus master to validate the transfer of data bytes. In each case where a CRC is used for data transfer validation, the bus master must calculate a CRC value using the polynomial function given above and compare the calculated value to either the 8-bit CRC value stored in the 64-bit ROM portion of the DS18B20 (for ROM reads) or the 8-bit CRC value computed within the DS18B20 (which is read as a ninth byte when the scratchpad is read). The comparison of CRC values and decision to continue with an operation are determined entirely by the bus master. There is no circuitry inside the DS18B20 that prevents a command sequence from proceeding if the CRC stored in or calculated by the DS18B20 does not match the value generated by the bus master.

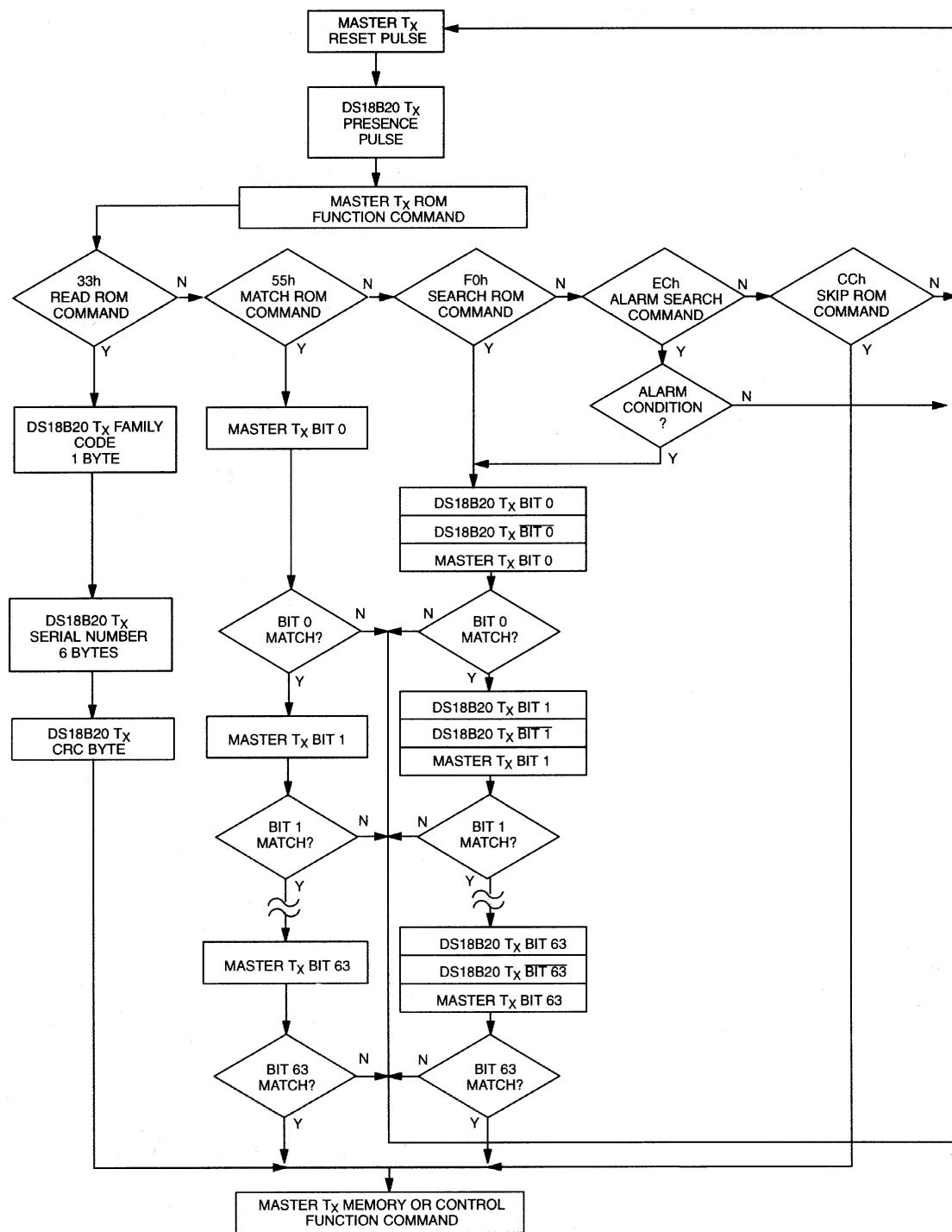
The 1-Wire CRC can be generated using a polynomial generator consisting of a shift register and XOR gates as shown in Figure 6. Additional information about the Dallas 1-Wire Cyclic Redundancy Check is available in Application Note 27 entitled “Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Dallas Semiconductor Touch Memory Products.”

The shift register bits are initialized to 0. Then starting with the least significant bit of the family code, 1 bit at a time is shifted in. After the 8th bit of the family code has been entered, then the serial number is entered. After the 48th bit of the serial number has been entered, the shift register contains the CRC value. Shifting in the 8 bits of CRC should return the shift register to all 0s.

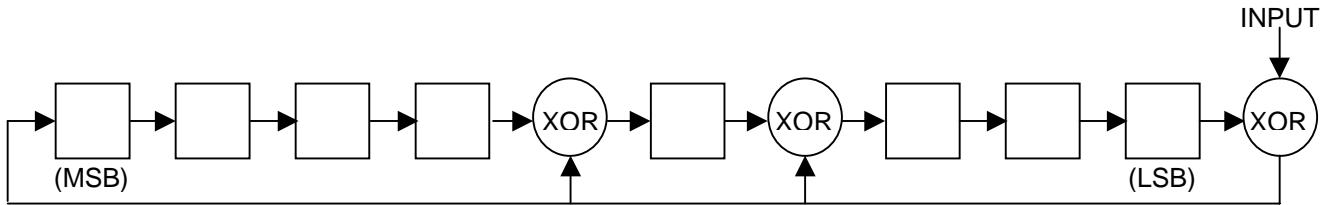
64-BIT LASERED ROM Figure 4

8-BIT CRC CODE	48-BIT SERIAL NUMBER		8-BIT FAMILY CODE (28h)		
MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB

ROM FUNCTIONS FLOW CHART Figure 5



1-WIRE CRC CODE Figure 6



MEMORY

The DS18B20's memory is organized as shown in Figure 8. The memory consists of a scratchpad RAM and a nonvolatile, electrically erasable (E^2) RAM, which stores the high and low temperature triggers TH and TL, and the configuration register. The scratchpad helps insure data integrity when communicating over the 1-Wire bus. Data is first written to the scratchpad using the Write Scratchpad [4Eh] command. It can then be verified by using the Read Scratchpad [BEh] command. After the data has been verified, a Copy Scratchpad [48h] command will transfer the data to the nonvolatile (E^2) RAM. This process insures data integrity when modifying memory. The DS18B20 EEPROM is rated for a minimum of 50,000 writes and 10 years data retention at $T = +55^\circ\text{C}$.

The scratchpad is organized as eight bytes of memory. The first 2 bytes contain the LSB and the MSB of the measured temperature information, respectively. The third and fourth bytes are volatile copies of TH and TL and are refreshed with every power-on reset. The fifth byte is a volatile copy of the configuration register and is refreshed with every power-on reset. The configuration register will be explained in more detail later in this section of the datasheet. The sixth, seventh, and eighth bytes are used for internal computations, and thus will not read out any predictable pattern.

It is imperative that one writes TH, TL, and config in succession; i.e. a write is not valid if one writes only to TH and TL, for example, and then issues a reset. If any of these bytes must be written, all three must be written before a reset is issued.

There is a ninth byte which may be read with a Read Scratchpad [BEh] command. This byte contains a cyclic redundancy check (CRC) byte which is the CRC over all of the eight previous bytes. This CRC is implemented in the fashion described in the section titled "CRC Generation".

Configuration Register

The fifth byte of the scratchpad memory is the configuration register.

It contains information which will be used by the device to determine the resolution of the temperature to digital conversion. The bits are organized as shown in Figure 7.

DS18B20 CONFIGURATION REGISTER Figure 7

0	R1	R0	1	1	1	1	1
MSb				LSb			

Bits 0-4 are don't cares on a write but will always read out "1".

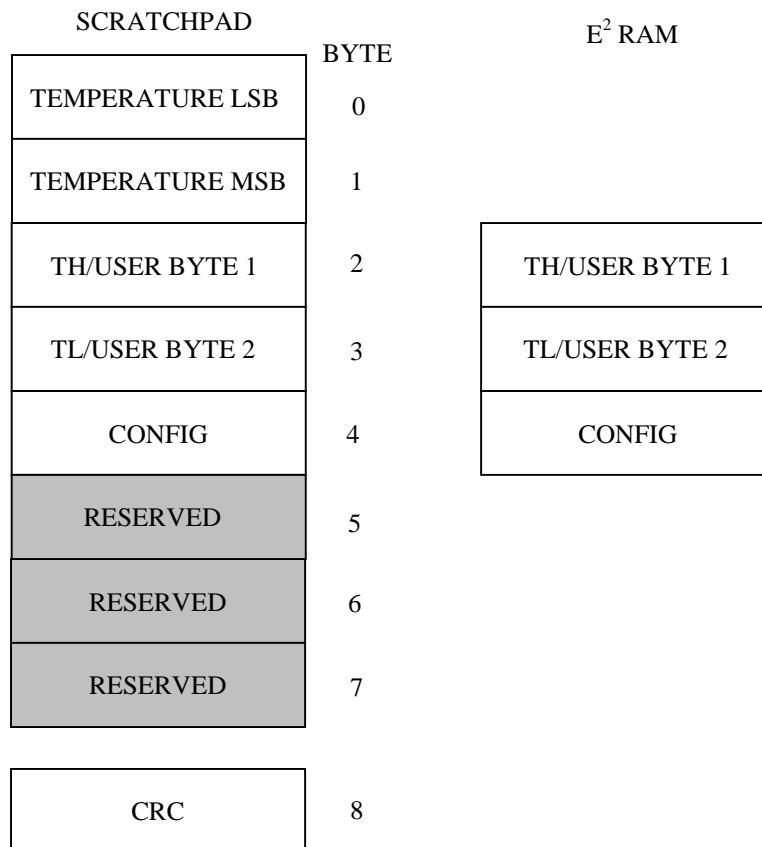
Bit 7 is a don't care on a write but will always read out "0".

R0, R1: Thermometer resolution bits. Table 3 below defines the resolution of the digital thermometer, based on the settings of these 2 bits. There is a direct tradeoff between resolution and conversion time, as depicted in the AC Electrical Characteristics. The factory default of these EEPROM bits is R0=1 and R1=1 (12-bit conversions).

Thermometer Resolution Configuration Table 3

R1	R0	Thermometer Resolution	Max Conversion Time
0	0	9 bit	93.75 ms ($t_{conv}/8$)
0	1	10 bit	187.5 ms ($t_{conv}/4$)
1	0	11 bit	375 ms ($t_{conv}/2$)
1	1	12 bit	750 ms (t_{conv})

DS18B20 MEMORY MAP Figure 8



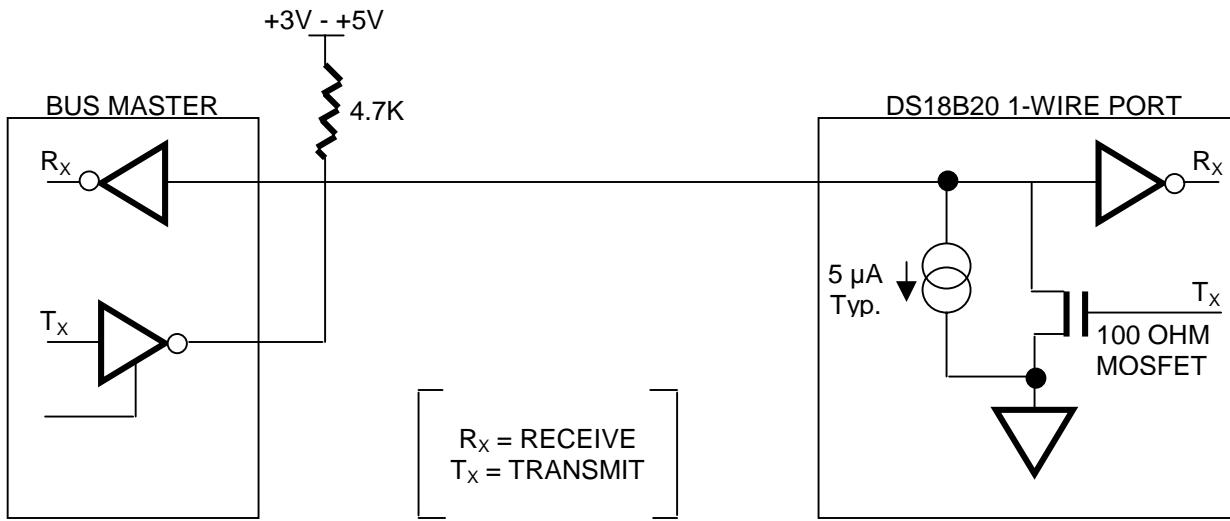
1-WIRE BUS SYSTEM

The 1-Wire bus is a system which has a single bus master and one or more slaves. The DS18B20 behaves as a slave. The discussion of this bus system is broken down into three topics: hardware configuration, transaction sequence, and 1-Wire signaling (signal types and timing).

HARDWARE CONFIGURATION

The 1-Wire bus has only a single line by definition; it is important that each device on the bus be able to drive it at the appropriate time. To facilitate this, each device attached to the 1-Wire bus must have open drain or 3-state outputs. The 1-Wire port of the DS18B20 (DQ pin) is open drain with an internal circuit equivalent to that shown in Figure 9. A multidrop bus consists of a 1-Wire bus with multiple slaves attached. The 1-Wire bus requires a pullup resistor of approximately $5\text{ k}\Omega$.

HARDWARE CONFIGURATION Figure 9



The idle state for the 1-Wire bus is high. If for any reason a transaction needs to be suspended, the bus **MUST** be left in the idle state if the transaction is to resume. Infinite recovery time can occur between bits so long as the 1-Wire bus is in the inactive (high) state during the recovery period. If this does not occur and the bus is left low for more than $480\text{ }\mu\text{s}$, all components on the bus will be reset.

TRANSACTION SEQUENCE

The protocol for accessing the DS18B20 via the 1-Wire port is as follows:

- Initialization
- ROM Function Command
- Memory Function Command
- Transaction/Data

INITIALIZATION

All transactions on the 1-Wire bus begin with an initialization sequence. The initialization sequence consists of a reset pulse transmitted by the bus master followed by presence pulse(s) transmitted by the slave(s).

The presence pulse lets the bus master know that the DS18B20 is on the bus and is ready to operate. For more details, see the “1-Wire Signaling” section.

ROM FUNCTION COMMANDS

Once the bus master has detected a presence, it can issue one of the five ROM function commands. All ROM function commands are 8 bits long. A list of these commands follows (refer to flowchart in Figure 5):

Read ROM [33h]

This command allows the bus master to read the DS18B20’s 8-bit family code, unique 48-bit serial number, and 8-bit CRC. This command can only be used if there is a single DS18B20 on the bus. If more than one slave is present on the bus, a data collision will occur when all slaves try to transmit at the same time (open drain will produce a wired AND result).

Match ROM [55h]

The match ROM command, followed by a 64-bit ROM sequence, allows the bus master to address a specific DS18B20 on a multidrop bus. Only the DS18B20 that exactly matches the 64-bit ROM sequence will respond to the following memory function command. All slaves that do not match the 64-bit ROM sequence will wait for a reset pulse. This command can be used with a single or multiple devices on the bus.

Skip ROM [CCh]

This command can save time in a single drop bus system by allowing the bus master to access the memory functions without providing the 64-bit ROM code. If more than one slave is present on the bus and a Read command is issued following the Skip ROM command, data collision will occur on the bus as multiple slaves transmit simultaneously (open drain pulldowns will produce a wired AND result).

Search ROM [F0h]

When a system is initially brought up, the bus master might not know the number of devices on the 1-Wire bus or their 64-bit ROM codes. The search ROM command allows the bus master to use a process of elimination to identify the 64-bit ROM codes of all slave devices on the bus.

Alarm Search [ECh]

The flowchart of this command is identical to the Search ROM command. However, the DS18B20 will respond to this command only if an alarm condition has been encountered at the last temperature measurement. An alarm condition is defined as a temperature higher than TH or lower than TL. The alarm condition remains set as long as the DS18B20 is powered up, or until another temperature measurement reveals a non-alarming value. For alarming, the trigger values stored in EEPROM are taken into account. If an alarm condition exists and the TH or TL settings are changed, another temperature conversion should be done to validate any alarm conditions.

Example of a ROM Search

The ROM search process is the repetition of a simple three-step routine: read a bit, read the complement of the bit, then write the desired value of that bit. The bus master performs this simple, three-step routine on each bit of the ROM. After one complete pass, the bus master knows the contents of the ROM in one device. The remaining number of devices and their ROM codes may be identified by additional passes.

The following example of the ROM search process assumes four different devices are connected to the same 1-Wire bus. The ROM data of the four devices is as shown:

ROM1	00110101...
ROM2	10101010...
ROM3	11110101...
ROM4	00010001...

The search process is as follows:

1. The bus master begins the initialization sequence by issuing a reset pulse. The slave devices respond by issuing simultaneous presence pulses.
2. The bus master will then issue the Search ROM command on the 1-Wire bus.
3. The bus master reads a bit from the 1-Wire bus. Each device will respond by placing the value of the first bit of their respective ROM data onto the 1-Wire bus. ROM1 and ROM4 will place a 0 onto the 1-Wire bus, i.e., pull it low. ROM2 and ROM3 will place a 1 onto the 1-Wire bus by allowing the line to stay high. The result is the logical AND of all devices on the line, therefore the bus master sees a 0. The bus master reads another bit. Since the Search ROM data command is being executed, all of the devices on the 1-Wire bus respond to this second read by placing the complement of the first bit of their respective ROM data onto the 1-Wire bus. ROM1 and ROM4 will place a 1 onto the 1-Wire, allowing the line to stay high. ROM2 and ROM3 will place a 0 onto the 1-Wire, thus it will be pulled low. The bus master again observes a 0 for the complement of the first ROM data bit. The bus master has determined that there are some devices on the 1-Wire bus that have a 0 in the first position and others that have a 1.

The data obtained from the two reads of the three-step routine have the following interpretations:

- | | |
|----|--|
| 00 | There are still devices attached which have conflicting bits in this position. |
| 01 | All devices still coupled have a 0-bit in this bit position. |
| 10 | All devices still coupled have a 1-bit in this bit position. |
| 11 | There are no devices attached to the 1-Wire bus. |

4. The bus master writes a 0. This deselects ROM2 and ROM3 for the remainder of this search pass, leaving only ROM1 and ROM4 connected to the 1-Wire bus.
5. The bus master performs two more reads and receives a 0-bit followed by a 1-bit. This indicates that all devices still coupled to the bus have 0s as their second ROM data bit.
6. The bus master then writes a 0 to keep both ROM1 and ROM4 coupled.
7. The bus master executes two reads and receives two 0-bits. This indicates that both 1-bits and 0-bits exist as the 3rd bit of the ROM data of the attached devices.

-
8. The bus master writes a 0-bit. This deselects ROM1, leaving ROM4 as the only device still connected.
 9. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM4 and continues to access the part if desired. This completes the first pass and uniquely identifies one part on the 1-Wire bus.
 10. The bus master starts a new ROM search sequence by repeating steps 1 through 7.
 11. The bus master writes a 1-bit. This decouples ROM4, leaving only ROM1 still coupled.
 12. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM1 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the second ROM search pass, in which another of the ROMs was found.
 13. The bus master starts a new ROM search by repeating steps 1 through 3.
 14. The bus master writes a 1-bit. This deselects ROM1 and ROM4 for the remainder of this search pass, leaving only ROM2 and ROM3 coupled to the system.
 15. The bus master executes two Read time slots and receives two 0s.
 16. The bus master writes a 0-bit. This decouples ROM3 leaving only ROM2.
 17. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM2 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the third ROM search pass, in which another of the ROMs was found.
 18. The bus master starts a new ROM search by repeating steps 13 through 15.
 19. The bus master writes a 1-bit. This decouples ROM2, leaving only ROM3.
 20. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM3 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the fourth ROM search pass, in which another of the ROMs was found.

NOTE:

The bus master learns the unique ID number (ROM data pattern) of one 1-Wire device on each ROM Search operation. The time required to derive the part's unique ROM code is:

$$960 \mu\text{s} + (8 + 3 \times 64) 61 \mu\text{s} = 13.16 \text{ ms}$$

The bus master is therefore capable of identifying 75 different 1-Wire devices per second.

I/O SIGNALING

The DS18B20 requires strict protocols to insure data integrity. The protocol consists of several types of signaling on one line: reset pulse, presence pulse, write 0, write 1, read 0, and read 1. All of these signals, with the exception of the presence pulse, are initiated by the bus master.

The initialization sequence required to begin any communication with the DS18B20 is shown in Figure 11. A reset pulse followed by a presence pulse indicates the DS18B20 is ready to send or receive data given the correct ROM command and memory function command.

The bus master transmits (TX) a reset pulse (a low signal for a minimum of 480 μ s). The bus master then releases the line and goes into a receive mode (RX). The 1-Wire bus is pulled to a high state via the 5k pullup resistor. After detecting the rising edge on the DQ pin, the DS18B20 waits 15-60 μ s and then transmits the presence pulse (a low signal for 60-240 μ s).

MEMORY COMMAND FUNCTIONS

The following command protocols are summarized in Table 4, and by the flowchart of Figure 10.

Write Scratchpad [4Eh]

This command writes to the scratchpad of the DS18B20, starting at the TH register. The next 3 bytes written will be saved in scratchpad memory at address locations 2 through 4. All 3 bytes must be written before a reset is issued.

Read Scratchpad [BEh]

This command reads the contents of the scratchpad. Reading will commence at byte 0 and will continue through the scratchpad until the ninth (byte 8, CRC) byte is read. If not all locations are to be read, the master may issue a reset to terminate reading at any time.

Copy Scratchpad [48h]

This command copies the scratchpad into the E² memory of the DS18B20, storing the temperature trigger bytes in nonvolatile memory. If the bus master issues read time slots following this command, the DS18B20 will output 0 on the bus as long as it is busy copying the scratchpad to E²; it will return a 1 when the copy process is complete. If parasite-powered, the bus master has to enable a strong pullup for at least 10 ms immediately after issuing this command. The DS18B20 EEPROM is rated for a minimum of 50,000 writes and 10 years data retention at T=+55°C.

Convert T [44h]

This command begins a temperature conversion. No further data is required. The temperature conversion will be performed and then the DS18B20 will remain idle. If the bus master issues read time slots following this command, the DS18B20 will output 0 on the bus as long as it is busy making a temperature conversion; it will return a 1 when the temperature conversion is complete. If parasite-powered, the bus master has to enable a strong pullup for a period greater than t_{conv} immediately after issuing this command.

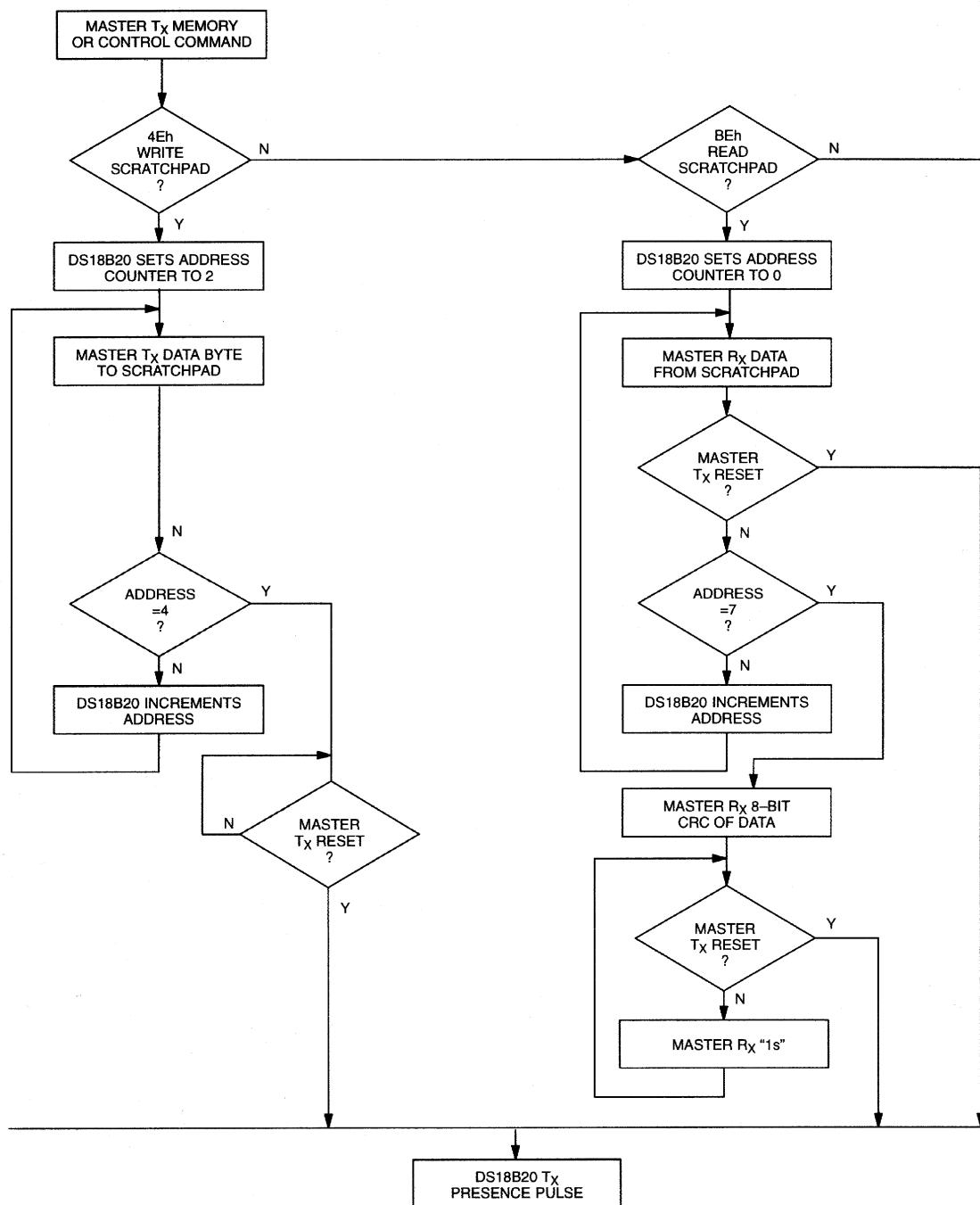
Recall E2 [B8h]

This command recalls the temperature trigger values and configuration register stored in E² to the scratchpad. This recall operation happens automatically upon power-up to the DS18B20 as well, so valid data is available in the scratchpad as soon as the device has power applied. With every read data time slot issued after this command has been sent, the device will output its temperature converter busy flag: 0=busy, 1=ready.

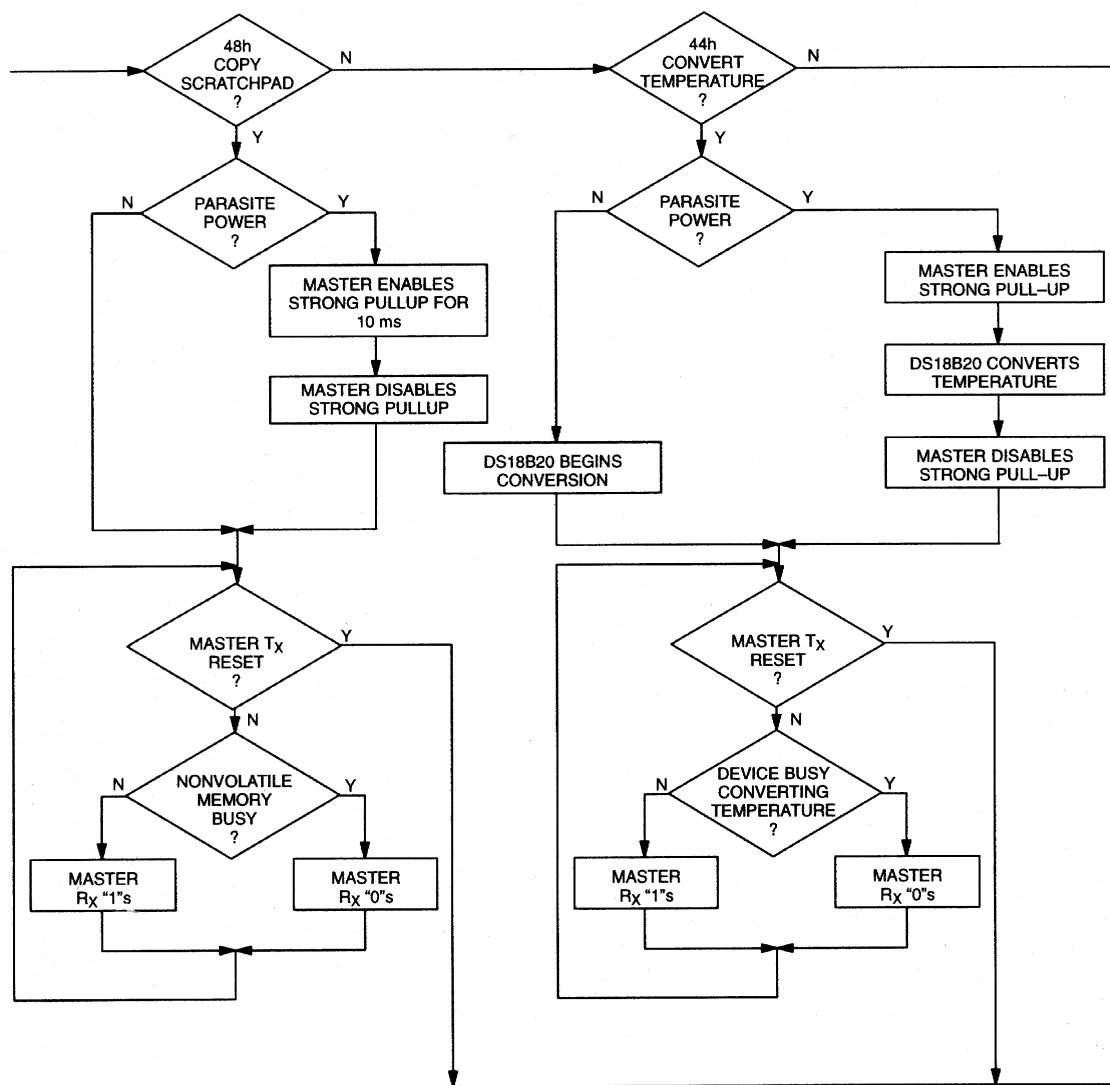
Read Power Supply [B4h]

With every read data time slot issued after this command has been sent to the DS18B20, the device will signal its power mode: 0=parasite power, 1=external power supply provided.

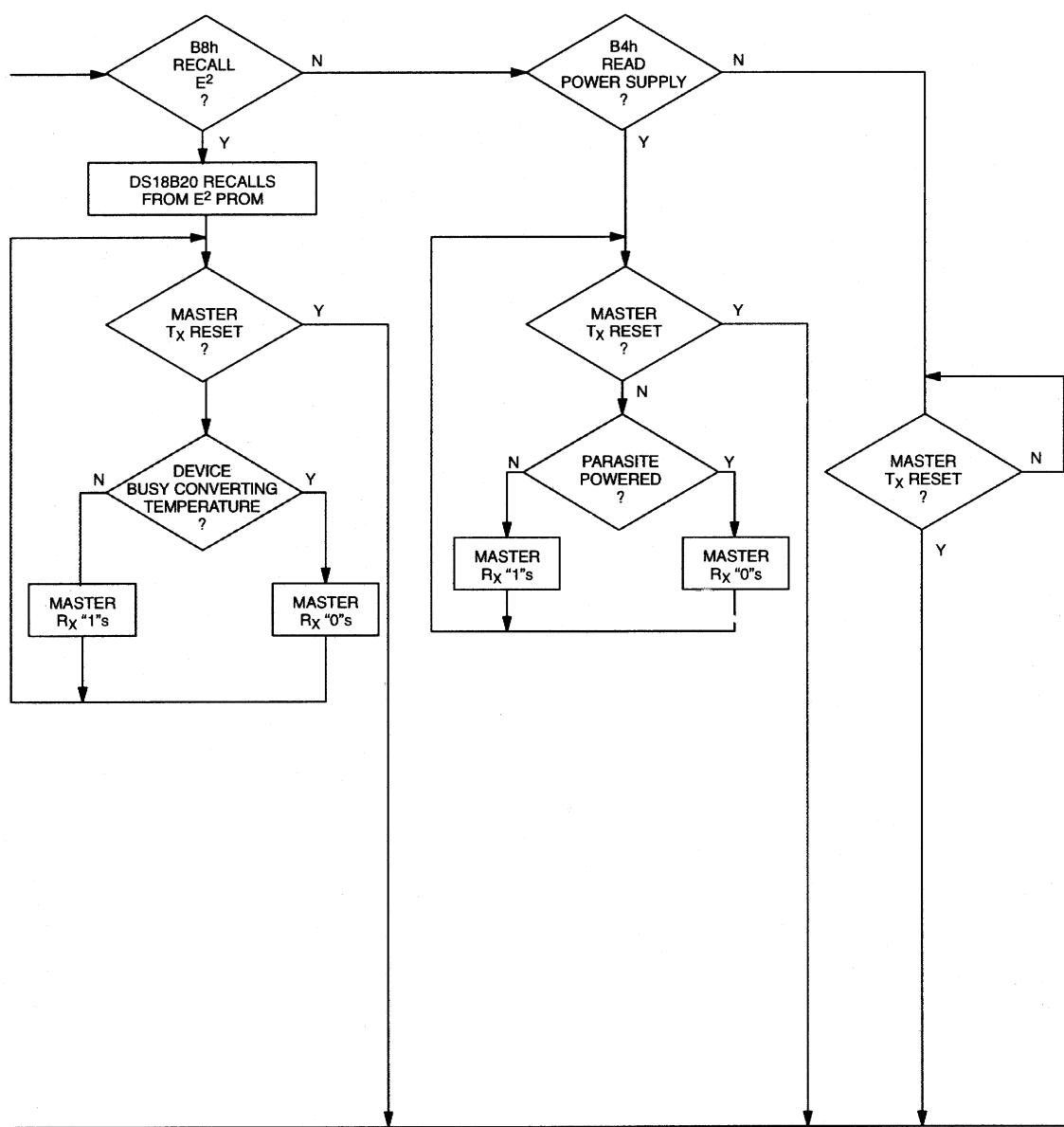
MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10



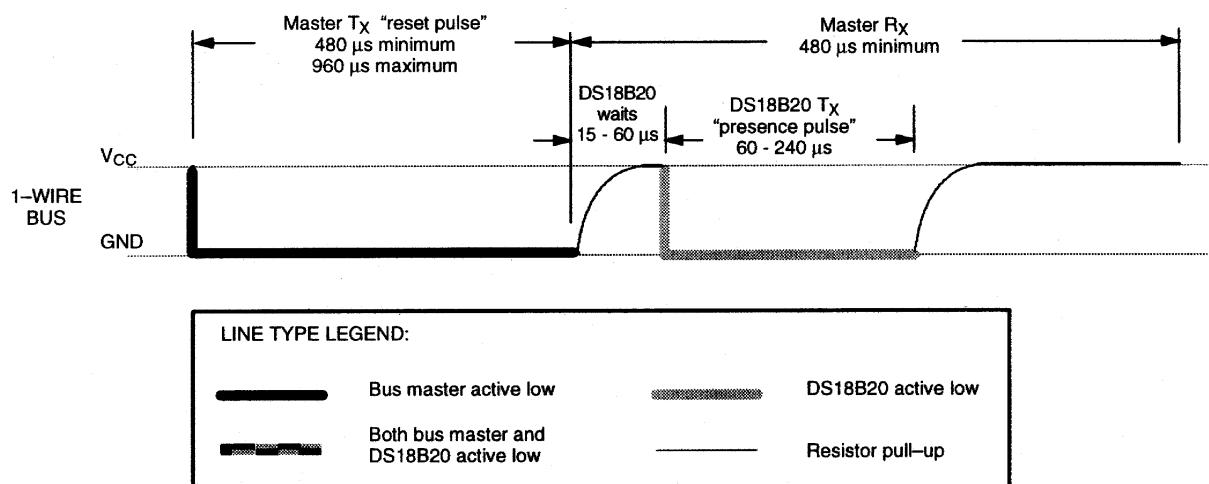
MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10 (cont'd)



MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10 (cont'd)



INITIALIZATION PROCEDURE “RESET AND PRESENCE PULSES” Figure 11



DS18B20 COMMAND SET Table 4

INSTRUCTION	DESCRIPTION	PROTOCOL	1-WIRE BUS AFTER ISSUING PROTOCOL	NOTES
TEMPERATURE CONVERSION COMMANDS				
Convert T	Initiates temperature conversion.	44h	<read temperature busy status>	1
MEMORY COMMANDS				
Read Scratchpad	Reads bytes from scratchpad and reads CRC byte.	BEh	<read data up to 9 bytes>	
Write Scratchpad	Writes bytes into scratchpad at addresses 2 through 4 (TH and TL temperature triggers and config).	4Eh	<write data into 3 bytes at addr. 2 through. 4>	3
Copy Scratchpad	Copies scratchpad into nonvolatile memory (addresses 2 through 4 only).	48h	<read copy status>	2
Recall E ²	Recalls values stored in nonvolatile memory into scratchpad (temperature triggers).	B8h	<read temperature busy status>	
Read Power Supply	Signals the mode of DS18B20 power supply to the master.	B4h	<read supply status>	

NOTES:

1. Temperature conversion takes up to 750 ms. After receiving the Convert T protocol, if the part does not receive power from the V_{DD} pin, the DQ line for the DS18B20 must be held high for at least a period greater than t_{conv} to provide power during the conversion process. As such, no other activity may take place on the 1-Wire bus for at least this period after a Convert T command has been issued.
2. After receiving the Copy Scratchpad protocol, if the part does not receive power from the V_{DD} pin, the DQ line for the DS18B20 must be held high for at least 10 ms to provide power during the copy process. As such, no other activity may take place on the 1-Wire bus for at least this period after a Copy Scratchpad command has been issued.
3. All 3 bytes must be written before a reset is issued.

READ/WRITE TIME SLOTS

DS18B20 data is read and written through the use of time slots to manipulate bits and a command word to specify the transaction.

Write Time Slots

A write time slot is initiated when the host pulls the data line from a high logic level to a low logic level. There are two types of write time slots: Write 1 time slots and Write 0 time slots. All write time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1- μ s recovery time between individual write cycles.

The DS18B20 samples the DQ line in a window of 15 μ s to 60 μ s after the DQ line falls. If the line is high, a Write 1 occurs. If the line is low, a Write 0 occurs (see Figure 12).

For the host to generate a Write 1 time slot, the data line must be pulled to a logic low level and then released, allowing the data line to pull up to a high level within 15 μ s after the start of the write time slot.

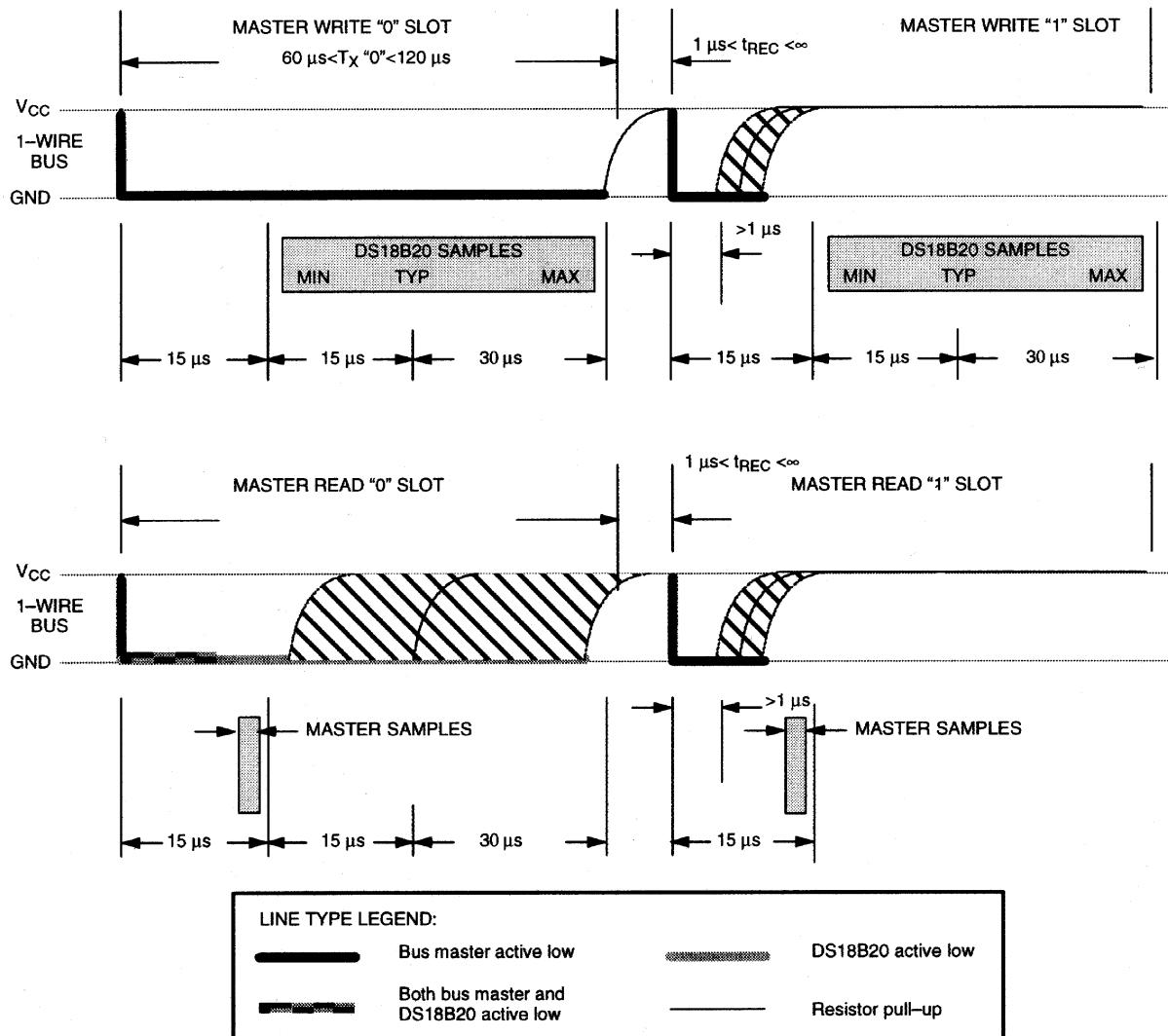
For the host to generate a Write 0 time slot, the data line must be pulled to a logic low level and remain low for 60 μ s.

Read Time Slots

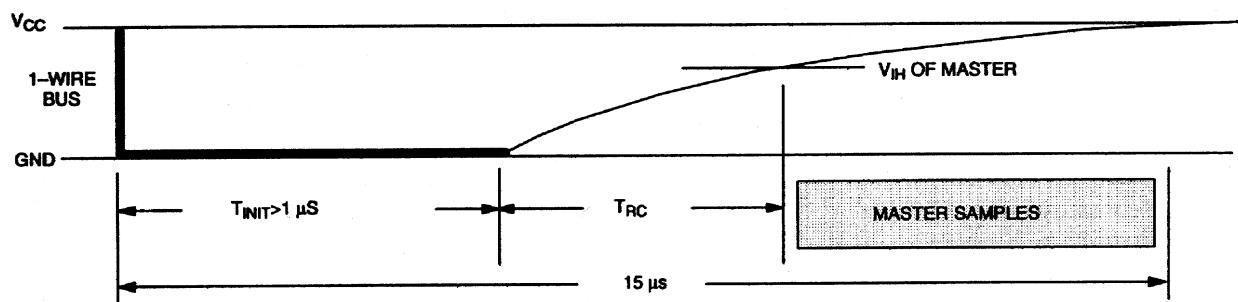
The host generates read time slots when data is to be read from the DS18B20. A read time slot is initiated when the host pulls the data line from a logic high level to logic low level. The data line must remain at a low logic level for a minimum of 1 μ s; output data from the DS18B20 is valid for 15 μ s after the falling edge of the read time slot. The host therefore must stop driving the DQ pin low in order to read its state 15 μ s from the start of the read slot (see Figure 12). By the end of the read time slot, the DQ pin will pull back high via the external pullup resistor. All read time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1- μ s recovery time between individual read slots.

Figure 12 shows that the sum of T_{INIT} , T_{RC} , and T_{SAMPLE} must be less than 15 μ s. Figure 14 shows that system timing margin is maximized by keeping T_{INIT} and T_{RC} as small as possible and by locating the master sample time towards the end of the 15- μ s period.

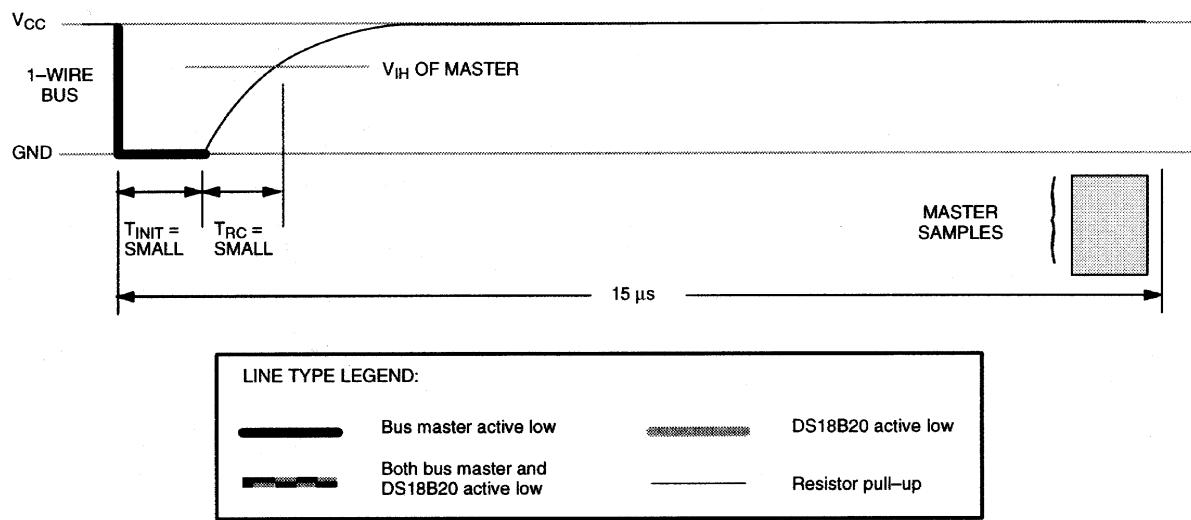
READ/WRITE TIMING DIAGRAM Figure 12



DETAILED MASTER READ 1 TIMING Figure 13



RECOMMENDED MASTER READ 1 TIMING Figure 14



Related Application Notes

The following Application Notes can be applied to the DS18B20. These notes can be obtained from the Dallas Semiconductor “Application Note Book,” via our website at <http://www.dalsemi.com/>.

Application Note 27: “Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Dallas Semiconductor Touch Memory Product”

Application Note 55: “Extending the Contact Range of Touch Memories”

Application Note 74: “Reading and Writing Touch Memories via Serial Interfaces”

Application Note 104: “Minimalist Temperature Control Demo”

Application Note 106: “Complex MicroLANs”

Application Note 108: “MicroLAN - In the Long Run”

Sample 1-Wire subroutines that can be used in conjunction with AN74 can be downloaded from the website or our Anonymous FTP Site.

MEMORY FUNCTION EXAMPLE Table 5

Example: Bus Master initiates temperature conversion, then reads temperature (parasite power assumed).

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
TX	Reset	Reset pulse (480-960 μ s).
RX	Presence	Presence pulse.
TX	55h	Issue “Match ROM” command.
TX	<64-bit ROM code>	Issue address for DS18B20.
TX	44h	Issue “Convert T” command.
TX	<I/O LINE HIGH>	I/O line is held high for at least a period of time greater than t_{conv} by bus master to allow conversion to complete.
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse.
TX	55h	Issue “Match ROM” command.
TX	<64-bit ROM code>	Issue address for DS18B20.
TX	BEh	Issue “Read Scratchpad” command.
RX	<9 data bytes>	Read entire scratchpad plus CRC; the master now recalculates the CRC of the eight data bytes received from the scratchpad, compares the CRC calculated and the CRC read. If they match, the master continues; if not, this read operation is repeated.
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse, done.

MEMORY FUNCTION EXAMPLE Table 6

Example: Bus Master writes memory (parasite power and only one DS18B20 assumed).

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse.
TX	CCh	Skip ROM command.
TX	4Eh	Write Scratchpad command.
TX	<3 data bytes>	Writes three bytes to scratchpad (TH, TL, and config).
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse.
TX	CCh	Skip ROM command.
TX	BEh	Read Scratchpad command.
RX	<9 data bytes>	Read entire scratchpad plus CRC. The master now recalculates the CRC of the eight data bytes received from the scratchpad, compares the CRC and the two other bytes read back from the scratchpad. If data match, the master continues; if not, repeat the sequence.
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse.
TX	CCh	Skip ROM command.
TX	48h	Copy Scratchpad command; after issuing this command, the master must wait 10 ms for copy operation to complete.
TX	Reset	Reset pulse.
RX	Presence	Presence pulse, done.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Voltage on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +6.0V
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Soldering Temperature	See J-STD-020A specification

* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V _{DD}	Local Power	3.0		5.5	V	1
Data Pin	DQ		-0.3		+5.5	V	1
Logic 1	V _{IH}		2.2		V _{CC} ⁺ 0.3	V	1,2
Logic 0	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	1,3,7

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Thermometer Error	t _{ERR}	-10°C to +85°C			±1/2	°C	
		-55°C to +125°C			±2		
Input Logic High	V _{IH}	Local Power	2.2		5.5	V	1,2
		Parasite Power	3.0			V	1,2
Input Logic Low	V _{IL}		-0.3		+0.8	V	1,3,7
Sink Current	I _L	V _{I/O} =0.4V	-4.0			mA	1
Standby Current	I _{DDS}			750	1000	nA	6,8
Active Current	I _{DD}			1	1.5	mA	4
DQ-Input Load Current	I _{DQ}			5		μA	5

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: NV MEMORY

(-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

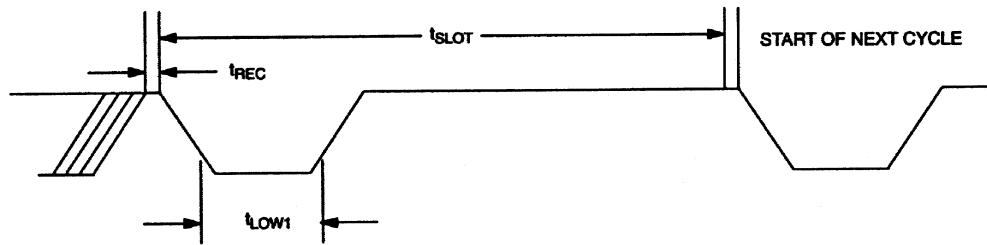
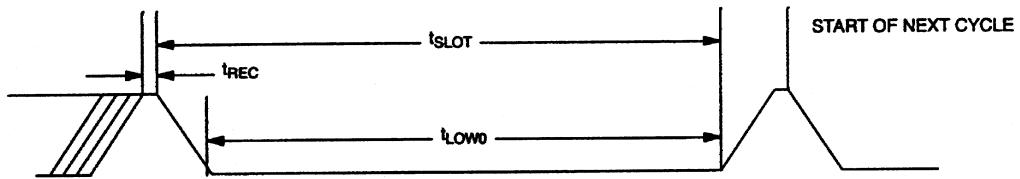
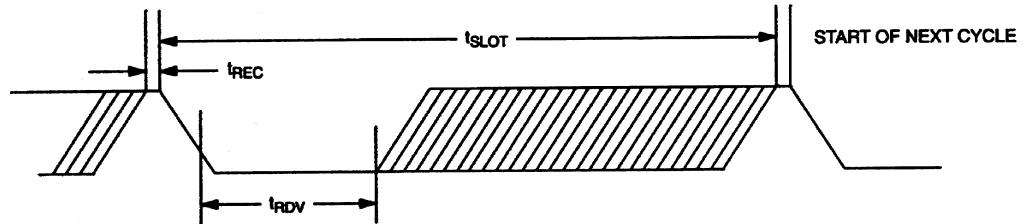
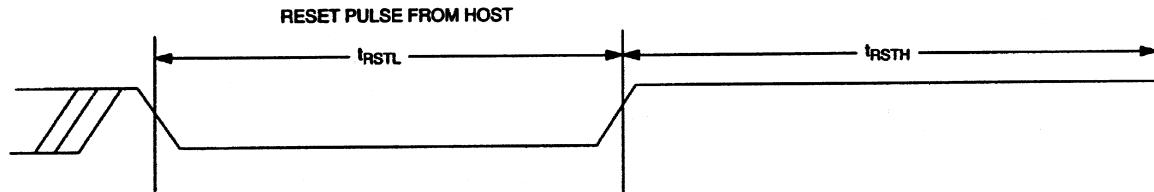
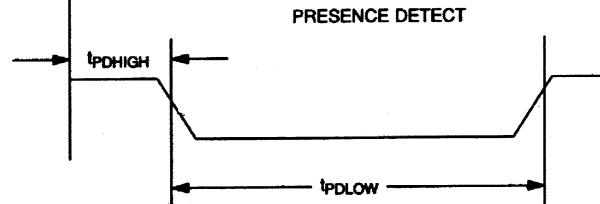
PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
NV Write Cycle Time	t _{wr}			2	10	ms	
EEPROM Writes	N _{EEWR}	-55°C to +55°C	50k			writes	
EEPROM Data Retention	t _{EEDR}	-55°C to +55°C	10			years	

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

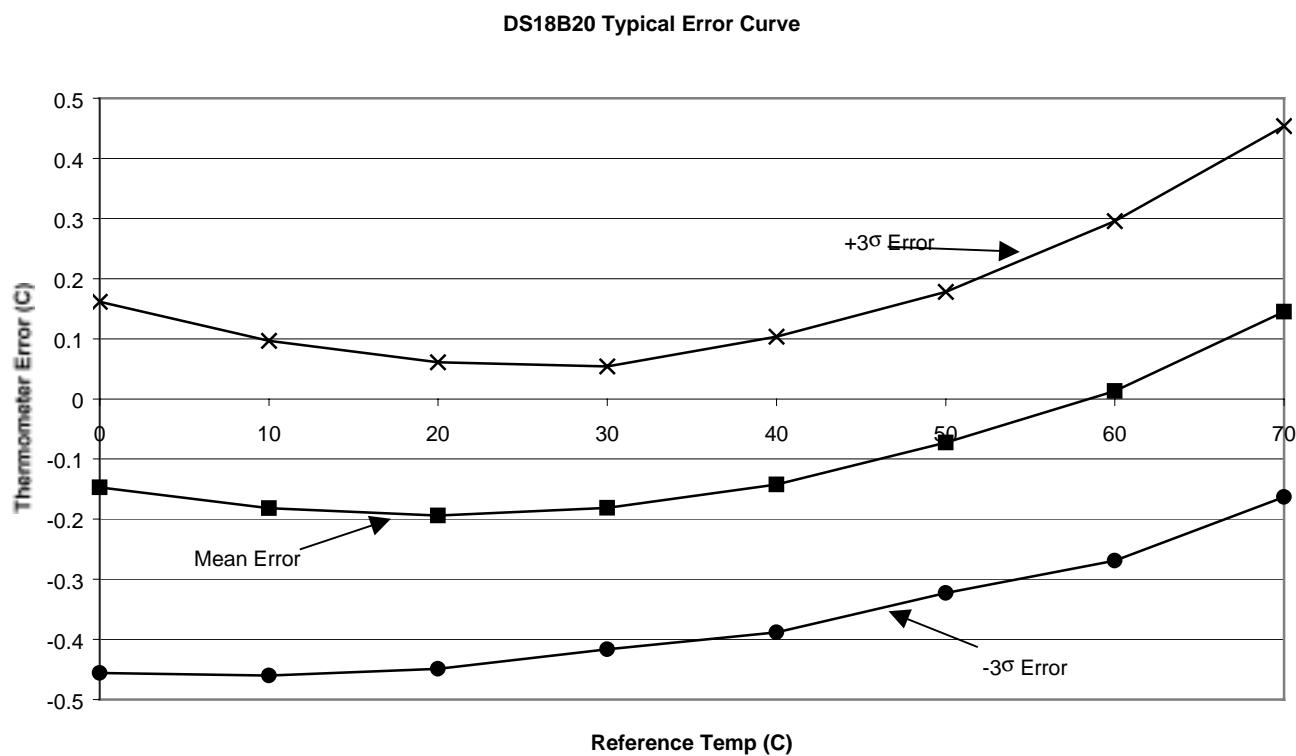
PARAMETER	SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	t _{CONV}	9 bit			93.75	ms	
		10 bit			187.5		
		11 bit			375		
		12 bit			750		
Time Slot	t _{SLOT}		60		120	μs	
Recovery Time	t _{REC}		1			μs	
Write 0 Low Time	r _{LOW0}		60		120	μs	
Write 1 Low Time	t _{LOW1}		1		15	μs	
Read Data Valid	t _{RDV}				15	μs	
Reset Time High	t _{RSTH}		480			μs	
Reset Time Low	t _{RSTL}		480			μs	9
Presence Detect High	t _{PDHIGH}		15		60	μs	
Presence Detect Low	t _{PDLOW}		60		240	μs	
Capacitance	C _{IN/OUT}				25	pF	

NOTES:

1. All voltages are referenced to ground.
2. Logic one voltages are specified at a source current of 1 mA.
3. Logic zero voltages are specified at a sink current of 4 mA.
4. Active current refers to either temperature conversion or writing to the E² memory. Writing to E² memory consumes approximately 200 μA for up to 10 ms.
5. Input load is to ground.
6. Standby current specified up to 70°C. Standby current typically is 3 μA at 125°C.
7. To always guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as much as 0.5V.
8. To minimize I_{DDS}, DQ should be: GND ≤ DQ ≤ GND +0.3V or V_{DD} – 0.3V ≤ DQ ≤ V_{DD}.
9. Under parasite power, the max t_{RSTL} before a power on reset occurs is 960 μS.

1-WIRE WRITE ONE TIME SLOT**1-WIRE WRITE ZERO TIME SLOT****1-WIRE READ ZERO TIME SLOT****1-WIRE RESET PULSE****1-WIRE PRESENCE DETECT**

TYPICAL PERFORMANCE CURVE



Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 50 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$, and 4% at -40°C to 85°C
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kV_{RMS} minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage

Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1



Description

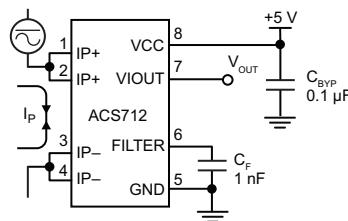
The Allegro® ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, automotive, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current, I_P , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

Description (continued)

loss. The thickness of the copper conductor allows survival of the device at up to $5\times$ overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the sensor leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 current sensor to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

Selection Guide

Part Number	Packing*	T_{OP} (°C)	Optimized Range, I_P (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	–40 to 85	±30	66

*Contact Allegro for additional packing options.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V_{CC}		8	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		–0.1	V
Output Voltage	V_{IOUT}		8	V
Reverse Output Voltage	V_{RIOUT}		–0.1	V
Output Current Source	$I_{IOUT(Source)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(Sink)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I_P	100 total pulses, 250 ms duration each, applied at a rate of 1 pulse every 100 seconds.	60	A
Maximum Transient Sensed Current	$I_R(max)$	Junction Temperature, $T_J < T_J(max)$	60	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	–40 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		165	°C
Storage Temperature	T_{stg}		–65 to 170	°C

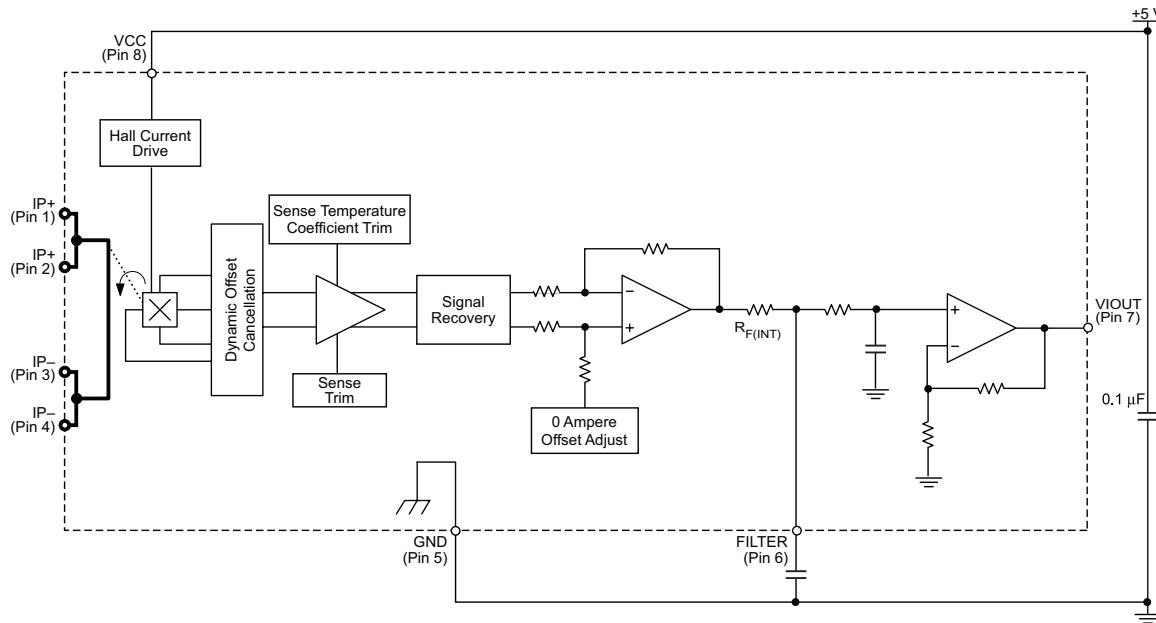


TÜV America
Certificate Number:
U8V 06 05 54214 010

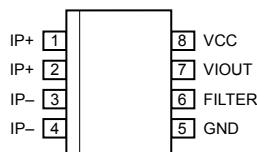
Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001



Functional Block Diagram



Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sensed; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sensed; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

ACS712

Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS¹ over full range of T_{OP} , $C_F = 1 \text{ nF}$, and $V_{CC} = 5 \text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 5.0 \text{ V}$, output open	6	8	11	mA
Output Zener Clamp Voltage	V_Z	$I_{CC} = 11 \text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	6	8.3	—	V
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{OUT} = 1.2 \text{ mA}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	—	1	2	Ω
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	V_{OUT} to GND	—	—	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	V_{OUT} to GND	4.7	—	—	$\text{k}\Omega$
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	—	1.2	—	$\text{m}\Omega$
RMS Isolation Voltage	V_{ISORMS}	Pins 1-4 and 5-8; 60 Hz, 1 minute, $T_A = 25^\circ\text{C}$	2100	—	—	V
DC Isolation Voltage	V_{ISODC}	Pins 1-4 and 5-8; 1 minute, $T_A = 25^\circ\text{C}$	—	5000	—	V
Propagation Time	t_{PROP}	$I_P = I_{P(\text{max})}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	—	3	—	μs
Response Time	$t_{RESPONSE}$	$I_P = I_{P(\text{max})}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	—	7	—	μs
Rise Time	t_r	$I_P = I_{P(\text{max})}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	—	5	—	μs
Frequency Bandwidth	f	-3 dB , $T_A = 25^\circ\text{C}$; I_P is 10 A peak-to-peak	50	—	—	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	—	± 1	± 1.5	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_P = 0 \text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	—	$V_{CC} \times 0.5$	—	V
Magnetic Offset Error	V_{ERROM}	$I_P = 0 \text{ A}$, after excursion of 5 A	—	0	—	mV
Clamping Voltage	V_{CH}		Typ. -110	$V_{CC} \times 0.9375$	Typ. +110	mV
	V_{CL}		Typ. -110	$V_{CC} \times 0.0625$	Typ. +110	mV
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on leadframe	—	35	—	μs
Magnetic Coupling ²			—	12	—	G/A
Internal Filter Resistance ³	$R_{F(INT)}$			1.7		$\text{k}\Omega$

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient, T_A , and internal leadframe temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

²1G = 0.1 mT.

³ $R_{F(INT)}$ forms an RC circuit via the FILTER pin.

COMMON THERMAL CHARACTERISTICS¹

Operating Internal Leadframe Temperature	T_{OP}	E range	Min.	Typ.	Max.	Units
			-40	—	85	°C
Junction-to-Lead Thermal Resistance ²	$R_{\theta JL}$	Mounted on the Allegro ASEK 712 evaluation board	5	—	—	°C/W
Junction-to-Ambient Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Mounted on the Allegro 85-0322 evaluation board, includes the power consumed by the board	23	—	—	°C/W

¹Additional thermal information is available on the Allegro website.

²The Allegro evaluation board has 1500 mm² of 2 oz. copper on each side, connected to pins 1 and 2, and to pins 3 and 4, with thermal vias connecting the layers. Performance values include the power consumed by the PCB. Further details on the board are available from the Frequently Asked Questions document on our website. Further information about board design and thermal performance also can be found in the Applications Information section of this datasheet.

x05A PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_{OP} = -40^\circ\text{C}$ to 85°C ¹, $C_F = 1 \text{ nF}$, and $V_{CC} = 5 \text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-5	-	5	A
Sensitivity ²	Sens_{TA}	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	185	-	mV/A
	Sens_{TOP}	Over full range of I_P	178	-	193	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 4.7 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 20 kHz bandwidth	-	45	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	20	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 1 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 50 kHz bandwidth	-	75	-	mV
Electrical Offset Voltage	V_{OE}	$I_P = 0 \text{ A}$	-40	-	40	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 5 \text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

²At -40°C Sensitivity may shift as much 9% outside of the datasheet limits.

³Percentage of I_P , with $I_P = 5 \text{ A}$. Output filtered.

x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_{OP} = -40^\circ\text{C}$ to 85°C ¹, $C_F = 1 \text{ nF}$, and $V_{CC} = 5 \text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-20	-	20	A
Sensitivity ²	Sens_{TA}	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	100	-	mV/A
	Sens_{TOP}	Over full range of I_P	97	-	103	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 4.7 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 20 kHz bandwidth	-	24	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	10	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 1 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 50 kHz bandwidth	-	40	-	mV
Electrical Offset Voltage	V_{OE}	$I_P = 0 \text{ A}$	-30	-	30	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 20 \text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

²At -40°C Sensitivity may shift as much 9% outside of the datasheet limits.

³Percentage of I_P , with $I_P = 20 \text{ A}$. Output filtered.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS $T_{OP} = -40^\circ\text{C}$ to 85°C ¹, $C_F = 1 \text{ nF}$, and $V_{CC} = 5 \text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-30	-	30	A
Sensitivity ²	Sens_{TA}	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	66	-	mV/A
	Sens_{TOP}	Over full range of I_P	64	-	68	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 4.7 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 20 kHz bandwidth	-	20	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
		Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 1 \text{ nF}$, $C_{OUT} = \text{open}$, 50 kHz bandwidth	-	35	-	mV
Electrical Offset Voltage	V_{OE}	$I_P = 0 \text{ A}$	-30	-	30	mV
Total Output Error ³	E_{TOT}	$I_P = \pm 30 \text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_{OP} , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_J(\text{max})$, is not exceeded.

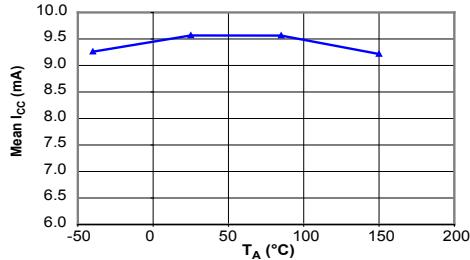
²At -40°C Sensitivity may shift as much 9% outside of the datasheet limits.

³Percentage of I_P , with $I_P = 30 \text{ A}$. Output filtered.

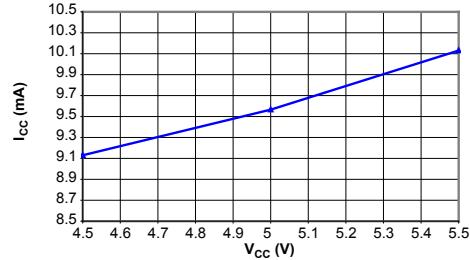
Characteristic Performance

$I_P = 5 \text{ A}$, Sens = 185 mV/A unless otherwise specified

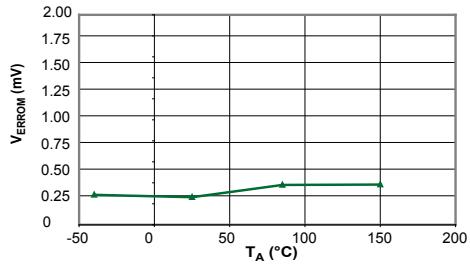
Mean Supply Current versus Ambient Temperature
 $V_{CC} = 5 \text{ V}$



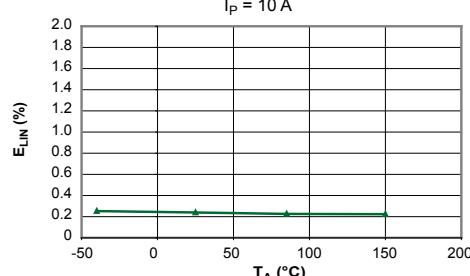
Supply Current versus Supply Voltage



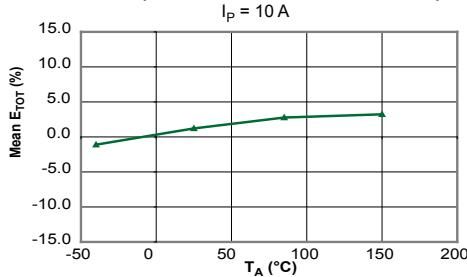
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



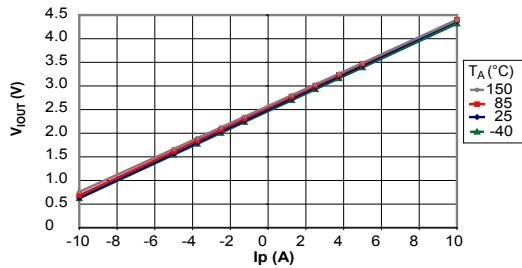
Nonlinearity versus Ambient Temperature



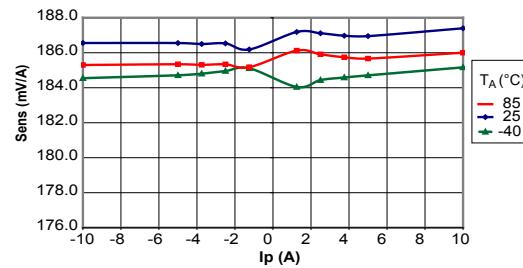
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



Output Voltage versus Sensed Current



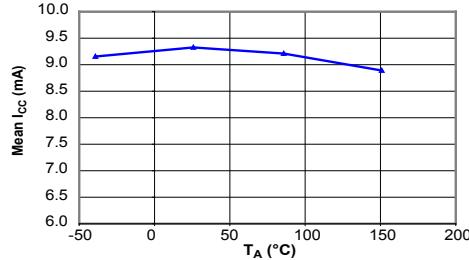
Sensitivity versus Sensed Current



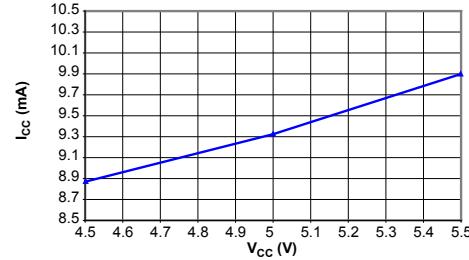
Characteristic Performance

$I_P = 30$ A, Sens = 66 mV/A unless otherwise specified

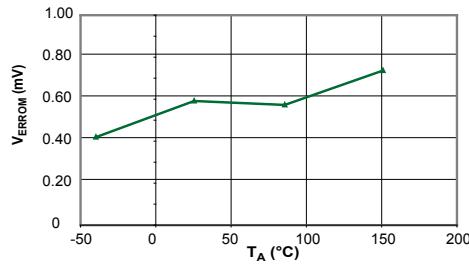
Mean Supply Current versus Ambient Temperature
 $V_{CC} = 5$ V



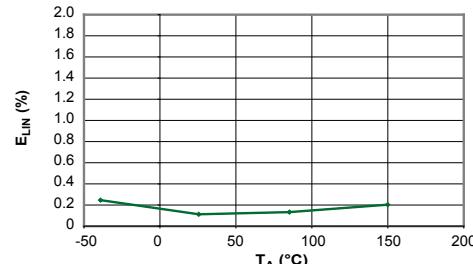
Supply Current versus Supply Voltage



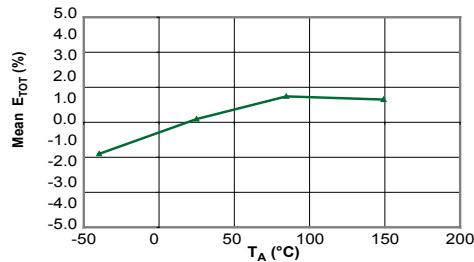
Magnetic Offset Current versus Ambient Temperature



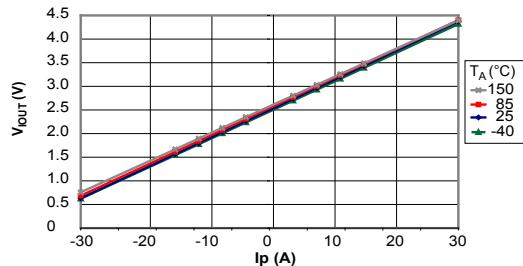
Nonlinearity versus Ambient Temperature



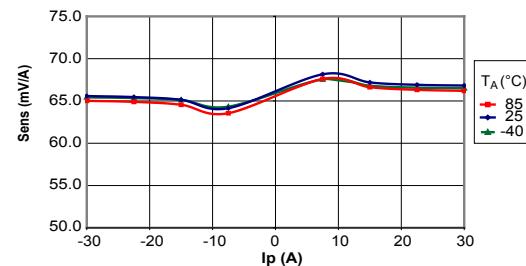
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



Output Voltage versus Sensed Current



Sensitivity versus Sensed Current



Definitions of Accuracy Characteristics

Sensitivity (Sens). The change in sensor output in response to a 1A change through the primary conductor. The sensitivity is the product of the magnetic circuit sensitivity (G/A) and the linear IC amplifier gain (mV/G). The linear IC amplifier gain is programmed at the factory to optimize the sensitivity (mV/A) for the full-scale current of the device.

Noise (V_{NOISE}). The product of the linear IC amplifier gain (mV/G) and the noise floor for the Allegro Hall effect linear IC (≈ 1 G). The noise floor is derived from the thermal and shot noise observed in Hall elements. Dividing the noise (mV) by the sensitivity (mV/A) provides the smallest current that the device is able to resolve.

Linearity (E_{LIN}). The degree to which the voltage output from the sensor varies in direct proportion to the primary current through its full-scale amplitude. Nonlinearity in the output can be attributed to the saturation of the flux concentrator approaching the full-scale current. The following equation is used to derive the linearity:

$$100 \left\{ 1 - \left[\frac{\Delta \text{gain} \times \% \text{ sat} (V_{IOUT_full-scale \text{ amperes}} - V_{IOUT(Q)})}{2 (V_{IOUT_half-scale \text{ amperes}} - V_{IOUT(Q)})} \right] \right\}$$

where $V_{IOUT_full-scale \text{ amperes}}$ = the output voltage (V) when the sensed current approximates full-scale $\pm I_p$.

Symmetry (E_{SYM}). The degree to which the absolute voltage output from the sensor varies in proportion to either a positive or negative full-scale primary current. The following formula is used to derive symmetry:

$$100 \left(\frac{V_{IOUT_+ \text{ full-scale \text{ amperes}} - V_{IOUT(Q)}}}{V_{IOUT(Q)} - V_{IOUT_- \text{ full-scale \text{ amperes}}} \right)$$

Quiescent output voltage (V_{IOUT(Q)}). The output of the sensor when the primary current is zero. For a unipolar supply voltage, it nominally remains at $V_{CC}/2$. Thus, $V_{CC} = 5$ V translates into $V_{IOUT(Q)} = 2.5$ V. Variation in $V_{IOUT(Q)}$ can be attributed to the resolution of the Allegro linear IC quiescent voltage trim and thermal drift.

Electrical offset voltage (V_{OE}). The deviation of the device output from its ideal quiescent value of $V_{CC}/2$ due to nonmagnetic causes. To convert this voltage to amperes, divide by the device sensitivity, Sens.

Accuracy (E_{TOT}). The accuracy represents the maximum deviation of the actual output from its ideal value. This is also known as the total output error. The accuracy is illustrated graphically in the output voltage versus current chart at right.

Accuracy is divided into four areas:

- **0 A at 25°C.** Accuracy of sensing zero current flow at 25°C, without the effects of temperature.
- **0 A over Δ temperature.** Accuracy of sensing zero current flow including temperature effects.
- **Full-scale current at 25°C.** Accuracy of sensing the full-scale current at 25°C, without the effects of temperature.
- **Full-scale current over Δ temperature.** Accuracy of sensing full-scale current flow including temperature effects.

Ratiometry. The ratiometric feature means that its 0 A output, $V_{IOUT(Q)}$, (nominally equal to $V_{CC}/2$) and sensitivity, Sens, are proportional to its supply voltage, V_{CC} . The following formula is used to derive the ratiometric change in 0 A output voltage, $\Delta V_{IOUT(Q)RAT}$ (%).

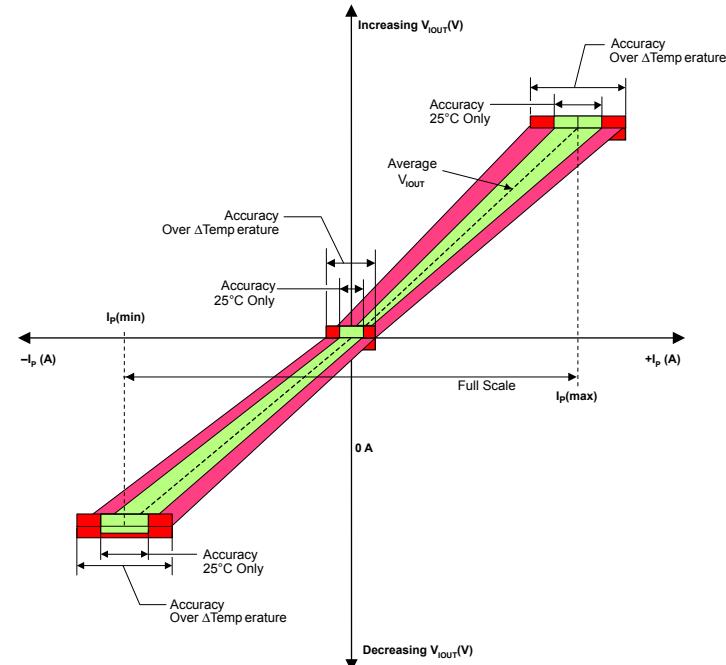
$$100 \left(\frac{V_{IOUT(Q)VCC} / V_{IOUT(Q)5V}}{V_{CC} / 5 \text{ V}} \right)$$

The ratiometric change in sensitivity, ΔSens_{RAT} (%), is defined as:

$$100 \left(\frac{\text{Sens}_{VCC} / \text{Sens}_{5V}}{V_{CC} / 5 \text{ V}} \right)$$

Output Voltage versus Sensed Current

Accuracy at 0 A and at Full-Scale Current

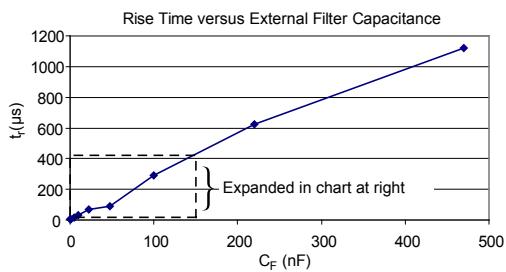
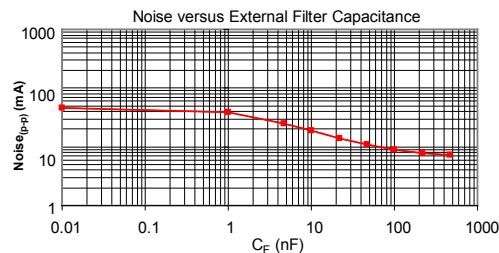
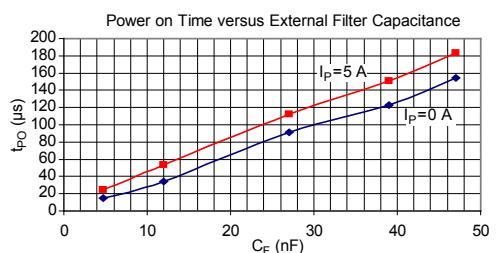
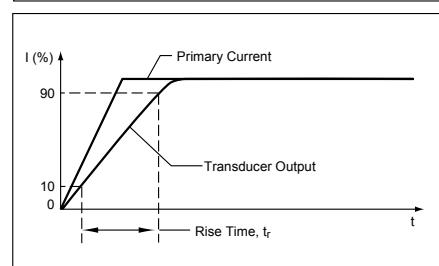
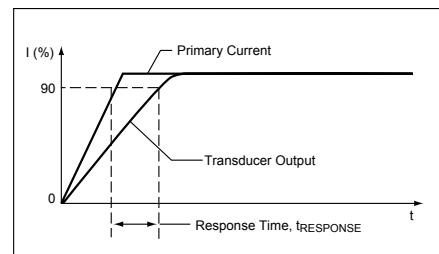
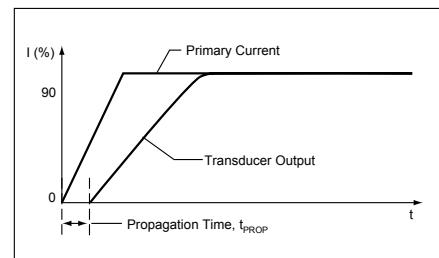


Definitions of Dynamic Response Characteristics

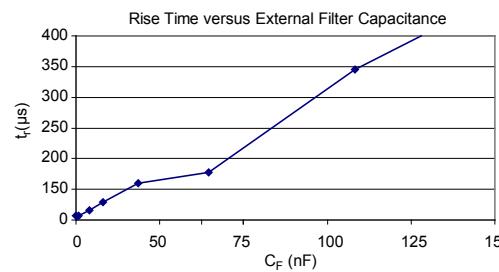
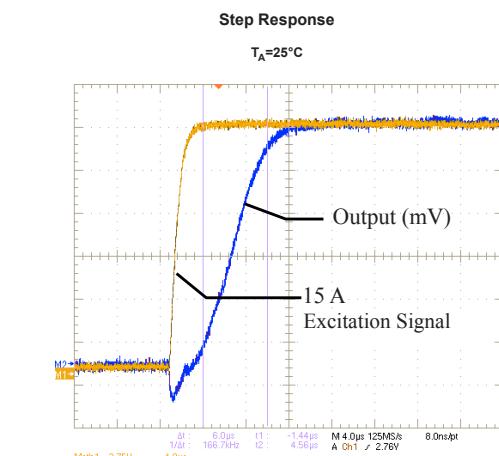
Propagation delay (t_{PROP}). The time required for the sensor output to reflect a change in the primary current signal. Propagation delay is attributed to inductive loading within the linear IC package, as well as in the inductive loop formed by the primary conductor geometry. Propagation delay can be considered as a fixed time offset and may be compensated.

Response time (t_{RESPONSE}). The time interval between a) when the primary current signal reaches 90% of its final value, and b) when the sensor reaches 90% of its output corresponding to the applied current.

Rise time (t_r). The time interval between a) when the sensor reaches 10% of its full scale value, and b) when it reaches 90% of its full scale value. The rise time to a step response is used to derive the bandwidth of the current sensor, in which $f(-3 \text{ dB}) = 0.35/t_r$. Both t_r and t_{RESPONSE} are detrimentally affected by eddy current losses observed in the conductive IC ground plane.



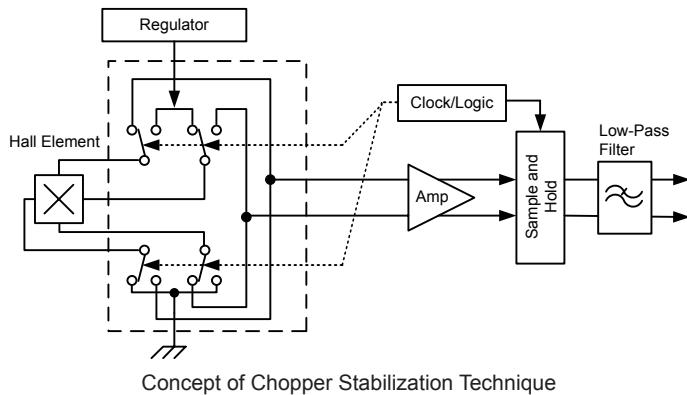
C_F (nF)	t_r (μs)
0	6.647
1	7.74
4.7	17.38
10	32.09087
22	68.15
47	88.18
100	291.26
220	623.02
470	1120



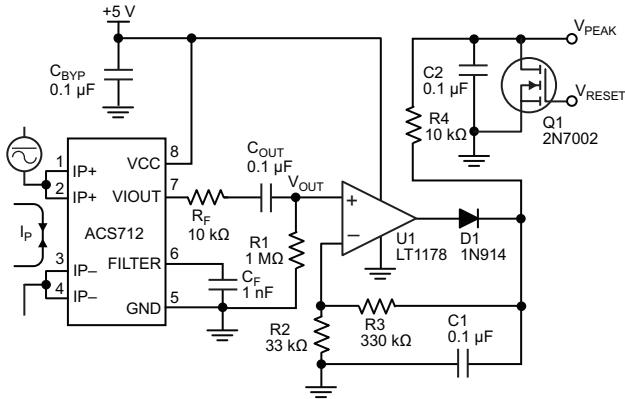
Chopper Stabilization Technique

Chopper Stabilization is an innovative circuit technique that is used to minimize the offset voltage of a Hall element and an associated on-chip amplifier. Allegro patented a Chopper Stabilization technique that nearly eliminates Hall IC output drift induced by temperature or package stress effects. This offset reduction technique is based on a signal modulation-demodulation process. Modulation is used to separate the undesired dc offset signal from the magnetically induced signal in the frequency domain. Then, using a low-pass filter, the modulated dc offset is suppressed while the magnetically induced signal passes through the filter. As a result of this chopper stabilization approach, the output voltage from the Hall IC is desensitized to the effects of temperature and mechanical stress. This technique produces devices that have an extremely stable Electrical Offset Voltage, are immune to thermal stress, and have precise recoverability after temperature cycling.

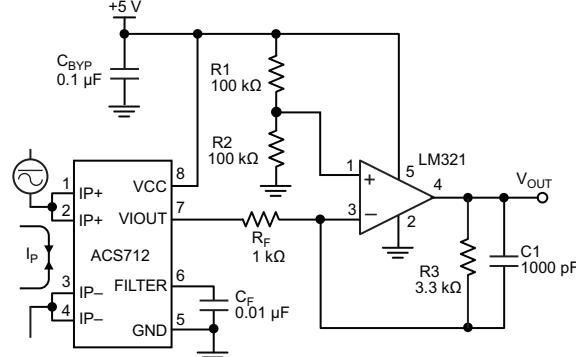
This technique is made possible through the use of a BiCMOS process that allows the use of low-offset and low-noise amplifiers in combination with high-density logic integration and sample and hold circuits.



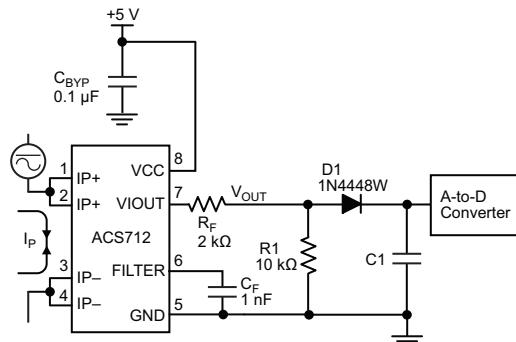
Typical Applications



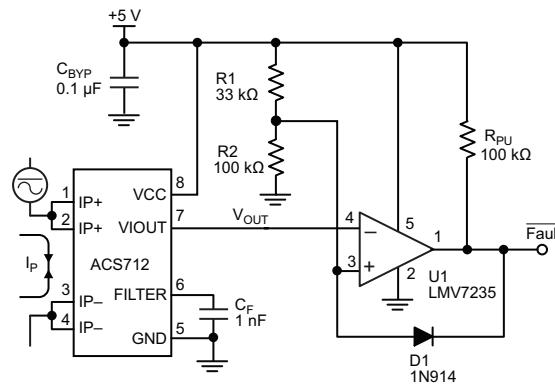
Application 2. Peak Detecting Circuit



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS712ELC-05A).



Application 4. Rectified Output. 3.3 V scaling and rectification application for A-to-D converters. Replaces current transformer solutions with simpler ACS circuit. C1 is a function of the load resistance and filtering desired. R1 can be omitted if the full range is desired.



Application 5. 10 A Overcurrent Fault Latch. Fault threshold set by R1 and R2. This circuit latches an overcurrent fault and holds it until the 5 V rail is powered down.

Improving Sensing System Accuracy Using the FILTER Pin

In low-frequency sensing applications, it is often advantageous to add a simple RC filter to the output of the sensor. Such a low-pass filter improves the signal-to-noise ratio, and therefore the resolution, of the sensor output signal. However, the addition of an RC filter to the output of a sensor IC can result in undesirable sensor output attenuation — even for dc signals.

Signal attenuation, ΔV_{ATT} , is a result of the resistive divider effect between the resistance of the external filter, R_F (see Application 6), and the input impedance and resistance of the customer interface circuit, R_{INTFC} . The transfer function of this resistive divider is given by:

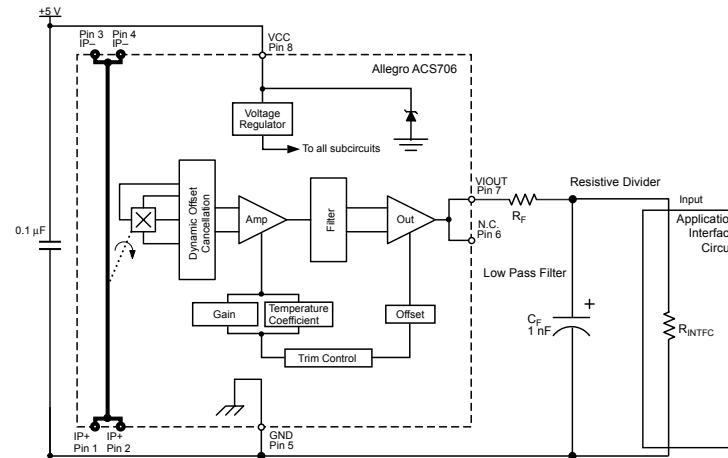
$$\Delta V_{ATT} = V_{IOUT} \left(\frac{R_{INTFC}}{R_F + R_{INTFC}} \right) .$$

Even if R_F and R_{INTFC} are designed to match, the two individual resistance values will most likely drift by different amounts over

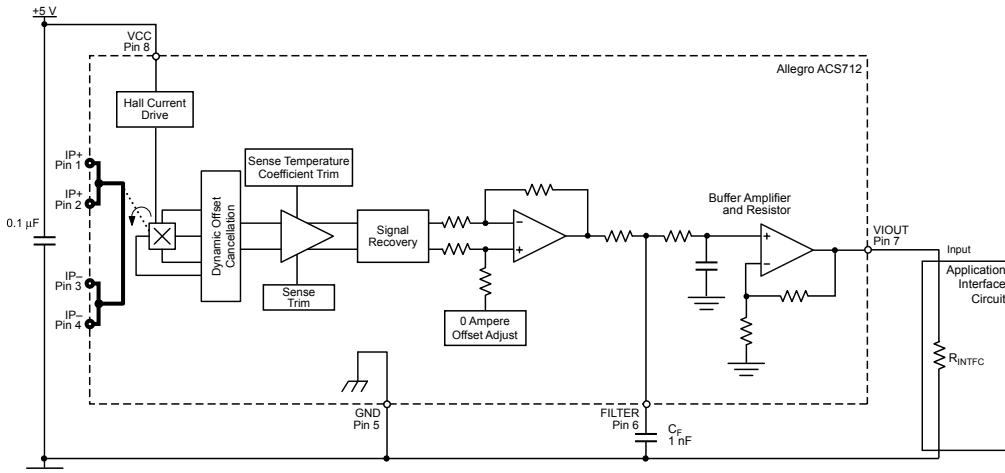
temperature. Therefore, signal attenuation will vary as a function of temperature. Note that, in many cases, the input impedance, R_{INTFC} , of a typical analog-to-digital converter (ADC) can be as low as $10\text{ k}\Omega$.

The ACS712 contains an internal resistor, a FILTER pin connection to the printed circuit board, and an internal buffer amplifier. With this circuit architecture, users can implement a simple RC filter via the addition of a capacitor, C_F (see Application 7) from the FILTER pin to ground. The buffer amplifier inside of the ACS712 (located after the internal resistor and FILTER pin connection) eliminates the attenuation caused by the resistive divider effect described in the equation for ΔV_{ATT} . Therefore, the ACS712 device is ideal for use in high-accuracy applications that cannot afford the signal attenuation associated with the use of an external RC low-pass filter.

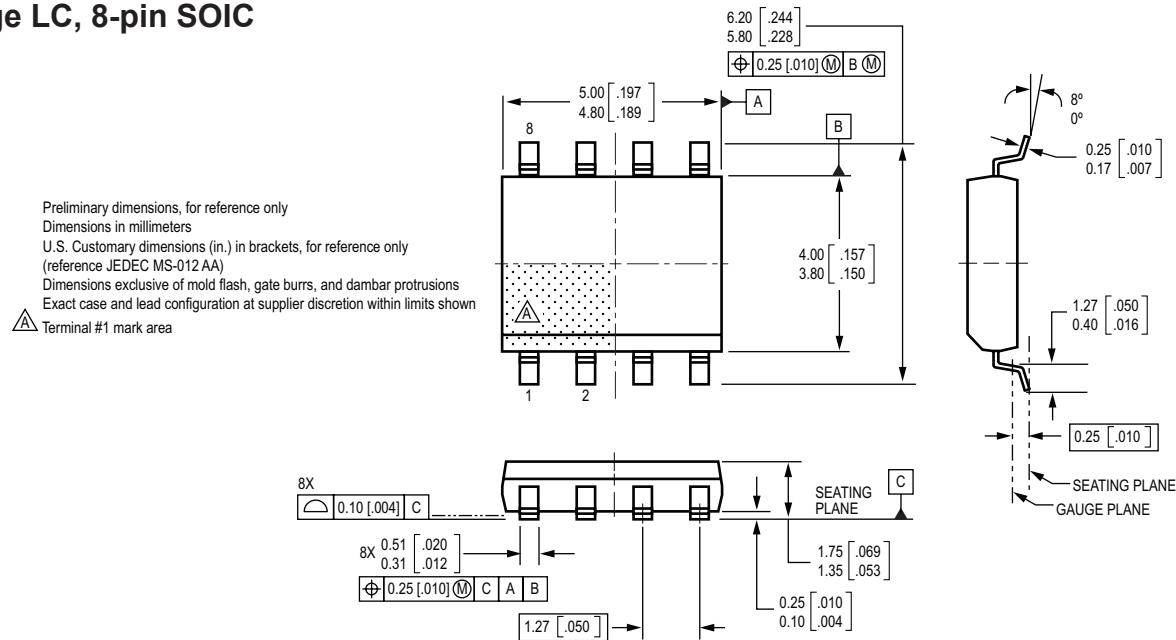
Application 6. When a low pass filter is constructed externally to a standard Hall effect device, a resistive divider may exist between the filter resistor, R_F , and the resistance of the customer interface circuit, R_{INTFC} . This resistive divider will cause excessive attenuation, as given by the transfer function for ΔV_{ATT} :



Application 7. Using the FILTER pin provided on the ACS712 eliminates the attenuation effects of the resistor divider between R_F and R_{INTFC} , shown in Application 6.

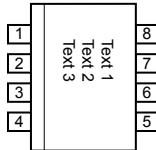


Package LC, 8-pin SOIC



Package Branding

Two alternative patterns are used



	ACS	Allegro Current Sensor
	712	Device family number
	T	Indicator of 100% matte tin leadframe plating
ACS712T	R	Operating ambient temperature range code
RLCPPP	LC	Package type designator
YYWWA	PPP	Primary sensed current
	YY	Date code: Calendar year (last two digits)
	WW	Date code: Calendar week
	A	Date code: Shift code

	ACS	Allegro Current Sensor
	712	Device family number
	T	Indicator of 100% matte tin leadframe plating
ACS712T	R	Operating ambient temperature range code
RLCPPP	LC	Package type designator
L...L	PPP	Primary sensed current
YYWW	L...L	Lot code
	YY	Date code: Calendar year (last two digits)
	WW	Date code: Calendar week

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

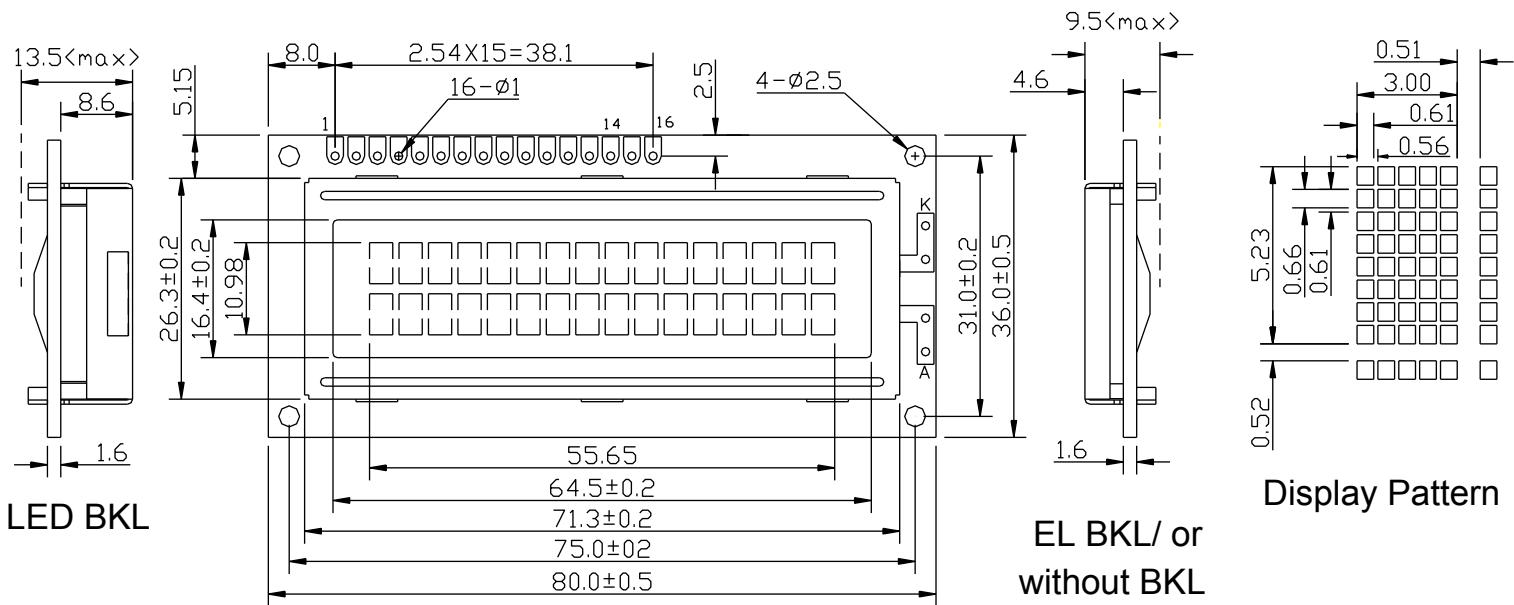
Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability,

or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current. The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

Copyright ©2006, Allegro MicroSystems, Inc.

For the latest version of this document, go to our website at:

www.allegromicro.com



Feature

1. *5X8 dots with cursor*
 2. *Built-in controller (KS0066U or Equivalent)*
 3. *+5V power supply(Also available for +3.0V)*
 4. *1/16 duty*
 5. *BKL to be driven by pin1, pin2, or pin15, pin16, or A, K*
 6. *N.V.optional*

PIN NO	Symbol	Function
1	VSS	GND
2	VDD	+5V
3	V0	Contrast adjustment
4	RS	H/L Register select signal
5	R/W	H/L Read/Write signal
6	E	H/L Enable signal
7	DB0	H/L Data bus line
8	DB1	H/L Data bus line
9	DB2	H/L Data bus line
10	DB3	H/L Data bus line
11	DB4	H/L Data bus line
12	DB5	H/L Data bus line
13	DB6	H/L Data bus line
14	DB7	H/L Data bus line
15	A	+4.2V for LED
16	K	Power supply for BKL(0V)

Mechanical Data

Item	Standard	Unit
Module dimension	80.0x36.0	mm
Viewing area	64.5x16.4	mm
Dot size	0.56x0.61	mm
Character size	3.00x5.23	mm

Absolute Maximum Rating

Item	Symbol	Standard			Unit
		Min	Typ	Max	
Power supply	VDD-VSS	-0.3	-----	5.5	V
Input voltage	VI	-0.3	-----	VDD	

Electronical characteristics

Item	Symbol	Condition	Standard			Unit
			Min	Typ	Max	
<i>Input voltage</i>	VDD	+5V	4.7	5.0	5.5	V
		+3.3V	2.7	3.0	5.3	V
<i>Supply current</i>	<i>IDD</i>	VDD=5V	-----	1.5	4	mA
<i>Recommended LCD riling voltage for normal temp version module</i>	VDD-V0	-20°C	-----	-----	-----	V
		0 °C	4.7	5.0	5.5	
		25°C	4.3	4.5	4.7	
		50°C	4.1	4.3	4.5	
		70°C	-----	-----	-----	
		-----	-----	-----	-----	
<i>LED forward voltage</i>	<i>VF</i>	25°C	-----	4.2	4.6	V
<i>LED forward current</i>	<i>IF</i>	25°C	-----	120	160	mA
<i>EL power supply current</i>	<i>IEL</i>	VEL=110V AC 400Hz	-----	-----	-----	mA

Display character address code:

Display class