



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería mecánica, térmica y de fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

**SISTEMA DE ALIMENTACIÓN FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO
PARA UN SEGUIDOR SOLAR**

Grado en

Ingeniería Electrónica Industrial

Autor: **Rodríguez González, Jesús**

Tutor: **Serrano Aguilera, Juan José**

Cotutor: **Ortega Rodríguez, Marcos**

Málaga, octubre de 2024



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO DEL PROYECTO.....	1
1.1. Contexto y justificación.....	1
1.2. El heliostato.....	2
1.3. Objetivos del proyecto.....	6
1.4. Estructura del documento.....	8
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.....	11
2.1. Principios básicos.....	11
2.1.1. La célula fotovoltaica.....	12
2.1.2. Baterías de litio 18650.....	16
2.2. Microcontrolador ESP32.....	17
2.2.1. Puertos ADC y justificación de la alimentación a 3.3V.....	19
2.2.2. Uso del lenguaje Arduino.....	20
2.2.3. Puertos de Transmisión (TX/RX, SDA, SCL).....	22
2.2.4. Capacidades de procesamiento y memoria.....	23
2.4. Descripción de los componentes electrónicos empleados.....	25
2.4.1. Sensor de corriente continua INA219.....	25
2.4.2. Módulo cargador de baterías TP4056.....	31
2.4.3. Batería de litio INR18650-35E.....	36
2.4.4. Convertidor DC-DC SO9.....	42
2.4.5. Celda fotovoltaica.....	45
2.4.6. Módulo controlador Mini L298N.....	45
2.4.7. Motor de corriente continua G12-N20.....	47
2.4.8. Adaptador serial USB a TTL - FT232RL.....	48
CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA.....	51
3.1. Diagrama de bloques.....	51
3.1.1. Conexiones del sistema.....	51
3.1.2. Diseño del diagrama.....	56



3.1.3.	Justificación de los componentes.....	57
3.2.	Desarrollo del prototipo.	59
3.2.1.	Diseño del prototipo.	60
3.2.2.	Verificación y pruebas iniciales.	62
3.3.	Programación y configuración del software.....	63
3.3.1.	Estructura y funcionalidad del código.....	64
3.4.	Presupuestos.....	68
CAPÍTULO 4: RESULTADOS y ANÁLISIS.....		69
4.1.	Descripción de las condiciones de prueba.	69
4.1.1.	Escenarios climáticos y horarios de operación.....	70
4.2.	Resultados de la gestión de la energía.....	71
4.2.1.	Generación total de energía.....	71
4.2.2.	Análisis de los resultados en días específicos.....	74
4.2.3.	Análisis del factor de aprovechamiento energético de la célula fotovoltaica.....	80
4.2.4.	Análisis de la pérdida de capacidad de la batería de litio.....	81
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....		83
5.1.	Conclusiones del rendimiento del sistema.	83
5.2.	Líneas futuras: Implementación de la funcionalidad del TP4056 para la gestión eficiente de la batería del sistema.	85
BIBLIOGRAFÍA.....		87
ANEXO I: Planos eléctricos y PCB.....		91
ESQUEMÁTICO ELECTRICICO DEL SISTEMA.....		93
DISEÑO PCB DEL SISTEMA.....		95
ANEXO II: Código del sistema.....		97
CÓDIGO DE DESCARGA BATERÍA DE LITIO – CURVA I-V.....		99
CÓDIGO DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN HELIOSTATO AUTÓNOMO.....		105
ANEXO III: Presupuestos.....		111
ANEXO IV: Hojas de características.....		115

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO DEL PROYECTO.

1.1. Contexto y justificación.

En la actualidad, la necesidad de sistemas energéticos sostenibles y eficientes ha motivado un interés creciente en el desarrollo de tecnologías capaces de optimizar el aprovechamiento de recursos renovables. Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se inscribe en el marco de un proyecto más amplio orientado a la creación de un heliostato de reducido tamaño, autosuficiente y económico. Se trata de un dispositivo que emplea espejos para reflejar la luz solar hacia un punto fijo durante todo el día, mejorando el aprovechamiento de la energía solar.

Específicamente, este proyecto se centra en el desarrollo de la infraestructura electrónica necesaria para gestionar el sistema de alimentación eléctrico del heliostato. La finalidad de esta gestión es doble: por un lado, asegurar una alimentación energética constante y eficiente al sistema, y por otro, optimizar el almacenamiento de esta energía para su uso continuado o diferido. Este enfoque no solo permite aumentar la eficiencia energética del heliostato, sino simplificar la infraestructura del campo solar a través de unidades autónomas que no requieren cableado sobre el campo solar.

Desde el punto de vista técnico, la solución desarrollada implica la integración y coordinación de varios componentes electrónicos avanzados. Entre estos se incluyen sensores de intensidad y tensión para el monitoreo preciso del flujo eléctrico de alimentación de los actuadores, módulos de carga para gestionar eficientemente la batería de litio, y un microcontrolador robusto encargado de la toma de decisiones y la comunicación de datos.

El diseño y la implementación de este sistema electrónico no solo suponen un reto técnico, sino que también representan un paso crucial en la validación de tecnologías limpias y autosuficientes. La capacidad para gestionar de manera

eficiente la energía solar mediante tecnología electrónica avanzada es fundamental para el futuro de las energías renovables y su integración en aplicaciones cotidianas e industriales.

Este proyecto, por tanto, no solo se alinea con los objetivos académicos del Trabajo Fin de Grado, sino que también responde a la urgente necesidad global de desarrollar sistemas que maximicen el uso de energías renovables de manera sostenible y eficaz, asegurando su viabilidad y eficiencia en aplicaciones de ingeniería real.

1.2. El heliostato.

El heliostato es un componente esencial en las plantas termosolares de receptor central (también conocidas como plantas de torre). Este subsistema consta de un conjunto de superficies reflectantes, no necesariamente coplanares, que dirigen la luz solar hacia un foco predeterminado, los cuales representan aproximadamente el 40% del coste total de estas plantas. La función principal de estas plantas es reflejar los rayos solares hacia un punto elevado en la torre donde se encuentra el receptor central, concentrando así la luz solar para generar una fuente de calor a alta temperatura. Este calor se utiliza en procesos termodinámicos que pueden producir electricidad o proporcionar energía térmica para diversas aplicaciones industriales.

Debido al movimiento aparente del sol durante el día, los heliostatos están equipados con sistemas mecánicos que ajustan la posición de las superficies reflectantes para mantener la concentración de la radiación solar en el receptor. Generalmente, estos espejos tienen una ligera curvatura para mejorar la concentración solar, aunque en versiones más sencillas y pequeñas, los espejos pueden ser planos.

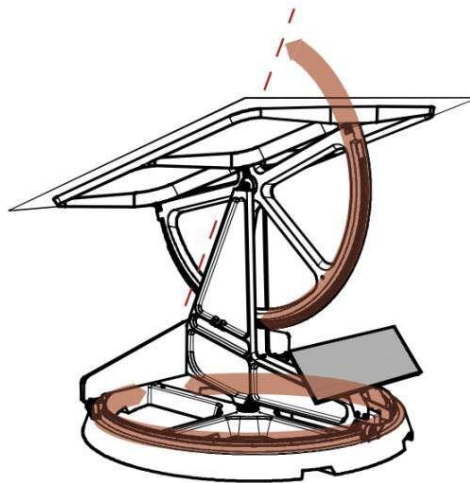


Figura 1.- Ejemplo de heliostato con seguimiento solar de doble eje con superficie de espejo de 4 m². Modelo diseñado por la empresa Pquadrum.

En relación con el sistema de seguimiento, la precisión requerida varía según la aplicación. Es crucial considerar que los heliostatos más distantes en el campo solar, respecto de la torre central, necesitan un seguimiento preciso. Por ejemplo, una de las mayores plantas de torre del mundo, ubicada en el desierto de Atacama (Cerro Dominador, Chile), tiene un radio de 1.6 km. En este contexto, cualquier error angular en el sistema de seguimiento puede amplificarse significativamente, reduciendo la eficiencia óptica del campo solar de manera considerable. Por esta razón, se utilizan esquemas de orientación de lazo cerrado que, mediante un sistema de realimentación, corrigen la posición del heliostato para asegurar que la radiación reflejada alcance el punto objetivo deseado.

Dentro de los sistemas más avanzados de detección se encuentran los ópticos, los cuales utilizan un conjunto de cámaras para detectar el patrón de radiación reflejada cerca del receptor o para determinar con precisión la posición de los contornos del heliostato, permitiendo corregir su posición si es necesario. No obstante, los sistemas de lazo abierto también son comunes, especialmente cuando las condiciones de operación y diseño lo permiten. En estos casos, se requiere un proceso de calibración exhaustivo, en el que se analiza cada

heliostato individualmente, estudiando la huella del conjunto de rayos reflejados sobre un objetivo diseñado específicamente para este propósito.

Otro factor relevante es la geometría del contorno del área reflectante, que suele ser rectangular, aunque versiones más recientes han adoptado topologías alternativas, como el modelo Stellio con forma pentagonal (ver *Figura 2*). Al diseñar un heliostato, el criterio más crítico es su tamaño, generalmente escalado según su área reflectante. Según los resultados recopilados, se observa un patrón generalizado que sugiere que una solución de compromiso ofrece los mejores resultados.

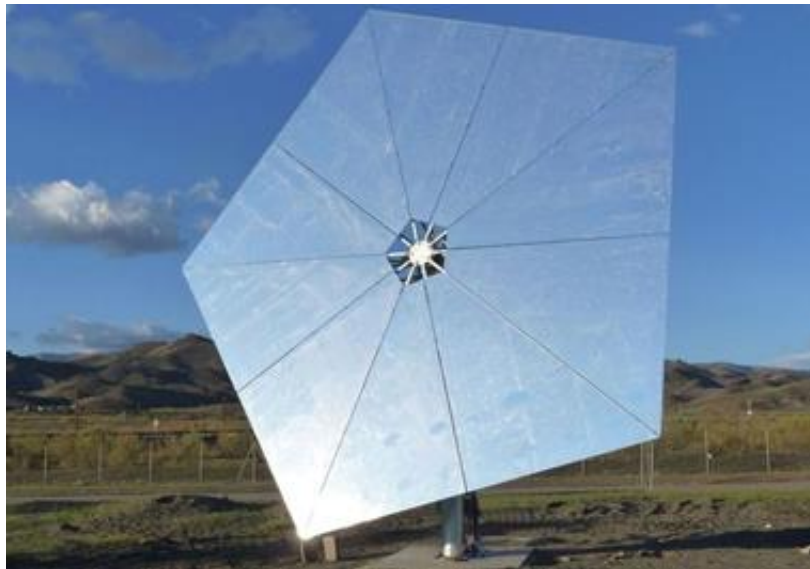


Figura 2.- Heliostato Stellio. Presente en la planta solar de Almería (PSA) en España.

Un modelo de heliostato de gran tamaño, como el de 178 m² del fabricante Sener, instalado en la planta Noor III en Marruecos, puede beneficiarse de su amplia área de espejos al reducir el número de elementos únicos por heliostato, como cimentación, motores, sensores, cableado de alimentación y comunicación, y mástiles para todo el campo solar. Por otro lado, la tendencia de reducir costos mediante el diseño de heliostatos pequeños puede aprovechar la economía de escala, la posibilidad de fabricación local, la mejora en la eficiencia óptica, estructuras más ligeras en relación con el área reflectante y mayor tolerancia a condiciones meteorológicas adversas.



Figura 3.- Planta termosolar de Noor III (Ouarzazate) en Marruecos

En la gran mayoría de las plantas comerciales, el campo solar requiere una red de cableado muy extensa y compleja debido al elevado número de heliostatos. Según algunas fuentes, este cableado puede representar el 7% del coste total del campo, necesario para alimentar los actuadores individuales de cada heliostato y para comunicarse con el sistema de control central.

El abaratamiento de los microcontroladores con capacidades de comunicación inalámbrica ha abierto nuevas posibilidades para los sistemas basados en pequeños heliostatos, que pueden lograr completa autonomía mediante una pequeña fuente fotovoltaica. El sistema de un heliostato no se limita solo a la producción termoeléctrica. Además de los sistemas de producción fotovoltaica concentrada, también tienen aplicaciones en astronomía y geodesia. En astronomía, se utilizan para observar el sol sin necesidad de mover el equipo de observación, ya que el heliostato sigue al sol. En geodesia, se emplean para transmitir señales luminosas a largas distancias.

1.3. Objetivos del proyecto

Este proyecto se centra en el desafío de diseñar y desarrollar un sistema electrónico avanzado para optimizar la alimentación eléctrica de un heliostato autónomo. Este sistema no busca solo monitorizar y regular la captación de energía solar, sino también perfeccionar su uso y durabilidad, lo cual es crucial para la sostenibilidad y efectividad del dispositivo. A continuación, se describen los objetivos que se han propuesto para este proyecto:

1. Desarrollo de un sistema de monitorización energética

- Emplear sensores INA219 para medir con precisión la tensión e intensidad tanto de una batería de litio como de la célula fotovoltaica que alimenta el sistema, asegurando una supervisión continua del flujo eléctrico.

2. Optimización del proceso de carga de la batería

- Configurar y programar el módulo TP4056 para gestionar adecuadamente la carga de la batería de litio, maximizando de forma significativa su vida útil y eficiencia.
- Establecer un sistema de regulación de tensión que asegure la entrega de una tensión constante de 3.3 V al microcontrolador ESP32, garantizando su operación estable y segura.

3. Autonomía del sistema

- Diseñar un esquema de alimentación que permita al heliostato operar de manera autónoma mediante el uso de una celda fotovoltaica, eliminando la dependencia de fuentes de energía externas.
- Incluir un motor como carga eléctrica en las pruebas para simular condiciones de funcionamiento y validar la capacidad del sistema para

gestionar cargas dinámicas. El control específico del motor no es objeto de este estudio, funcionará a velocidad nominal con una alimentación de 3.3 V.

4. Implementación de control y comunicación

- Programar el microcontrolador ESP32 para que ejecute las tareas de control y procesamiento de datos de manera eficiente.
- Establecer un sistema de comunicación efectivo utilizando un módulo FTDI232 para la transferencia de datos sin interferir con la alimentación del sistema a través de un puerto serie, empleando la interfaz RS232.

5. Evaluación del sistema mediante pruebas experimentales

- Realizar pruebas de campo para validar la funcionalidad y eficiencia del sistema bajo condiciones simuladas de operación.
- Analizar los datos recopilados durante las pruebas para evaluar el rendimiento del sistema y realizar ajustes necesarios en el diseño o la configuración.

Este conjunto de objetivos está concebido para crear un sistema eficiente que no solo cumpla con los requisitos técnicos del heliostato autónomo, sino que también aporte conocimientos y soluciones aplicables a otros sistemas de energía renovable. Con ello, se espera contribuir significativamente al desarrollo de tecnologías sostenibles en el campo de la ingeniería electrónica y energética.

1.4. Estructura del documento.

Este trabajo de fin de grado se estructura en cinco capítulos principales, cada uno está enfocado en una fase distinta del desarrollo del prototipo para un heliostato de pequeñas dimensiones. Esta estructura permite una presentación clara y sistemática del proyecto desde sus fundamentos teóricos hasta la implementación y evaluación práctica del prototipo desarrollado. A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo:

Capítulo 1: Introducción y contexto del proyecto

Este capítulo establece el marco del proyecto, explicando el campo de aplicación de los heliostatos y la necesidad de sistemas de alimentación autónomos. Se definen los objetivos específicos del proyecto. Además, se proporciona una visión general de la estructura del documento, guiando al lector sobre lo que puede esperar en las secciones siguientes.

Capítulo 2: Fundamentos teóricos y descripción de componentes

Se abordan los principios básicos del efecto fotoeléctrico y la caracterización de dispositivos fotovoltaicos. Además, este capítulo también detalla la funcionalidad del microcontrolador ESP32 para el proyecto, discutiendo sus capacidades y limitaciones e incluye análisis detallados de cada componente del sistema, desde sensores hasta módulos de carga, es descrito en detalle, proporcionando un fundamento sólido para el diseño del sistema.

Capítulo 3: Diseño y desarrollo del sistema

Se explica el diseño del sistema a través de un diagrama de bloques y la justificación de las decisiones de diseño tomadas. Se detalla el proceso de construcción del prototipo. Este capítulo también cubre la programación y configuración del software, esencial para la operatividad del prototipo.

Capítulo 4: Resultados y análisis

Se presenta una evaluación exhaustiva del prototipo a través de pruebas específicas, incluyendo la curva de descarga de la batería y ensayos de funcionamiento del sistema en condiciones climatológicas adversas. Los resultados son analizados críticamente para evaluar el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

Este capítulo concluye con un resumen de los hallazgos y recomendaciones para futuros trabajos y posibles modificaciones para mejorar la eficiencia del heliostato autónomo.

Bibliografía y anexos

Este apartado compila una bibliografía completa que enumera todas las fuentes consultadas durante la investigación y desarrollo del proyecto. Incluye todos los anexos que proporcionan información adicional y soporte documental, como esquemas electrónicos, códigos fuente, y hojas de características.

Cada capítulo está diseñado para proporcionar una exploración exhaustiva y sistemática de los diferentes aspectos del proyecto, asegurando que todos los detalles necesarios para entender y replicar el trabajo están disponibles y son accesibles.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES.

En este apartado del documento, se procederá a describir de manera detallada cada uno de los componentes electrónicos empleados en el diseño del sistema de gestión de energía para el heliostato autónomo. La explicación incluirá las características técnicas, la funcionalidad específica y las aplicaciones relevantes de cada componente, proporcionando así una base sólida para comprender cómo cada uno contribuye al funcionamiento general y la eficiencia del sistema. Este enfoque asegura una comprensión integral de los principios operativos y las decisiones de diseño que fundamentan la arquitectura electrónica del proyecto.

2.1. Principios básicos

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico que explica la conversión de la energía de las radiaciones ópticas en energía eléctrica, un ejemplo más que evidente es la célula solar como el dispositivo fotovoltaico más importante para la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica.

En 1839, se descubrió el efecto fotovoltaico en células electroquímicas, pero no fue posible su empleo de forma eficiente en células solares hasta 1954, cuando Chapin, Fuller y Pearson fueron capaces de desarrollar células muy similares a las empleadas hoy en día (Photovoltaics for Sustainable Electricity and Buildings por Lawrence L. Kazmerski, 2016).

2.1.1. La célula fotovoltaica

La luz solar está formada por fotones, los cuales al incidir sobre materiales semiconductores transmiten su energía a los electrones de valencia de dicho material, rompiendo el enlace que los mantiene unidos. Cada enlace roto genera un electrón libre capaz de circular a través del sólido, esta ausencia de electrones entre las distintas uniones es conocida como hueco, cuyo comportamiento es similar a una partícula con carga positiva igual a la del electrón.

El movimiento en direcciones opuestas entre los electrones y huecos producen una corriente eléctrica, la cual es cedida al semiconductor a través de los fotones. Para eliminar la posibilidad de que se restablezcan dichos enlaces se emplea un campo eléctrico forzando así que tanto los electrones como los huecos discurren en direcciones opuestas.

En la actualidad, todas las células solares están constituidas por una unión entre un material semiconductor tipo n, con una concentración de electrones mayor que la de huecos, y otro tipo p, material con mayor número de huecos que de electrones. Si una de estas células solares se conecta a una carga, esta producirá un salto de potencial generando así el movimiento de una corriente eléctrica. Dicha célula se comportará como un generador de energía dando lugar a una serie de fenómenos internos que pueden describirse tal que:

- Los fotones que llegan a la célula con una energía igual o mayor al ancho de la banda prohibida son absorbidos por los semiconductores generando corriente. Esta banda representa la energía mínima necesaria para excitar un electrón desde su estado ligado a un estado libre que le permita participar en la conducción.
- La unión p-n provoca un campo eléctrico debido a la separación de los portadores antes de que se reagrupen de nuevo.

- Los eventos de inyección y recombinación de los pares electrón-huecos se deben al voltaje situado en los terminales del dispositivo, los cuales actúan en la célula solar como pérdidas de recombinación.

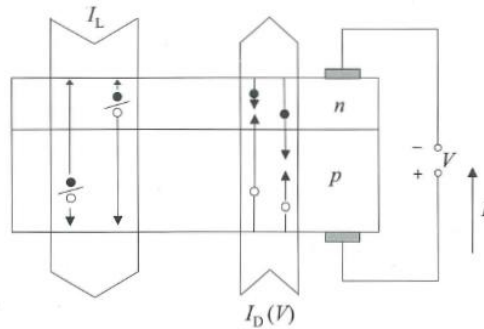


Figura 4.- Componentes internas de corriente en una célula solar (Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos por E. Lorenzo, 2006).

En conclusión, la corriente que se entrega a una carga a través de un diodo semiconductor es el fruto de dos componentes internas de corriente que se oponen, siendo una de estas producida por la generación de portadores que produce la iluminación conocida como fotocorriente y la resultante de la recombinación de portadores que producen voltaje para poder entregar la energía a la carga, denominada corriente de oscuridad.

En resumidas cuentas, la célula solar está constituida por un material semiconductor con un ancho de banda prohibida (E_G), y un espesor total (W) tal y como aparece en la siguiente figura.

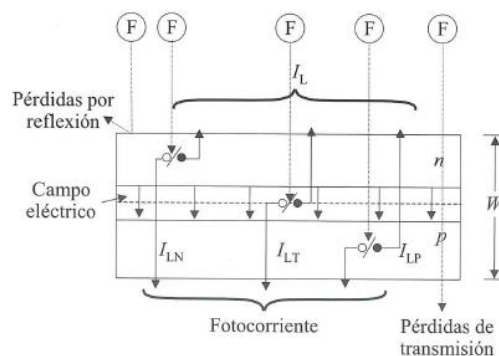


Figura 5.- Generación de foto corriente en una célula solar (Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos por E. Lorenzo, 2006).

Los fotones que inciden sobre el semiconductor pueden ser absorbidos por los electrones en la banda de valencia, que luego se elevan a la banda de conducción, generando portadores de corriente. Sin embargo, no todos los fotones contribuyen a este proceso. Aquellos con energía inferior a E_G no son absorbidos debido a un coeficiente de absorción nulo, resultando en pérdidas de no-absorción. Además, fotones con energía superior pueden atravesar el semiconductor sin ser absorbidos debido al valor finito del coeficiente de absorción y al ancho del material, causando pérdidas de transmisión y de reflexión, estas últimas producidas por la energía de los fotones reflejada en la superficie debido a su reflectancia.

En la práctica, únicamente se genera un par electrón-hueco por cada fotón absorbido, el cual no depende de su valor de energía. Las pérdidas de no-absorción es inevitable. Sin embargo, las pérdidas de reflexión y transmisión se pueden reducir al máximo mediante el empleo de capas anti reflectante y diseños óptimos del dispositivo.

Curva característica I-V de iluminación

La corriente eléctrica que genera una célula solar para alimentar una carga viene dada por la diferencia entre la fotocorriente I_L y la corriente de diodo $I_D(V)$, debida a la polarización del voltaje generado.

Tal y como se representa en la *Figura 6*, la corriente de mayor valor posible se produce bajo las condiciones de cortocircuito ($V=0$), denominada como corriente de cortocircuito I_{SC} y si el dispositivo se mantiene en circuito abierto ($I=0$), este producirá la mayor tensión que puede soportar, siendo esta la tensión de circuito abierto V_{OC} .

La región de la curva característica que está comprendida entre I_{SC} y V_{OC} se asocia a la célula como generador de energía.

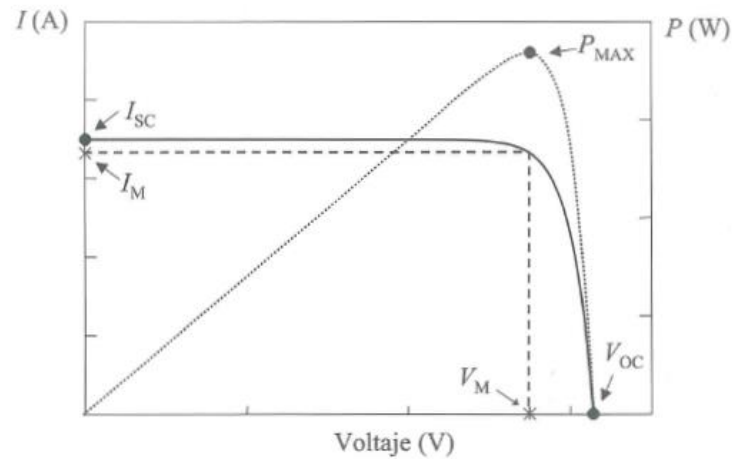


Figura 6.- Curva característica I-V con sus parámetros característicos (Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos por E. Lorenzo, 2006).

La potencia dada a una carga resistiva viene dada por el producto $P=IV$, y existirá un punto de funcionamiento (I_M, V_M) para que la potencia entregada sea máxima, dicho punto se denomina punto de máxima potencia.

El producto $I_M V_M$ que indica la potencia máxima entregada a la carga, representada por el área del rectángulo a rayas, es menor que el rectángulo generado por el producto $I_{sc} V_{oc}$ el cual representa la mayor corriente que puede extraerse de la célula por la mayor tensión. Estos productos son más parecidos cuanto más pronunciado es el codo de la curva característica. Es obvio que en cualquier caso real el cociente entre ambos es siempre menor a la unidad conocido como factor de forma o factor de llenado.

2.1.2. Baterías de litio 18650

Estas baterías están equipadas con una carcasa metálica que incluye un sistema de ventilación sensible a la presión. Este mecanismo regula la presión interna durante el calentamiento de la batería, mitigando riesgos como explosiones debido a incrementos de presión elevados. Esta carcasa protege tres finas láminas cuya estructura es la siguiente:

- Cátodo - Electrodo Positivo
- Un separador dieléctrico
- Ánodo - Electrodo Negativo

Este separador se trata de una delgada lámina de plástico microperforado con la función de separar el cátodo del ánodo permitiendo que los iones se transfieran de una capa a otra, cuya función principal es evitar cortocircuitos internos.

El cátodo está formado principalmente de óxido de litio y el ánodo está compuesto de grafito. Los materiales a base de litio más empleados para la producción de baterías de litio son las siguientes:

- Litio-Cobalto-Óxido (LiCoO_2)
- Litio-Manganeso-Óxido (LiMn_2O_4)
- Litio-Ferro-Fosfato (LiFePO_4)
- Níquel-Manganeso-Cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$)
- Níquel-Cobalto-Aluminio (LiNiCoAlO_2)
- Litio-Titanato ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Estudios independientes indican que el litio ha adquirido una gran relevancia en el contexto de la transición a una economía más verde y sostenible. Este material ha proporcionado una alternativa más limpia y eficiente a los combustibles fósiles puesto que el litio tiene un ciclo de vida mayor en comparación a otras tecnologías de baterías, reduciendo así la producción de residuos debido a su mayor durabilidad.

Estas baterías presentan ventajas en cuanto a mantenimiento se refiere, puesto que al estar selladas no es necesario realizar tareas de limpieza o inspección, tienen una mayor capacidad de carga, soportan un número mayor de ciclos lo que las hace más duraderas y rentables a largo plazo. Además de que su tasa de autodescarga es mucho más baja, lo que indica que retiene su carga durante periodos largos de reposo. Todas estas comparaciones se hacen respecto a las antiguas baterías de plomo-ácido.

2.2. Microcontrolador ESP32

La selección del ESP32 como el microcontrolador central para el proyecto de un heliostato autosuficiente se justifica por varias características que ofrece dicho microcontrolador, según se detalla en la hoja de especificaciones del dispositivo. Aquí se presenta una introducción sobre por qué el ESP32 es adecuado para este tipo de aplicaciones:

Versatilidad y capacidad de procesamiento

El ESP32 es un microcontrolador altamente versátil que cuenta con un procesador dual-core Tensilica Xtensa LX6, que puede funcionar a una frecuencia de hasta 240 MHz. Esta potencia de procesamiento es esencial para manejar múltiples tareas simultáneamente y procesar datos en tiempo real, lo cual es crucial en un sistema que requiere monitoreo y ajustes constantes para el seguimiento de la posición solar.

Conectividad integrada

Una de las ventajas más significativas del ESP32 es su capacidad de conectividad inalámbrica integrada, incluyendo WiFi y Bluetooth. Esta funcionalidad permite una fácil integración en redes existentes y la posibilidad de realizar ajustes y monitoreo remoto del sistema heliostato sin necesidad de cableado adicional, facilitando la instalación y mantenimiento del sistema en ubicaciones remotas o de difícil acceso.

Bajo consumo de energía

Este microcontrolador trabaja a 3.3 V reduciendo así el consumo respecto a otros que requieren de una alimentación de 5 V para su correcto funcionamiento, también es destacado por los varios modos de ahorro de energía que presenta como el deep-sleep y el light-sleep. Estos modos son fundamentales para maximizar la eficiencia energética del sistema, permitiendo que el heliostato opere de manera eficiente y prolongue la duración de la batería en instalaciones autónomas.

Interfaces de comunicación múltiples

Además, el ESP32 ofrece una amplia gama de opciones de periféricos e interfaces de comunicación, incluyendo UART, SPI, I2C, DACs, ADCs, y mucho más. Estas interfaces son cruciales para la conexión y el control de varios sensores y actuadores en el heliostato, como sensores, módulos de carga, y sistemas de posicionamiento del motor, permitiendo una integración y expansión sencillas del sistema.

En el desarrollo del proyecto del heliostato autónomo, la selección del microcontrolador ESP32 ha sido crucial debido a su muy bajo coste en comparación con las prestación que ofrece y a sus avanzadas capacidades y características técnicas que se alinean perfectamente con las necesidades específicas del sistema. Este microcontrolador no solo ofrece una potente plataforma de procesamiento dual-core, sino que también integra una serie de funcionalidades que facilitan la implementación y operatividad del proyecto. Entre estas, se han destacado los siguientes apartados:

2.2.1. Puertos ADC y justificación de la alimentación a 3.3V

El ESP32 está equipado con características avanzadas de conversión analógica a digital, brindando una herramienta valiosa para aplicaciones que requieren la monitorización precisa de variables ambientales y físicas. La descripción detallada de los puertos ADC del ESP32 ilustra su capacidad para integrarse de manera efectiva en proyectos complejos como el heliostato autosuficiente.

Características técnicas de los puertos ADC del ESP32

- Resolución del ADC

El ESP32 incluye dos convertidores analógicos a digitales (ADC) que ofrecen resoluciones de hasta 12 bits. Esto permite que el microcontrolador realice mediciones con una precisión de 4096 niveles distintos de voltaje, apropiado para obtener lecturas con una resolución media.

- Cantidad y Distribución de Canales

Los ADC del ESP32 disponen de un total de 18 canales que pueden ser configurados para leer señales analógicas. Esta amplia gama de canales permite la monitorización simultánea de varios sensores.

- Voltaje de Entrada

El rango de voltaje de entrada aceptable para las mediciones ADC en el ESP32 varía desde 0 V hasta un máximo de aproximadamente 3.3 V. Este rango es adecuado para la mayoría de las aplicaciones de sensores en proyectos de automatización y control.

- Atenuación

Los ADC del ESP32 ofrecen la capacidad de atenuación, lo que permite ampliar el rango de medición de voltaje más allá de los límites predeterminados de 3.3 V. La atenuación puede ser configurada a través

del software, proporcionando flexibilidad para adaptarse a diferentes tipos de entradas analógicas sin la necesidad de hardware adicional.

- Calibración

Para garantizar la precisión de las mediciones, los ADC del ESP32 pueden ser calibrados. La calibración compensa las variaciones inherentes del hardware y asegura que las lecturas del ADC sean consistentes y confiables, lo cual es esencial para aplicaciones críticas donde las decisiones se basan en la precisión de los datos sensoriales.

2.2.2. Uso del lenguaje Arduino

El uso del lenguaje Arduino ofrece múltiples ventajas técnicas que lo hacen ideal para una amplia gama de proyectos de electrónica. Arduino es una plataforma de desarrollo de código abierto basada en software y hardware fácil de usar, que es altamente preferida tanto por principiantes como por profesionales en el campo de la robótica y la automatización. A continuación, se describen detalladamente las características técnicas y las ventajas de utilizar el lenguaje Arduino con el ESP32:

Simplicidad y Accesibilidad

Entorno de Desarrollo Integrado (IDE): Arduino proporciona un IDE que es sencillo de usar, facilitando la escritura, compilación y carga de programas al microcontrolador de manera eficiente. Este IDE es compatible con múltiples sistemas operativos, incluyendo Windows, macOS y Linux.

Compatibilidad con ESP32

Arduino ha extendido su soporte para incluir el ESP32, aprovechando sus capacidades de Wi-Fi y Bluetooth, así como su considerable poder de procesamiento. Esto permite a los desarrolladores utilizar un entorno familiar para desplegar aplicaciones que requieren conectividad avanzada y procesamiento en tiempo real.

Amplia Biblioteca de Código

Este software proporciona acceso a una vasta biblioteca de códigos y ejemplos que pueden ser fácilmente modificados y adaptados. Esto reduce significativamente el tiempo de desarrollo y facilita la implementación de funciones complejas, como la comunicación entre dispositivos, la lectura de sensores y el control de actuadores.

Ventajas de Programación

Arduino utiliza C/C++, permitiendo un control detallado sobre las funciones de hardware, lo cual es esencial para aplicaciones que demandan operaciones de bajo nivel y optimizaciones específicas. Además, la capacidad de utilizar código directo y librerías avanzadas permite a los desarrolladores explotar plenamente las capacidades del ESP32.

Integración de Sensores y Actuadores

Con este compilador, integrar sensores y actuadores es intuitivo, gracias a su entorno de programación simplificado. Esto es particularmente beneficioso en un proyecto de heliostato, donde múltiples sensores y motores deben ser coordinados con precisión.

El uso del lenguaje Arduino en la programación del ESP32 no solo simplifica significativamente el proceso de desarrollo sino que también mejora la eficacia y la eficiencia del sistema. Esta integración ofrece una plataforma robusta y flexible, ideal para manejar las exigencias técnicas del control y monitoreo de heliostatos.

2.2.3. Puertos de Transmisión (TX/RX, SDA, SCL)

El ESP32 está equipado con una variedad de puertos de transmisión que facilitan la comunicación con otros dispositivos y módulos, esenciales en sistemas. Estos puertos incluyen UART para los pines TX/RX y I2C para los pines SDA/SCL, cada uno con funciones específicas que permiten una interacción eficiente y flexible con diferentes componentes electrónicos. A continuación se detallan las características y funciones técnicas de estos puertos de transmisión:

Puertos UART (TX/RX)

Los pines TX (Transmit) y RX (Receive) forman la interfaz de la comunicación serial UART, que permite al ESP32 enviar y recibir datos serie de manera asincrónica con otros dispositivos como microcontroladores, computadoras o módulos periféricos.

Estos puertos operan a niveles lógicos de 3.3 V, compatibles con la mayoría de los sistemas electrónicos modernos. La configuración de velocidad de baudios, bits de parada, y paridad pueden ser ajustadas según las necesidades específicas del proyecto, lo que ofrece flexibilidad para la comunicación con una amplia gama de dispositivos.

En un heliostato, los puertos TX/RX pueden ser utilizados para enviar comandos a motores o recibir datos de sensores remotos, facilitando la coordinación y el control centralizado del sistema.

Puertos I2C (SDA/SCL)

SDA (Serial Data Line) y SCL (Serial Clock Line) son los pines utilizados para la comunicación I2C. Consiste en un bus de datos serial que permite la conexión de múltiples dispositivos a través de solo dos hilos, haciendo el cableado más sencillo y reduciendo los fallos potencialmente.

El ESP32 actúa como maestro o esclavo dentro de una red I2C, con una velocidad estándar de transmisión que puede ir hasta los 400 kHz en el modo Fast, lo cual es suficiente para la mayoría de las aplicaciones que no requieren una transferencia de datos de alta velocidad.

Estos puertos son ideales para conectar sensores de bajo consumo y baja velocidad, como los termistores o sensores de tensión e intensidad, que son críticos en el sistema de monitorización de suministro eléctrico en el heliostato.

Al implementar estos puertos en el diseño del heliostato, es crucial considerar la longitud de los cables, las interferencias potenciales y la necesidad de resistencias pull-up en el caso de I2C para asegurar una comunicación fiable. Además, es importante implementar un esquema adecuado de manejo de errores y confirmación de datos para garantizar la información transmitida en entornos susceptibles a interferencias electromagnéticas o ruido.

En resumen, los puertos de transmisión TX/RX y SDA/SCL del ESP32 proporcionan capacidades esenciales de comunicación para el proyecto del heliostato, permitiendo una gestión eficiente y coordinada del sistema en su conjunto.

2.2.4. Capacidades de procesamiento y memoria

El ESP32 es un microcontrolador de alto rendimiento que ofrece capacidades avanzadas de procesamiento y memoria, adecuadas para manejar aplicaciones complejas que requieren multitarea y operaciones en tiempo real. Este dispositivo está especialmente diseñado para aplicaciones que necesitan un balance entre consumo energético y poder de procesamiento, como en sistemas de control automático, dispositivos IoT y, en este caso, heliostatos autosuficientes.



Capacidades de Memoria

Memoria Interna:

El ESP32 viene con una memoria interna, la cual incluye hasta 520 KB de SRAM interna y opciones de memoria flash externa que se puede expandir mediante SPI flash, habitualmente disponibles hasta 16 MB. Esta capacidad de memoria es suficiente para almacenar programas complejos y gestionar datos de múltiples sensores en tiempo real, necesario para el control preciso y la adaptabilidad de un heliostato.

Soporte para Memoria Externa:

El soporte para memorias externas permite la expansión de las capacidades del dispositivo sin comprometer la velocidad y la eficacia de acceso a los datos. Esto es particularmente útil para almacenar registros de datos históricos del comportamiento del heliostato y condiciones ambientales, facilitando análisis avanzados y ajustes de rendimiento.

2.4. Descripción de los componentes electrónicos empleados

2.4.1. Sensor de corriente continua INA219.

El INA219 es un sensor de corriente y voltaje, diseñado para sistemas de monitoreo de potencia mediante una interfaz de comunicación I2C. Su principal característica es la capacidad de medir tanto la intensidad a través de una resistencia de derivación (R_{shunt}) como el voltaje del bus al que está conectado, lo cual le permite calcular la corriente y la potencia con precisión.

El módulo incorpora un amplificador programable (PGA) para detectar caídas de voltaje a través de esta resistencia, que es de baja impedancia (0.1 ohmios) y alta precisión (1%). Esto es esencial para la medición exacta de la corriente sin introducir una caída de voltaje significativa en el circuito medido. Adicionalmente, el INA219 posee un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits que permite una conversión precisa de la señal analógica a digital, facilitando mediciones de hasta $\pm 3.2A$ con una resolución de hasta 0.8mA.

Esta precisión lo hace ideal para aplicaciones donde la monitorización precisa de la energía es crucial, como en sistemas de gestión de baterías, vehículos eléctricos y sistemas de energía renovable. El sensor también permite configuraciones para diferentes rangos de medición ajustando el valor de calibración, lo que añade versatilidad en diferentes escenarios de aplicación.

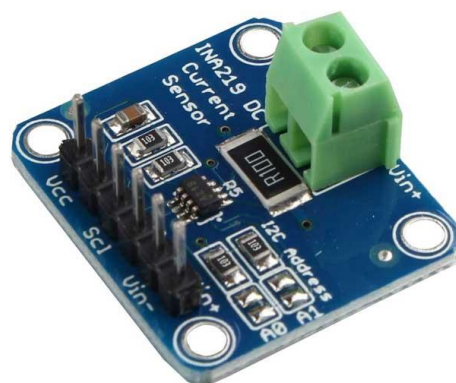


Figura 7.- Sensor INA219.

Características técnicas del INA219

Voltaje de operación: El INA219 puede operar entre 3.0 V y 5.5 V, lo que lo hace compatible con la mayoría de los sistemas lógicos y de potencia en electrónica de consumo y aplicaciones industriales.

Rango de medición de voltaje del bus: Puede medir voltajes de hasta 32 V en el bus, con un rango de entrada diferencial de ± 320 mV en la resistencia de derivación (RShunt), permitiendo la flexibilidad de uso en sistemas con voltajes superiores a la lógica típica de nivel TTL o CMOS.

Resolución del ADC: Incorpora un convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits que ofrece una gran resolución en la medición de la corriente y el voltaje, con resoluciones de medición ajustables que permiten a los usuarios elegir entre mayor resolución o velocidad de muestreo.

Comunicación I2C: Utiliza un interfaz I2C estándar para la comunicación de datos, lo que permite una fácil integración en cualquier sistema micro controlado. Soporta hasta 16 direcciones I2C a través de pines de configuración, facilitando el uso de múltiples dispositivos en el mismo bus I2C.

Configuración de ganancia programable (PGA): Ofrece una ganancia ajustable para el voltaje de derivación, que varía desde 1/8 hasta 1, proporcionando versatilidad en la medida de corrientes desde muy bajas hasta altas con una sola solución.

Modos de operación: El INA219 puede configurarse para medir el voltaje del bus y el voltaje de la resistencia de derivación de forma continua o bajo demanda, lo que proporciona flexibilidad para optimizar el consumo de energía del sensor en aplicaciones sensibles a la energía.

Limitación de corriente del bus: Capaz de manejar hasta 3.2 A de corriente de paso a través de la derivación, dependiendo de la resistencia de derivación (RShunt) seleccionada y la configuración de la ganancia del PGA.

Patillas y funciones

El INA219 es un sensor de medición de corriente y voltaje con una variedad de patillas funcionales que soportan sus capacidades avanzadas de monitoreo. A continuación, se detalla cada una de estas patillas y sus funciones específicas en el dispositivo:

VCC (Alimentación): Esta patilla se conecta a la fuente de alimentación positiva del sensor. Este puede ser alimentado, tal y como se ha indicado anteriormente, con un voltaje entre 3.0 V y 5.5 V, lo que lo hace compatible con la mayoría de los sistemas electrónicos basados en lógica TTL o CMOS.

GND (Tierra): Patilla de conexión a tierra del circuito. Es esencial para el retorno de corriente y la referencia de voltaje para todas las mediciones realizadas por el sensor.

SDA (Data del I2C): Patilla para la línea de datos del protocolo I2C. A través de esta conexión, el INA219 envía y recibe datos al microcontrolador o procesador principal, permitiendo la comunicación y configuración del dispositivo.

SCL (Clock del I2C): Patilla para la línea de reloj del protocolo I2C. Esta patilla sincroniza la transferencia de datos entre el INA219 y el controlador principal.

A0 y A1 (Dirección del I2C): Estas patillas permiten la configuración por hardware de la dirección I2C del dispositivo. Modificando el estado lógico de estas patillas, se permite usar múltiples dispositivos INA219 en el mismo bus I2C, ya que cada combinación de estados en estas patillas resulta en una dirección I2C diferente.

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	SOT-23	SOIC		
IN+	1	8	Analog Input	Positive differential shunt voltage. Connect to positive side of shunt resistor.
IN-	2	7	Analog Input	Negative differential shunt voltage. Connect to negative side of shunt resistor. Bus voltage is measured from this pin to ground.
GND	3	6	Analog	Ground
V _S	4	5	Analog	Power supply, 3 to 5.5 V
SCL	5	4	Digital Input	Serial bus clock line
SDA	6	3	Digital I/O	Serial bus data line
A0	7	2	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.
A1	8	1	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.

Tabla 1.- Pinout INA219 procedente del datasheet.

Estas patillas proporcionan las conexiones necesarias para integrar el INA219 en cualquier sistema de monitoreo de energía. La flexibilidad en la configuración de la dirección I2C y las opciones de señalización de alerta amplían las aplicaciones prácticas del sensor, facilitando su uso en entornos complejos donde múltiples dispositivos necesitan operar sobre un mismo bus de comunicaciones.

Configuración de los registros del INA219

Este sensor utiliza una serie de registros configurables que permiten al usuario ajustar y leer los parámetros de medición del dispositivo. Cada registro consiste en varios bits que controlan funciones específicas. A continuación, se detalla la función de cada bit en sus principales registros.

1. Registro de configuración (Configuration register)

Este registro es crucial para establecer el modo de operación del INA219, y su configuración determina cómo el dispositivo mide la corriente y el voltaje.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
RST	—	BRNG	PG1	PG0	BADC 4	BADC 3	BADC 2	BADC 1	SADC 4	SADC 3	SADC 2	SADC 1	MODE 3	MODE 2	MODE 1
R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1

Tabla 2.- Distribución de bits en el registro de configuración

Está compuesto por varios campos de bits:

- **RST (Bit 15):** La función de este bit es reiniciar todos los registros a sus valores predeterminados, simulando un reinicio de alimentación. Configurar este bit a '1' inicia el reinicio.
- **BRNG (Bit 13):** Este bit selecciona el rango de voltaje del bus. Un 0 configura el rango a 16V, mientras que un 1 lo configura a 32 V.
- **PG (Bits 11-12):** Estos dos bits configuran la ganancia del amplificador programable (PGA) para la medición de voltaje de derivación. Permiten ajustes de 1/1, 1/2, 1/4, y 1/8, que corresponden a rangos máximos de ± 40 mV, ± 80 mV, ± 160 mV, y ± 320 mV respectivamente.
- **BADC y SADC (Bits 7-10 y 3-6):** Estos definen la resolución del ADC para las mediciones del voltaje del bus y del shunt. Las opciones van desde 9 bits hasta 12 bits, lo cual afecta la resolución y el tiempo de muestreo.
- **MODE (Bits 0-2):** Estos bits determinan el modo de operación del dispositivo. Permiten configurar el sensor para medir solo voltaje del bus, solo corriente de derivación, ambas o ninguna (apagado).

2. Registro de voltaje de derivación (Shunt voltage register)

Este registro almacena el último valor medido del voltaje a través de la resistencia de derivación (RShunt). Los valores negativos se obtienen en formato complemento a dos, lo que permite mediciones tanto positivas como negativas, ya que a partir de los datos obtenidos en complemento a dos pueden ser revertidos con la finalidad de poder establecer un valor medio. No tiene bits configurables, ya que es un registro de solo lectura.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SIGN	SD14 ₈	SD13 ₈	SD12 ₈	SD11 ₈	SD10 ₈	SD9 ₈	SD8 ₈	SD7 ₈	SD6 ₈	SD5 ₈	SD4 ₈	SD3 ₈	SD2 ₈	SD1 ₈	SD0 ₈

Tabla 3.- Distribución de bits en el registro de voltaje de derivación.

3. Registro de Voltaje del bus (*Bus voltage register*)

Este registro contiene el voltaje del bus medido. Similar al registro de voltaje de derivación, es de solo lectura y no tiene bits configurables. El voltaje obtiene con un desplazamiento de 3 bits a la derecha. Para la conversión del valor leído a milivoltios se multiplicará por un factor de conversión específico.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
BD12	BD11	BD10	BD9	BD8	BD7	BD6	BD5	BD4	BD3	BD2	BD1	BD0	—	CNVR	OVF

Tabla 4.- Distribución de bits en el registro de voltaje del bus.

4. Registro de corriente (*Current register*)

El registro de corriente del INA219 permite la lectura de la corriente que fluye a través de la resistencia de derivación. Como con el registro de voltaje de la derivación, los valores aquí también están en formato complemento a dos, lo que permite representar corrientes tanto positivas como negativas. Este registro no posee bits configurables y se actualiza automáticamente con cada ciclo de medición.

5. Registro de potencia (*Power register*)

El registro de potencia proporciona la medición de la potencia calculada basada en las lecturas de voltaje de bus y corriente actual. Al igual que los registros de corriente y voltaje de derivación, el registro de potencia es de solo lectura y su valor se deriva de las mediciones actuales de corriente y voltaje del bus.

6. Registro de calibración (Calibration register)

El registro de calibración es utilizado para ajustar la medición de corriente y potencia en función del valor de la resistencia de derivación y las características deseadas de medición. Los bits en este registro determinan el valor de calibración que afecta la conversión de corriente a digital.

Estos dos últimos registros no se han empleado en este proyecto, pero es interesante comentar su funcionalidad para posibles modificaciones en el futuro.

2.4.2. Módulo cargador de baterías TP4056.

Se trata de un controlador de carga para baterías de iones de litio de celda única que se destaca por su diseño lineal y su integración de funciones de gestión de carga en un encapsulado compacto SOP-8. Las características clave del TP4056 se describen en detalle a continuación, enfatizando su utilidad y eficiencia en aplicaciones portátiles y sistemas alimentados por baterías.

Ciclo completo de Carga Constante/Corriente Constante

El módulo implementa un ciclo de carga que combina las etapas de corriente y voltaje constantes para optimizar la carga de la batería y maximizar su vida útil. Durante la fase de corriente constante, el dispositivo mantiene constante la intensidad que suministra a la batería, acelerando el proceso de carga sin comprometer la seguridad. Una vez que la batería alcanza un voltaje predefinido, 4.2 V con una precisión de $\pm 1.5\%$, cerca de su capacidad máxima, el TP4056 cambia a la fase de voltaje constante, reduciendo gradualmente la corriente de carga para mantener el voltaje de la batería y evitar la sobrecarga, tal y como se observa en la *Figura 8*.

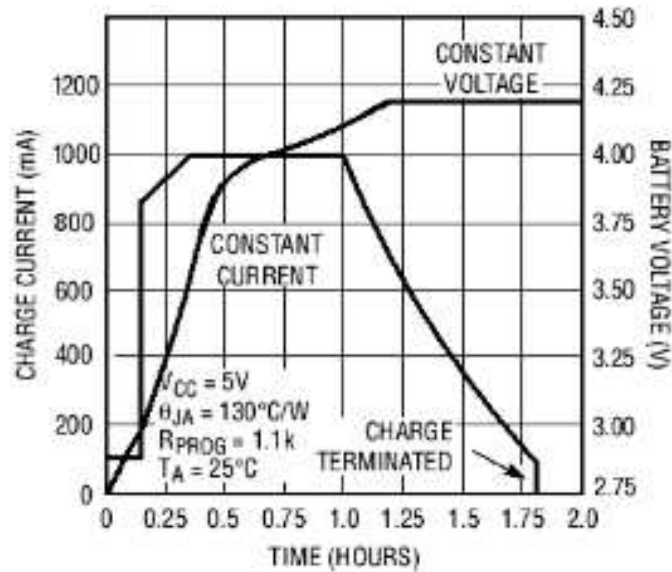


Figura 8.- Ciclo de carga donde se representan dos gráficas: una a corriente constante y otra a voltaje constante del regulador TP4056.

Regulación térmica

Una característica distintiva de este módulo es su capacidad para regular la temperatura del circuito interno mediante retroalimentación térmica. Esta función ajusta la corriente de carga para limitar la temperatura del chip durante operaciones de alta potencia o bajo condiciones de alta temperatura ambiental. Esto no solo protege al chip y la batería contra el sobrecalentamiento, sino que también asegura una carga segura y estable.

Programación de la corriente de carga

Permite al usuario programar la corriente de carga a través de una resistencia externa conectada al pin de programación (PROG). Esta flexibilidad en la configuración de la corriente de carga hace que el TP4056 sea adaptable a una variedad de especificaciones de batería, lo que permite a los diseñadores optimizar el rendimiento de carga en función de las necesidades específicas de la aplicación.

Posibilidad de prescindir de componentes externos adicionales

Una ventaja a destacar es que no requiere diodos de bloqueo ni resistencias de detección de corriente externas debido a su arquitectura interna de PMOSFET. Esto reduce la cantidad de componentes necesarios en la placa de circuito, minimizando el espacio y el costo del sistema total, a la vez que mejora la eficiencia de la carga al eliminar pérdidas adicionales asociadas con componentes externos.

Indicadores de estado de carga

Este cargador de baterías de litio está equipado con dos pines de estado que proporcionan indicaciones visuales o señales lógicas del progreso de la carga. Estos pines permiten al diseñador del sistema implementar indicadores LED o integrar lógica de control para monitorizar el estado de la carga, como la detección de la terminación de la carga o la presencia de voltaje de entrada, lo cual es esencial para aplicaciones en las que la retroalimentación del estado de carga es crítica.

Especificaciones técnicas del TP4056

Estas especificaciones muestran sus capacidades como un controlador de carga avanzado para baterías de iones de litio de celda única. A continuación, se detallan estas especificaciones, destacando los aspectos más relevantes para aplicaciones que requieren una gestión de carga eficiente y segura.

Voltaje de entrada (VCC):

El rango de voltaje de entrada operativo es de 4.0 V a 8.0 V, lo que permite que se alimente tanto desde puertos USB estándar como desde paneles solares, ofreciendo versatilidad en las opciones de fuente de alimentación.

Corriente de carga programable:

La corriente de carga máxima es de 1000 mA, que puede ser ajustada mediante la conexión de una resistencia externa al pin PROG del dispositivo.

Voltaje de carga fijo:

El voltaje de carga está preestablecido a 4.2 V con una precisión del 1.5%, lo cual es ideal para la mayoría de las baterías de iones de litio, asegurando una carga completa sin exceder el límite de voltaje seguro para la célula.

Eficiencia de la carga:

Emplea un método de carga lineal, lo cual es menos eficiente que los métodos de carga conmutados pero resulta en una solución más simple y menos costosa en términos de diseño de circuito y componentes externos.

Características de seguridad:

Incluye protección contra sobrecarga mediante la terminación automática de la carga cuando la corriente de carga cae por debajo del 10% del valor programado.

El dispositivo también tiene un umbral de carga por goteo de 2.9V, asegurando que las baterías con un voltaje extremadamente bajo sean precargadas a un nivel seguro antes de aplicar la corriente de carga completa.

Modos de operación:

Ofrece modos de operación flexibles, incluyendo un modo de suspensión de baja potencia que reduce significativamente el consumo de corriente del dispositivo cuando no está en carga activa.

Indicadores de estado:

Tiene dos pines de salida indican el estado de la carga, permitiendo una fácil integración de indicadores LED o señales lógicas para mostrar el progreso de la carga y cualquier condición de error.

Estas especificaciones técnicas del TP4056 resaltan su utilidad como un controlador de carga robusto, especialmente adecuado para aplicaciones portátiles donde la gestión eficiente y segura de la batería es crucial. Su

simplicidad de diseño y las funciones integradas de protección y monitoreo proporcionan una solución efectiva y de bajo costo para la carga de baterías de iones de litio en una diversidad de dispositivos electrónicos.

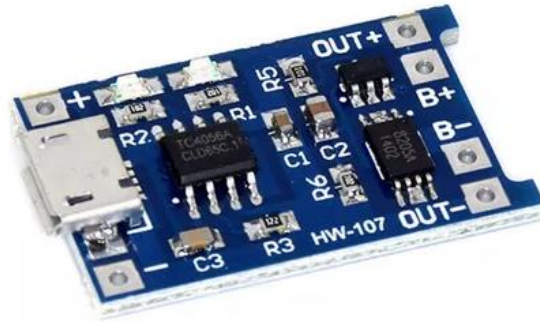


Figura 9.- Imagen del módulo TP4056.

2.4.3. Batería de litio INR18650-35E.

Especificaciones de capacidad y carga.

Las especificaciones de capacidad y carga de la batería Samsung INR18650-35E son fundamentales para garantizar un uso eficiente y seguro en aplicaciones que requieren una gestión energética consistente, como en el proyecto del heliostato autosuficiente. A continuación, se detallan dichas especificaciones según el fabricante, las cuales se referencian en la hoja de características anexada al documento:

Capacidad de descarga estándar

Esta batería posee una capacidad mínima de descarga de 3,350 mAh, medida bajo condiciones estrictamente controladas para asegurar precisión y consistencia. El proceso de carga se realiza a una corriente constante de 1,700 mA hasta alcanzar un voltaje de 4.2 V, y se detiene cuando la corriente de carga disminuye a 68 mA. La descarga se efectúa a un ritmo constante de 680 mA hasta que el voltaje de la batería desciende hasta el voltaje de corte establecido en 2.65 V. Este método de carga y descarga se lleva a cabo a temperatura ambiente, lo cual es crucial para mantener las condiciones estandarizadas y prevenir variaciones que podrían afectar la performance de la batería. Estas prácticas no solo ayudan a maximizar la eficiencia de la carga, sino que también contribuyen a prolongar la vida útil de la batería al evitar el estrés excesivo durante el ciclo de carga y descarga, asegurando así que la batería opera dentro de sus capacidades óptimas en términos de rendimiento y durabilidad.

Para obtener las curvas de dicha batería que se observan a continuación, se realizaron pruebas de descarga. Estas consistían en cargar completamente la batería mediante un cargador específico, con el cual se puede regular el flujo de intensidad con el que cargarlas para dañarlas de forma mínima. Con su carga máxima alcanzada, se dejaban descargando a intensidad constante mediante una resistencias de potencia hasta alcanzar el valor mínimo pudiendo así detallar

la durabilidad de estas y poder contrastar la información obtenida con la proporcionada por el fabricante.

Según se puede observar en las siguientes gráficas, se llega a la conclusión de que las características que proporciona el fabricante no son acordes a las registradas, ya que se observa un desgaste drástico tras la primera descarga de la batería.

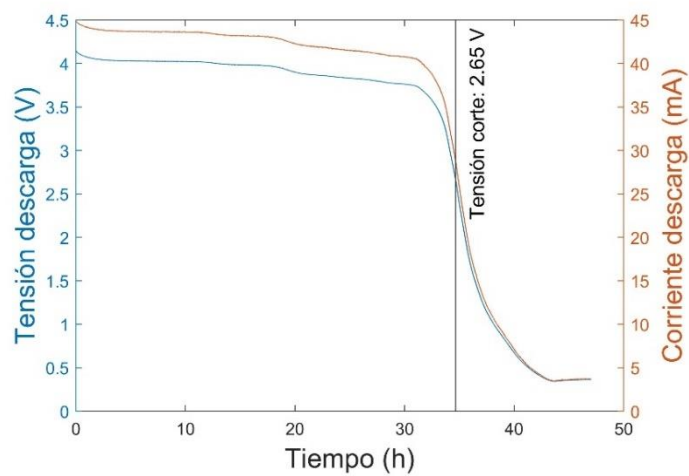


Figura 10.- Representación gráfica de los datos registrados durante la primera descarga de la batería de litio.

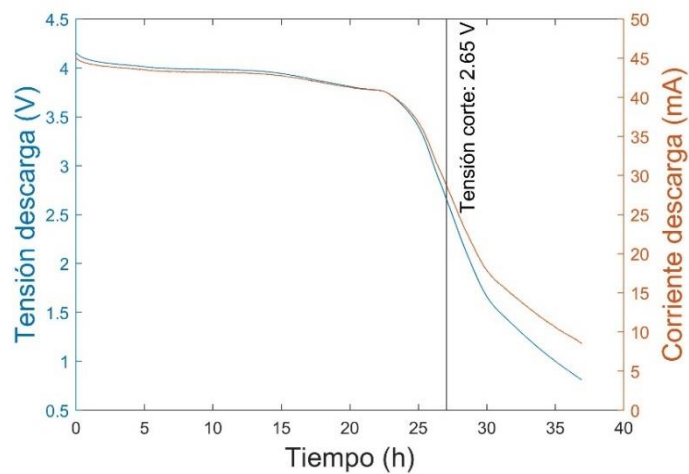


Figura 11.- Representación gráfica de los datos registrados durante la segunda descarga de la batería de litio.

El fabricante especifica que la capacidad nominal de la batería equivale a unos 3350 mAh. Esta afirmación queda descartada por la *Figura 12*, ya que como se puede observar en los datos registrados, la batería presenta una capacidad de unos 1600 mA aproximadamente (tomando como criterio de carga nula la tensión de corte 2.65 V), valor muy lejano al especificado en la hoja de características, prácticamente la mitad del indicado por el fabricante.

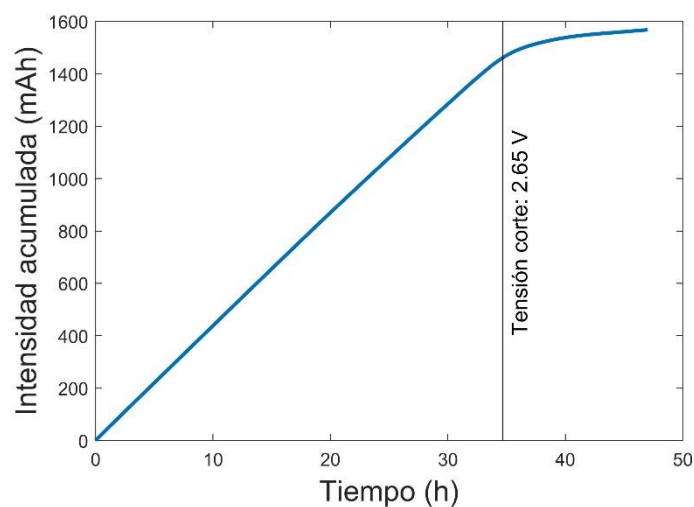


Figura 12.- Representación gráfica de la intensidad acumulada durante la primera descarga de la batería de litio.

Sin embargo, una vez que se produce la primera descarga y se procede a cargar dicha batería esta presenta una caída considerable de su capacidad máxima, ya que al descarga por segunda vez la misma batería se observa que la vida útil de esta ha sido afectada bruscamente. Esto se debe a que al realizar la primera descarga de la batería, esta sobrepasó su tensión de corte, produciendo así un desgaste severo.

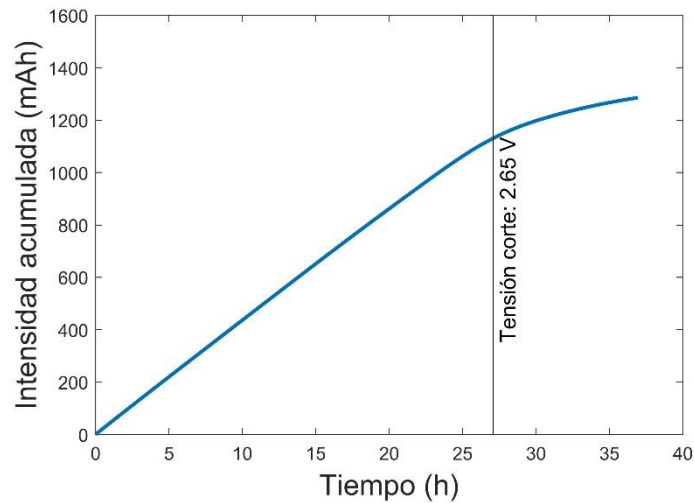


Figura 13.- Representación gráfica de la intensidad acumulada durante la primera descarga de la batería de litio.

Voltaje de carga y método

El voltaje de carga está fijado en 4.2V, con una precisión del $\pm 1.5\%$, lo cual es crítico para mantener la integridad de la celda y evitar la sobrecarga, que podría reducir la vida útil de la batería o causar daños. El método de carga recomendado para esta batería es CC-CV (Corriente Constante - Voltaje Constante). Este método ha sido anteriormente explicado para entender el correcto funcionamiento del regulador de carga TP4056, el cual es efectivo para maximizar la capacidad de la batería y preservar su ciclo de vida.

Corriente de carga

La corriente de carga estándar es de 1700 mA, lo cual es adecuado para un ciclo de vida óptimo de la batería, mientras que para propósitos de ciclo de vida extendido, se recomienda una corriente de carga de 1020 mA. Además, la batería admite una corriente máxima de carga de 2000 mA para situaciones donde se requiere una carga más rápida, aunque no se recomienda para el mantenimiento del ciclo de vida.

Tiempos de carga

El tiempo estándar de carga, cuando se aplica la corriente estándar de 1700 mA, es aproximadamente de 4 horas, proporcionando un equilibrio adecuado entre rapidez y cuidado de la salud de la batería.

Rendimiento bajo varias condiciones

El rendimiento de la batería Samsung INR18650-35E bajo condiciones adversas es crucial para evaluar su aplicabilidad en entornos variados, especialmente en proyectos como un heliostato autónomo, donde las condiciones pueden fluctuar significativamente.

Esta batería ha sido probada para manejar diversas corrientes de descarga, garantizando un rendimiento firme en aplicaciones que demandan tanto cargas de baja como de alta intensidad. Puede soportar una corriente de descarga continua de hasta 8000 mA, y corrientes más altas de hasta 13000 mA en modo no continuo, lo que permite su uso en aplicaciones de alta potencia sin degradar significativamente la integridad de la batería.

En un rango de temperaturas, desde -10°C hasta 60°C, esta batería, durante el periodo de descarga, puede operar de manera eficiente. Este rango permite que la batería funcione en condiciones ambientales extremas, asegurando la continuidad operativa del heliostato incluso bajo variaciones significativas de la temperatura.

Durante la fase de carga, la batería es capaz de ser cargada de manera segura y eficaz en un rango de temperatura de 0°C a 45°C, asegurando así una recarga eficiente en condiciones ambientales normales sin necesidad de sistemas de regulación de temperatura adicionales.

El conocimiento de estas capacidades permite a los diseñadores de sistemas y a los ingenieros elegir la batería INR18650-35E para aplicaciones que requieren no solo una energía fiable y de larga duración, sino también una

batería que pueda sostener su rendimiento bajo un amplio abanico de condiciones operativas y ambientales.

Además, esta batería incorpora múltiples características diseñadas para optimizar su seguridad y durabilidad, la protección contra la sobrecarga es una de ellas, la cual detiene automáticamente la carga una vez que la batería alcanza su voltaje máximo de 4.2V. Este sistema previene daños por exceso de carga, lo que podría comprometer la integridad de la batería y potencialmente causar fallos o problemas de seguridad como sobrecalentamiento o incluso incendios. Para manejar el calor generado durante la carga y la descarga, esta incluye características de control térmico que aseguran que la temperatura de la batería se mantenga dentro de un rango seguro. Dichas características previenen el sobrecalentamiento que podría llevar a daños estructurales de la batería o reducir su capacidad y vida útil.

Estas han sido sometidas a diversas pruebas de seguridad estándar, incluyendo pruebas de cortocircuito, sobre carga, y pruebas de impacto térmico. Estas pruebas aseguran que la batería pueda resistir condiciones adversas sin sufrir daños críticos que pudieran comprometer su funcionamiento o seguridad reforzando así la durabilidad de dicha batería. Algunas pruebas a las que se someten estas son: exposición a altas temperaturas, aplicaciones de sobrevoltaje, y resistencia a impactos físicos.

Finalmente, esta batería incorpora un recubrimiento aislante y una carcasa gruesa que la protegen contra cortocircuitos, daños mecánicos y exposición a elementos corrosivos.

Cada una de estas características de seguridad y durabilidad del Samsung INR18650-35E asegura que la batería no solo cumple con los requisitos estándar de la industria en términos de rendimiento y seguridad, sino que también está preparada para soportar las demandas específicas de proyectos energéticamente intensivos y críticos.



Figura 14.- Imagen de una batería de litio modelo INR18650-35E de Samsung.

2.4.4. Convertidor DC-DC SO9

Flexibilidad de voltaje de entrada del convertidor DC-DC SO9

El convertidor DC-DC SO9 está diseñado para aceptar un amplio rango de voltajes de entrada, específicamente de 3 V a 15 V. Esta característica es fundamental para aplicaciones donde la fuente de alimentación puede variar, como en sistemas que operan con diferentes configuraciones de baterías o que se integran en entornos con fuentes de energía renovable, como paneles fotovoltaicas.

La capacidad del convertidor para operar con un mínimo de 3 V lo hace particularmente útil en escenarios donde la fuente de energía tiene un voltaje relativamente bajo, común en baterías de litio con bajo estado de carga o células fotovoltaicas en condiciones de radiación desfavorable.

Voltaje y corriente de salida estables

El convertidor DC-DC SO9 proporciona una salida de 3.3 V con una capacidad de corriente de hasta 0.6 A. Esta configuración de salida es ideal para alimentar una variedad de dispositivos electrónicos y circuitos que requieren un voltaje específico de 3.3 V para su operación. La estabilidad del voltaje de salida es vital para asegurar el funcionamiento confiable y seguro de los componentes electrónicos que son sensibles a las fluctuaciones de voltaje.

La corriente de salida de 0.6 A permite que el convertidor sea utilizado en aplicaciones que no solo requieren voltaje estable sino también una buena cantidad de corriente, como pequeños motores, luces LED y otros dispositivos electrónicos que operan a 3.3 V. La capacidad de proporcionar hasta 0.6 A asegura que el convertidor pueda manejar cargas moderadas sin caída de voltaje o sobrecalentamiento.

Eficiencia de conversión del convertidor DC-DC SO9

El convertidor DC-DC SO9 presenta una eficiencia de conversión del 75%. Esta métrica es crucial en la evaluación de la capacidad del convertidor para transformar la energía de entrada en energía de salida de manera eficaz, con una mínima pérdida de energía en forma de calor. La eficiencia del 75% indica que el convertidor es capaz de mantener una buena relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, un factor importante para sistemas que operan con un suministro de energía limitado o en aplicaciones donde la conservación de la energía es prioritaria.

Desde el punto de vista técnico, la eficiencia de conversión es afectada por varios factores incluyendo las características del circuito interno del convertidor, como la calidad de los componentes utilizados (inductores, diodos, capacitores) y la topología del circuito. En convertidores como el SO9, que operan con topología buck-boost, la eficiencia puede variar dependiendo del voltaje de entrada y la carga conectada al dispositivo.

Bajo ruido y ripple

El convertidor DC-DC SO9 garantiza un nivel bajo de ruido y ripple, con valores menores a 50 mVp-p. Este parámetro es básico en aplicaciones donde la calidad de la energía es crítica, como en sistemas de comunicaciones, equipos de audio de alta fidelidad o dispositivos sensibles a las interferencias electrónicas. Un bajo nivel de ruido y ripple se traduce en una salida de voltaje más limpia y estable, lo cual es vital para mantener el rendimiento y la fiabilidad de los dispositivos electrónicos alimentados por el convertidor.

Técnicamente, el ruido y el ripple en un convertidor DC-DC pueden originarse por múltiples fuentes, incluyendo la conmutación de los transistores, la respuesta dinámica de los componentes pasivos y las perturbaciones electromagnéticas del entorno. Controlar estos factores implica un diseño cuidadoso del circuito, seleccionando adecuadamente los componentes y optimizando la disposición física de los mismos para minimizar las emisiones y la recepción de interferencias. Además, el uso de filtros adicionales en la salida del convertidor puede ser necesario para aplicaciones que requieren un nivel extremadamente bajo de ruido y ripple.

Dimensiones compactas del convertidor DC-DC SO9

El convertidor DC-DC SO9 se distingue por su diseño compacto, con dimensiones de 19 mm de largo, 14 mm de ancho y 4 mm de alto. Esta pequeña forma es fundamental donde el espacio es un recurso crítico y limitado. La capacidad de incorporar un convertidor de eficiencia adecuada en un espacio tan reducido facilita su integración en una amplia gama de dispositivos electrónicos, incluidos sistemas portátiles, dispositivos de IoT, y aplicaciones en robótica donde la economía de espacio mejora la estética y la funcionalidad del diseño final.



Figura 15.-Imagen del convertidor DC-DC modelo SO9

2.4.5. Celda fotovoltaica.

La celda fotovoltaica que se emplea es un panel solar de 5 V con una capacidad de corriente de salida de 60 mA y una potencia máxima de 0.3 W. Este tipo de panel es ideal para aplicaciones de baja potencia debido a su capacidad de producir energía de manera eficiente incluso en condiciones de baja radiación.

El panel está construido con células solares policristalinas, conocidas por su buena relación costo-efectividad y eficiencia moderada en comparación con otras tecnologías solares. Estas células están encapsuladas en resina epoxi sobre un sustrato de PCB de fibra de vidrio, lo que les proporciona una protección robusta sin sacrificar la eficiencia.

En términos de durabilidad, la celda es resistente al agua, rayaduras y radiación UV, lo que la hace adecuada para uso en exteriores y en condiciones ambientales adversas.



Figura 16.- Imagen de panel solar empleado.

2.4.6. Módulo controlador Mini L298N.

El L298N es un módulo controlador de motor que permite el manejo de dos motores de corriente continua con control simultáneo de velocidad y dirección mediante un IC de puente H doble. Este módulo se adecúa a aplicaciones de

robótica y automatización debido a su capacidad para manejar altas tensiones y corrientes, así como su compatibilidad con señales lógicas TTL estándar.

El chip principal del módulo L298N es el IC L298, un controlador de motor de puente completo de alta corriente y voltaje. Soporta una tensión de operación de entre 2 V y 10 V, y puede manejar corrientes máximas de hasta 2 A por canal. Este circuito integrado permite controlar cargas inductivas como relés, solenoides y motores de corriente continua.

El L298N es utilizado ampliamente en proyectos de robótica para controlar la dirección y la velocidad de motores DC. Su capacidad para invertir la dirección de giro del motor mediante el ajuste de la polaridad de la tensión de entrada lo hace indispensable en proyectos donde se requiera control preciso del movimiento. En el contexto de un heliostato, el L298N puede ser utilizado para controlar los motores que ajustan la posición de los espejos para seguir la trayectoria del sol.

El módulo utiliza técnicas de puente H y modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar la dirección y velocidad de los motores. Este permite cambiar la dirección de los motores alternando la polaridad de las tensiones aplicadas, mientras que la PWM ajusta la velocidad del motor variando la tensión media aplicada a los terminales del motor.



Figura 17.- Imagen de un módulo controlador de motor, modelo Mini L298N.

Además, el módulo está equipado con un regulador de voltaje integrado 78M05 que proporciona una salida de 3.3 V cuando se alimenta con un voltaje de hasta 10 V, lo que es ideal para alimentar circuitos adicionales o el microcontrolador en el mismo proyecto sin necesidad de una fuente de alimentación adicional. Esto simplifica el diseño y reduce el espacio necesario en la placa, haciéndolo ideal para proyectos compactos y portátiles.

2.4.7. Motor de corriente continua G12-N20

El motor GA12-N20 es un motor de corriente continua compacto, adecuado para aplicaciones que requieren control preciso de velocidad y tamaño reducido. A continuación se detallan sus características clave de forma concisa:

- Voltaje de Operación: Funciona a 3V, apto para dispositivos alimentados por baterías.
- Velocidad de Rotación: Ofrece una velocidad de 15 rpm, proporcionando un movimiento controlado y preciso gracias a una reducción mecánica.
- Construcción Robusta: Cuenta con una carcasa de metal, proporcionando durabilidad y resistencia.
- Dimensiones Compactas: Típicamente posee un diámetro de 12 mm y una longitud que no excede los 30 mm, facilitando su integración en espacios limitados.
- Engranajes Internos: Incluye un sistema de engranajes para reducir la velocidad y aumentar el torque, crucial para operaciones que requieren fuerza en un compacto diseño.



Figura 18.- Imagen de un motor de corriente continua, modelo GA12-N20

2.4.8. Adaptador serial USB a TTL - FT232RL.

El FT232RL es un módulo adaptador serial USB a TTL que facilita la interfaz entre dispositivos de comunicación serial TTL y un ordenador a través de un puerto USB. Este módulo es particularmente valioso en proyectos de electrónica donde se necesita actualizar periféricos legados a USB o para la programación de microcontroladores que no cuentan con un puerto USB nativo.

El FT232RL juega un papel importante en la comunicación entre el microcontrolador ESP-32 y un ordenador sin necesidad de alimentar el sistema con una fuente externa a través del USB, básico para mantener la integridad del ensayo de autosuficiencia del heliostato, permitiendo que el sistema siga operando bajo su configuración de alimentación autónoma mientras se transmite información al ordenador.

Las características del componente son las siguientes:

- Voltaje de Operación: Puede trabajar con 5 V o 3.3 V, seleccionables mediante un jumper, lo que permite su compatibilidad con una variedad de dispositivos.
- Capacidades de Comunicación: Soporta tasas de transferencia de datos desde 300 baudios hasta 3 Mbaud.
- Buffers de Transmisión y Recepción: Tiene un buffer de recepción de 128 bytes y un buffer de transmisión de 256 bytes, facilitando la gestión de altos volúmenes de datos.
- Indicadores LED: Incluye señales LED para indicar la transmisión y recepción de datos, ayudando en la depuración y el monitoreo del estado de las comunicaciones.

Tiene distintas aplicaciones relevantes como:

- Programación de Microcontroladores: Utilizado comúnmente para programar dispositivos como Arduino Pro Mini y otros microcontroladores que no disponen de conexión USB directa.

- Conversores USB a Serial: Proporciona una solución eficaz para convertir señales USB a formatos seriales como RS232, RS422 o RS485.
- Interfaces de Dispositivos: Puede ser usado para establecer comunicaciones seriales con una variedad de dispositivos electrónicos, incluyendo lectores de tarjetas, módulos GPS y sistemas de control industrial.

Este módulo asegura que la configuración de prueba se mantenga autónoma y precisa, facilitando la supervisión y ajuste del sistema sin alterar su configuración de alimentación energética independiente.



Figura 19. Imagen de un adaptador USB-Mini a RS232, modelo FT232RL.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA.

3.1. Diagrama de bloques.

3.1.1. Conexiones del sistema.

Para el diseño del sistema de gestión de energía del heliostato autónomo, es esencial realizar un diagrama de bloques para proporcionar una visión clara de cómo cada componente interactúa dentro del sistema, facilitando la comprensión y el diseño detallado del proyecto. A continuación, se describe la funcionalidad de cada componente:

1. **ESP32 – Controlador principal.**

Este microcontrolador es la base de este proyecto el cual se encarga de gestionar y verificar una correcta comunicación entre todos los sensores y actuadores del proyecto. Además, es el responsable de que todos los datos recopilados por los periféricos a los que se encuentra conectado sean procesados de forma precisa y eficiente.

El ESP32 interactúa directamente con los sensores de corriente y voltaje **INA219** a través del puerto de comunicación I2C. Esta comunicación se basa en dos componentes básicos, un “Maestro” y un “Esclavo”.

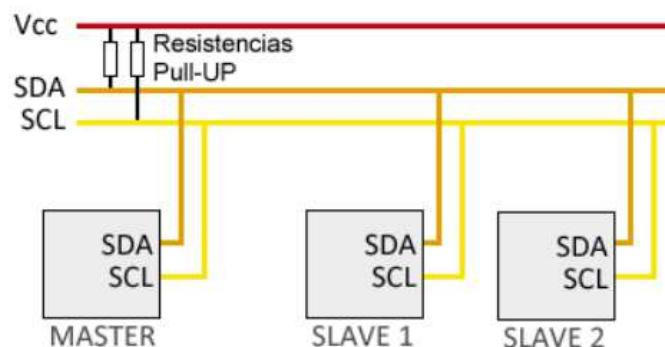


Figura 20.- Esquema gráfico del puerto de comunicación I2C con resistencias pull-up.

En la *Figura 20* se representa una conexión típica de tres dispositivos interconectados por un bus el cual está formado por dos líneas, una denominada Serial Data (SDA) y la otra Serial Clock (SCL).

El protocolo I2C permite una comunicación segura entre dispositivos digitales y muy fácil de encontrar en sensores ya que la mayoría de los dispositivos electrónicos poseen la posibilidad de emplear dicha comunicación. Sin embargo, presenta algunas desventajas en cuanto a latencia de envío se refiere, ya que en un esquema donde se presentan un alto número de esclavos puede desarrollar un retardo significativo en dicha transmisión de datos.

Otro componente con el que está directamente interconectado el microcontrolador es el módulo **Mini L298N (Puente H)**. La explicación de dicha interconexión es debida a que el heliostato necesita ir actualizando su posición respecto con la del sol, con la finalidad de obtener de forma eficiente la luz solar, maximizando así la energía obtenida. Para realizar dicha comunicación se emplean dos puertos analógico-digital.

Este tipo de conversores pronunciados anteriormente, se tratan de puertos con una entrada digital de voltaje a un valor binario. Esta señal digital, es conectada a la entrada del dispositivo, en este caso al puente H, con el objetivo de digitalizar dicha entrada realizando de forma periódica medidas de la amplitud de la señal, redondeando constantemente dichos valores y registrándolos como números enteros en cualquier tipo de memoria.

En definitiva, la comunicación analógica-digital (ADC) se basa en convertir la tensión comprendida entre 3.3 V y 0 V que proporciona el microcontrolador en una señal digital 0 o 1 para así controlar la dirección de giro del motor **G12-N20**.

2. INA219 – Sensor de corriente y voltaje.

El INA219 es el sensor principal del proyecto, el cual tiene como función medir la corriente y la tensión, tanto del bus como la de la resistencia de derivación (RShunt), de la batería de litio **INR18650-35E** y de la célula fotovoltaica. La correcta configuración y representación de los datos recopilados por este sensor son fundamentales para la base de este proyecto, ya que el objetivo de este es el monitorizar de la forma precisa y detallada el estado de ambos componentes, para así poder controlar en todo momento la situación en la que se encuentra el heliostato, en cuanto estado energético se refiere.

Para que dichos datos sean procesados y transmitidos al microcontrolador, se emplea la comunicación I2C.

3. INR18650-35E – Batería de litio.

Esta batería se trata de la principal fuente de almacenamiento que sustenta el sistema desarrollado. Este componente se encuentra conectado al regulador de carga TP4056 cuya funcionalidad se detalla más adelante.

4. TP4056 – Regulador de carga.

Este componente es mencionado anteriormente puesto que se encuentra unido a la batería con la finalidad de regular su carga de forma segura y eficiente para asegurar su vida útil prolongada, protegiendo a esta de posibles intensidades residuales que puedan perjudicar su durabilidad. Además de encontrarse interconectada a la batería, este regulador alimenta al convertidor **DC-DC SO9** y al puente H, **Mini L298N**, de forma controlada a través de la propia batería.

5. Mini L298N – Puente H.

El Mini L298N es el encargado de transformar la tensión recibida por los puertos ADC a los que está asociado y que anteriormente han sido explicados. Además de gestionar el movimiento de dirección del motor encargado de posicionar al propio heliostato para seguir la posición del sol

6. DC-DC S09 – Regulador de tensión en continua.

Este convertidor tiene como objetivo mantener de forma constante la tensión de alimentación del ESP32 a 3.3 V, para así asegurar un funcionamiento estable del sistema y un correcto desempeño de la gestión y recopilación de datos procedentes de los sensores. Es obvio que dicho regulador se encuentra conectado a la alimentación del microcontrolador por los argumentos anteriormente detallados, siendo este un punto clave en este proyecto puesto que una alimentación inestable del microcontrolador desencadenaría un error sobre la adquisición y procesamiento de datos, produciendo así una monitorización del sistema errónea.

7. FTDI232 – Conversor de comunicación serie a USB

La función que desempeña el FTDI232 es la de transmitir información entre dispositivos seriales y un puerto USB, siendo este fundamental para la recopilación de los datos procesados por el microcontrolador.

Dicha transmisión de datos la realiza a través de los puertos TX y RX del ESP32, técnicamente conocida como comunicación UART. Este tipo de comunicación es asíncrona, es decir, que no está asociada a ningún reloj que marque la transmisión de datos. La patilla TX (Transmit) es la encargada de enviar datos desde el ESP32 al componente externo al sistema para la recopilación de datos, mientras que la patilla RX (Recieve) tiene como objetivo recibir datos de ese dispositivo externo en el caso de que fuera necesario.

Hay que entender que el conversor de la comunicación UART a USB es básico para la recopilación de datos registrados por el sistema, ya que gracias a que este componente es capaz de separar la alimentación introducida a través del puerto USB de los hilos de comunicación, ha hecho que nuestro sistema sea totalmente robusto en el aspecto de que se trata de un heliostato completamente autónomo.



Se hace hincapié en esto último, debido a que es fundamental para este proyecto que los datos recopilados, tanto los registrados en la célula fotovoltaica como los del suministro de energía de la batería, no se vean alterados por fuentes externas de alimentación, ya que los datos del sistema se van guardando cada 20 segundos a través de una rutina desarrollada en MatLab. Por ello es indispensable aislarse de la alimentación proporcionada por el puerto USB, para no alterar el estado de carga de la batería y que su única fuente de energía sea la célula fotovoltaica.

3.1.2. Diseño del diagrama.

El diagrama de bloques es una representación gráfica de las interconexiones entre los componentes del sistema de este proyecto donde se facilita la comprensión del diseño al ilustrar las relaciones y flujos de información entre los distintos elementos. Este permite visualizar como los sensores, actuadores y el microcontrolador interactúan para desempeñar el objetivo establecido. A continuación se muestra la estructura de dicho diagrama:

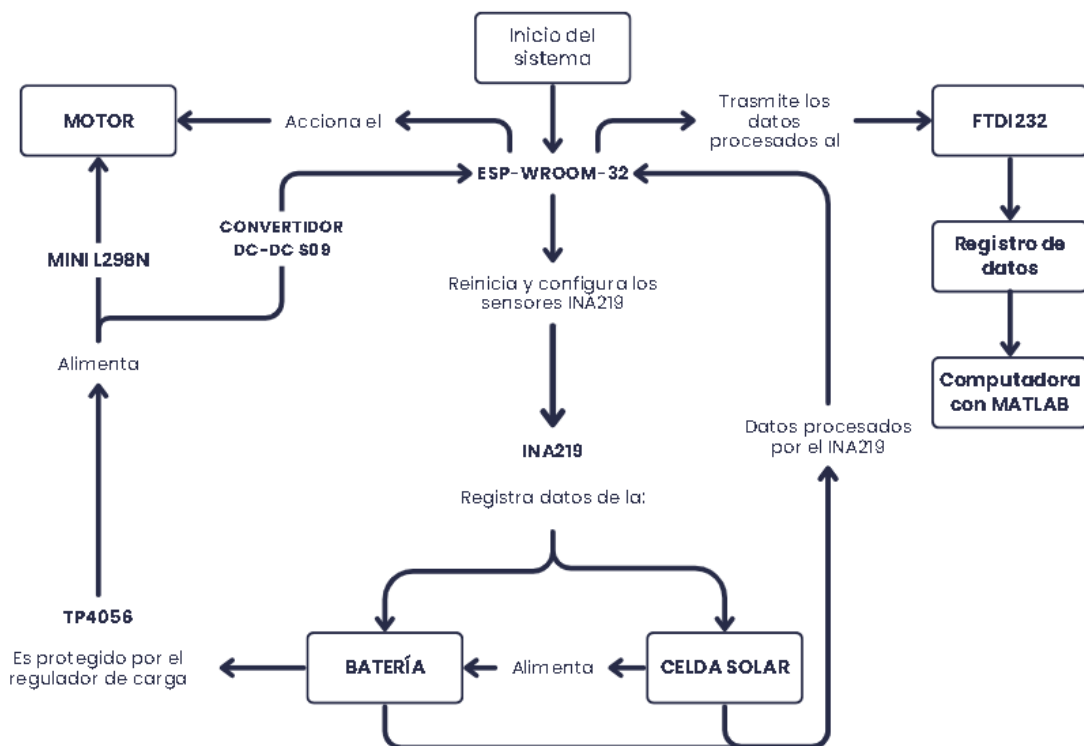


Figura 21.- Diagrama de bloques con el funcionamiento del sistema.

3.1.3. Justificación de los componentes.

En este apartado se defiende la elección de cada componente electrónico del sistema. Esta justificación se realiza en base a las especificaciones que presenta cada uno de estos.

Existe varias combinaciones posibles de componentes electrónicos para realizar el sistema de monitorización de carga de un heliostato de pequeño tamaño. Varias de las razones por las que se han elegido dichos componentes se detallan a continuación.

Si nos detenemos y analizamos el proyecto, la base de este es un microcontrolador encargado de administrar de forma precisa y eficiente toda la información obtenida en cada medida registrada. Dentro de la familia del **ESP32** hay múltiples opciones, de las cuales gran parte de ellas son compatibles con la función que desempeña en este sistema. La justificación principal del porqué se ha elegido un microcontrolador ESP32 es simple, este microcontrolador tiene un bajo consumo de energía, convirtiéndolo así en una alternativa conveniente para dispositivos que se encuentran alimentados por batería, como es el caso. Presenta también un alto nivel de integración y es bastante versátil ya que posee conectividad Bluetooth y Wifi, siendo esta última esencial para el proyecto final, ya que la finalidad de este es poder monitorizar las medidas de forma remota. Además, es un dispositivo muy económico, lo que va en línea con los objetivos de contribuir al desarrollo de un heliostato de bajo coste.

Seguidamente, según escala de importancia de los componentes del proyecto, se encuentra el sensor **INA219**. Este componente es una buena opción para medir tanto la corriente como la tensión ya que destaca por sus características avanzadas, precisión y facilidad de integración. Las características por las cuales se ha decantado por este componente es que permite realizar medidas de forma bidireccional, es decir, es capaz de medir la corriente entrante y saliente del sistema, permitiendo monitorizar la carga y

descarga de la batería encargada de sustentar el funcionamiento del heliostato. Además, ofrece una alta precisión en las mediciones de corriente y voltaje, esto es debido a que su convertidor analógico digital interno permite resoluciones de hasta 12 bits, proporcionando así una medición detallada y precisa imprescindible para un control exhaustivo del balance de energía que está generando y consumiendo el prototipo.

Es capaz de operar en distintos rangos de voltaje, siendo adecuado para ampliar la tensión máxima que puede llegar a registrar con la finalidad de aumentar la eficiencia de este prototipo, incluye una protección interna contra sobrevoltajes y condiciones de alta corriente, mejorando así la robustez de este sensor y su resistencia a fallos en condiciones adversas, siendo esta imprescindible para este sistema puesto que su ubicación será a la intemperie. Posee un tamaño compacto para emplearlo en diseños donde el espacio es limitado, como es el caso, ya que cuanto más compacto sea, mejor será su manejabilidad y desplazamiento.

La razón por la que se decide emplear la batería de litio **INR18650-35E** se debe principalmente a su capacidad nominal teórica de 3350 mAh, permitiendo así alimentar dispositivos durante prolongados periodos sin la necesidad de una recarga frecuente, lo cual es básico para sistemas autosuficientes que requieren de operación continua. Una de las características por la cual se ha optado por esta opción, es debido al alto número de ciclos de carga y descarga que ofrece esta, manteniendo una capacidad significativa incluso después de una gran cantidad de ciclos, reduciendo así la necesidad de reemplazar dicha batería. Además, esta batería está formada por níquel cobalto manganeso (NCM), conocidas por su estabilidad térmica y seguridad mejorada, minimizando riesgos de sobrecalentamiento, incendios o explosiones. Esto se traduce en que el sistema será más autosuficiente y menos dependiente de mantenimientos.

A raíz de la elección de la batería INR1860-35E, se decanta por emplear el regulador de carga **TP4056** puesto que está específicamente diseñado para la

carga de baterías de iones de litio. Esto queda reflejado en que carga de forma controlada, segura y eficiente, maximizando hasta cierto punto la vida útil de esta. Presenta también protecciones integradas dedicadas a la sobrecarga para evitar posibles daños por una carga excesiva reduciendo así la vida útil de dicha batería.

Para sustentar de forma estable el sistema se requiere de un regulador de tensión constante, la elección del regulador **DC-DC S09** viene justificada por su eficiencia ya que tiene una conversión típica del 90% o más. Esta alta eficiencia es necesaria para minimizar la pérdida de energía y mantener una tensión estable a la salida, esencial para el correcto funcionamiento del ESP32 ya que este requiere de una alimentación estable de 3.3 V para operar de manera fiable. Las fluctuaciones en la tensión de alimentación pueden producir inestabilidad en el funcionamiento del microcontrolador, resultando en errores de la lectura de las medidas o reinicios de este.

Este regulador presenta un amplio rango de tensiones de entrada, generalmente de 4.5 V a 28 V permitiendo diversas fuentes de alimentación entre estas distintos tipos de paneles solares. Además de que cuenta con protección contra sobrecorriente, sobretensión y cortocircuito previniendo daños tanto en el propio regulador como en el ESP32.

3.2. Desarrollo del prototipo.

En esta sección se detalla el proceso de construcción del sistema de alimentación eléctrica del heliostato, incluyendo todas las etapas partiendo desde el diseño conceptual hasta el ensamblaje final. El objetivo de este es proporcionar una guía que contraste el desarrollo paso a paso, asegurando que en futuros proyectos este documento pueda servir como base para replicar o perfeccionar dicho sistema. Acto seguido se describen las técnicas y herramientas empleadas para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

3.2.1. Diseño del prototipo.

En este proyecto, el software EasyEDA ha sido utilizado tanto para el diseño del esquema eléctrico como para la creación de los archivos Gerber y el desarrollo de la PCB. Se trata de una plataforma basada en la nube que facilita el diseño y la simulación de circuitos electrónicos.

El esquema eléctrico representa de manera clara y concisa todas las interconexiones entre los componentes clave del sistema del heliostato autónomo, asegurando una organización adecuada de cada elemento para lograr un funcionamiento óptimo. La interfaz de EasyEDA facilita la colocación precisa de los componentes, el establecimiento de conexiones entre ellos y la verificación del esquema para evitar errores de diseño. Esta herramienta también permite generar automáticamente los archivos Gerber necesarios para la producción de la placa PCB.

El diseño del esquema eléctrico está organizado de tal manera que cada uno de los subsistemas interactúe de forma eficiente, maximizando la estabilidad del sistema y minimizando las interferencias eléctricas. El empleo de la comunicación I2C entre el ESP32 y los sensores simplifica el cableado, mientras que el regulador de voltaje garantiza que todos los componentes críticos reciban un suministro estable, la integración del regulador de carga TP4056 asegura que la batería se mantenga en óptimas condiciones de carga, además de que el sistema sea capaz de operar de forma autónoma, utilizando la energía almacenada en la batería cuando el panel solar no pueda generar suficiente energía.

Los archivos Gerber son el estándar de la industria para la fabricación de PCBs, placa de circuito impreso (PCI), y contienen toda la información necesaria para poder fabricar una placa a partir del diseño eléctrico. Este diseño ha sido optimizado para minimizar la longitud de las pistas, lo que reduce posibles interferencias y mejora de la integridad de las señales. La generación de los

archivos Gerber es el último paso antes de la producción de la placa, asegurando que el diseño es replicable y que puede ser fabricado sin errores. Estos archivos permiten que el proyecto pase de la fase de diseño digital a una implementación física.

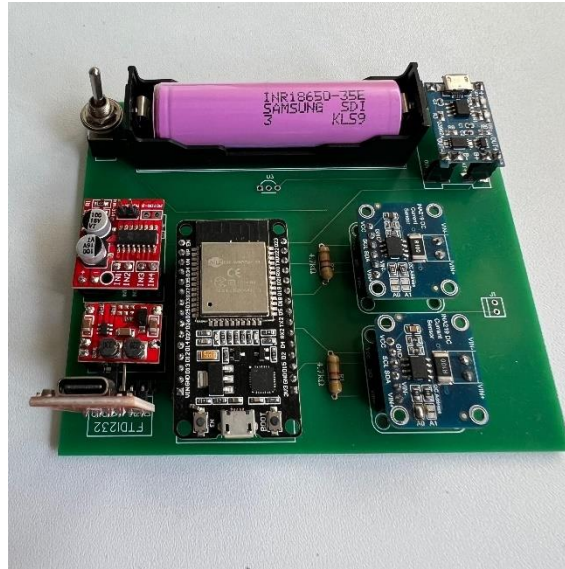


Figura 22.- Montaje del prototipo del sistema de gestión de la alimentación de un heliostato autónomo.

Dichos esquemas relevantes se encuentran adjuntos en los anexos de este documento, para su consulta detallada y referencia técnica.

3.2.2. Verificación y pruebas iniciales.

El proceso de verificación y las pruebas iniciales realizadas en el prototipo del sistema fueron fundamentales para asegurar que las mediciones obtenidas por los sensores INA219 fueran precisas y fiables. Para corroborar que las medidas registradas por el prototipo, tanto de corriente como de tensión, coincidían con las medidas reales del sistema, se llevaron a cabo varias pruebas controladas utilizando instrumentos de medición externos como un osciloscopio y un multímetro.

Para verificar que la medición de la tensión a través del sensor INA219 en la resistencia de derivación (RShunt) era correcta, se utilizó un osciloscopio para medir manualmente la tensión real en el sistema mientras el prototipo estaba en funcionamiento con el objetivo de comparar las lecturas obtenidas por el osciloscopio con los valores registrados por el código implementado en el microcontrolador, asegurándose de que las lecturas proporcionadas por el INA219 y procesadas por el sistema eran precisas.

Por otro lado, para verificar que el sistema registraba correctamente la intensidad de corriente, se empleó un multímetro para medir manualmente la corriente que atravesaba el sistema, comparándola con los valores registrados por el INA219 en el código del prototipo. Todas estas comprobaciones, para asegurar que fueran consistentes y correctas, se llevaron a cabo en varios escenarios, realizándose pruebas con la placa expuesta totalmente al sol, parcial y completamente tapada con una sombra. A raíz de estas comprobaciones se llegó a la conclusión de que, tal y como se observa en la *Figura 23*, el valor real de la resistencia de derivación era de 0.09698Ω , valor sumamente parecido al referenciado por el fabricante, el cual ha sido obtenido a partir de un ajuste lineal cuya pendiente proporciona el valor de la resistencia de derivación según indica la Ley de Ohm.

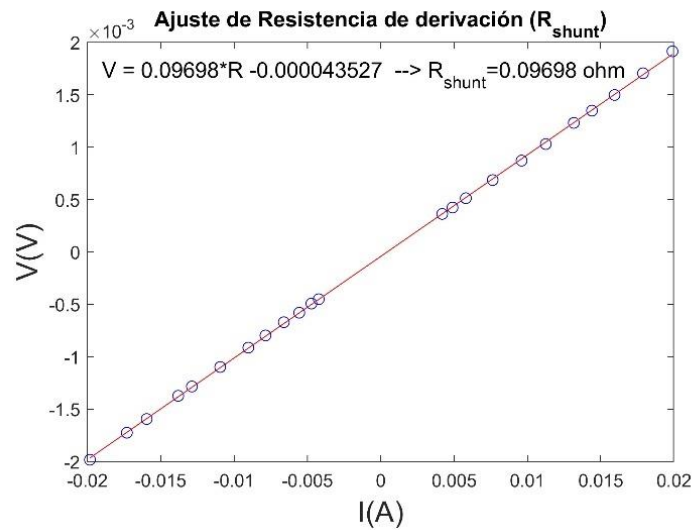


Figura 23.- Representación gráfica del ajuste lineal a partir de la Ley de Ohm para calibrar el valor real de la resistencia de derivación.

Al finalizar este proceso se demostró que el sistema es capaz de registrar correctamente las medidas de tensión e intensidad en diferentes condiciones de exposición solar. La precisión del sensor INA219, combinada con la correcta interpretación de los datos por el código del ESP32, asegura que el prototipo puede monitorizar de manera fiable el rendimiento energético del sistema bajo distintas condiciones de operación.

3.3. Programación y configuración del software.

En este apartado se explicará en detalle la funcionalidad de dos códigos desarrollados para la monitorización y control de un sistema energético. El primer código fue empleado para registrar datos de tensión e intensidad de una batería de litio durante su proceso de descarga, permitiendo obtener su curva característica I-V. El segundo código se utilizó para registrar datos tanto de una placa fotovoltaica como de una batería, además de controlar un motor, simulando el movimiento de un heliostato autónomo. A lo largo del apartado se explicará cómo se ha configurado cada código, los sensores utilizados, las técnicas de optimización empleadas, y la implementación del modo Deep Sleep en el ESP32 para lograr eficiencia energética.

3.3.1. Estructura y funcionalidad del código

Ambos códigos comparten una estructura y componentes fundamentales que permiten la medición de parámetros eléctricos clave, como el voltaje y la corriente, utilizando sensores INA219 y la comunicación con el ESP32 a través de la interfaz I2C. En ambos casos, los sensores INA219 son configurados mediante funciones dedicadas que aseguran su correcta operación. Estas funciones incluyen la inicialización ***iniciarSensor()***, el reinicio ***resetearSensor()*** y la configuración del sensor ***configurarSensor()***, garantizando que estén en óptimas condiciones antes de comenzar las mediciones.

Una de las características comunes es el enfoque en el promediado de múltiples lecturas. Ambos códigos realizan varias mediciones consecutivas para cada parámetro (ya sea voltaje, corriente o voltaje en la resistencia de derivación) con el fin de promediar los resultados. Esta técnica ayuda a minimizar las fluctuaciones y el ruido en los datos, proporcionando lecturas más precisas y fiables. Para cada ciclo de medición, los datos se capturan utilizando la función ***Wire.beginTransmission()*** y ***Wire.requestFrom()*** para solicitar los valores desde los registros del INA219.

Otro aspecto compartido es la comunicación serial, la cual se utiliza para transmitir los datos medidos al Monitor Serial. En ambos códigos, los valores promediados de voltaje y corriente se envían mediante ***Serial.print()***, lo que permite la visualización de los datos en tiempo real o su análisis posterior. Esta funcionalidad también facilita la integración con herramientas externas como MATLAB, que pueden utilizar estos datos para análisis más avanzados o toma de decisiones en tiempo real.

Tanto en la medición de la batería como en la placa fotovoltaica, se aplican procesos similares para obtener la corriente utilizando la resistencia shunt del INA219 y la Ley de Ohm. Esto implica capturar el voltaje en la resistencia shunt

y convertirlo a corriente mediante cálculos específicos, basados en las características del sensor.

El código de **medición de la curva I-V de una batería de litio en descarga**, el cual se aporta en el *Anexo II*, está diseñado específicamente para registrar los datos de tensión e intensidad de una batería a medida que se descarga, con el fin de obtener su curva característica I-V (corriente versus voltaje). A continuación, se detallan los aspectos clave que lo caracterizan.

Este código está orientado a la medición exclusiva de una batería de litio, configurando el sensor INA219 para realizar lecturas precisas de voltaje y corriente durante el proceso de descarga. El objetivo principal es capturar cómo varían estos parámetros a lo largo del tiempo, lo cual es crucial para evaluar el rendimiento y la capacidad de la batería, obteniendo así una representación precisa de la curva I-V.

Un aspecto distintivo del código es que las mediciones no se realizan de manera continua, sino bajo demanda. Las lecturas de la batería se activan únicamente cuando se recibe un comando específico a través de la interfaz serial, enviado desde una plataforma externa como MATLAB. Esto permite al usuario controlar cuándo iniciar las mediciones, optimizando la captura de datos en momentos específicos de interés durante la descarga de la batería.

Durante cada ciclo de medición, el código realiza 20 lecturas consecutivas de voltaje y corriente. Estas mediciones se promedian para asegurar una mayor precisión y reducir el impacto del ruido en los datos. El voltaje se mide directamente desde el bus I2C del INA219, mientras que la corriente se calcula mediante la Ley de Ohm, utilizando el voltaje medido en la resistencia shunt del sensor. Además, el código está diseñado para detectar y corregir automáticamente los valores negativos de voltaje en la resistencia shunt, aplicando el complemento a dos cuando es necesario.

Los resultados de las mediciones, es decir, los valores promediados de voltaje, corriente y voltaje en la resistencia de derivación se transmiten al monitor serial. Esta salida es necesaria para visualizar los datos en tiempo real y también permite su posterior procesamiento en plataformas de análisis como MATLAB, para obtener una representación detallada de la curva I-V.

El código de **monitorización solar y control de un heliostato autónomo**, el cual se aporta en el *Anexo II*, está diseñado para registrar los datos de una placa fotovoltaica y una batería, además de controlar el movimiento de un motor que simula la operación de un heliostato. Este código permite obtener datos precisos tanto del rendimiento de la placa solar como del estado de la batería, mientras se optimiza el consumo energético del sistema mediante el uso del modo Deep Sleep del ESP32.

A diferencia de otros códigos más simples, este está configurado para trabajar con dos sensores INA219: uno para medir la tensión y corriente de la batería, y otro para hacer lo mismo con la célula fotovoltaica. Esto proporciona una visión detallada de cómo la energía generada por la placa alimenta tanto al sistema como a la batería, lo cual es necesario para un heliostato autónomo que depende de fuentes de energía renovables.

Un aspecto distintivo de este código es el control de un motor mediante el ESP32. El motor se activa durante un breve periodo (2 segundos) cada 28 segundos para simular el actuador para el seguimiento del heliostato, que ajusta su posición en función de la posición relativa entre el receptor y el sol. Este control del motor está perfectamente sincronizado con las mediciones de los sensores, asegurando que los ajustes del heliostato se basen en los datos reales de la energía generada y almacenada.

Para las mediciones, el código realiza 100 lecturas consecutivas de los parámetros de la batería y la placa fotovoltaica. Estos valores son promediados,

lo que reduce la variabilidad y garantiza resultados más precisos. El voltaje y la corriente se obtienen mediante los registros del INA219.

Una de las características más importantes de este código es la integración del modo Deep Sleep del ESP32. Después de cada ciclo de medición y control del motor, el ESP32 entra en un estado de bajo consumo energético durante 28 segundos, lo que permite reducir drásticamente el uso de energía cuando no se están realizando mediciones ni movimientos. Esta característica es fundamental en un sistema autónomo que depende de una fuente de energía limitada como una célula fotovoltaica, ya que maximiza la eficiencia del sistema.

Finalmente, los datos recogidos (voltajes y corrientes) se envían al monitor serial, permitiendo su visualización en tiempo real o su posterior análisis. Esta salida es esencial para entender el comportamiento del sistema y realizar ajustes en el diseño del heliostato autónomo.

3.4. Presupuestos.

En este apartado se proporciona una visión general sobre el coste de los componentes utilizados en el sistema de alimentación del heliostato. Para garantizar la claridad y transparencia en los costes, se ha preparado un anexo donde se detalla el precio individual de cada componente que forma parte del sistema. Este anexo incluirá todos los elementos esenciales, como el ESP32, los sensores INA219, el módulo de carga TP4056, la batería de litio INR18650-35E, el regulador de voltaje, y el módulo L298N para el control del motor, entre otros.

El presupuesto también considerará los costes asociados a la fabricación del PCB, la soldadura de componentes y otros materiales auxiliares necesarios para la implementación. Además, se incluirá el precio total del sistema de alimentación del heliostato, con un desglose que permita evaluar su viabilidad económica en futuros desarrollos.

El anexo de presupuestos será clave para facilitar la comprensión del costo total del proyecto y las posibles optimizaciones económicas en futuras versiones del sistema

CAPÍTULO 4: RESULTADOS y ANÁLISIS.

En este capítulo se presentan los resultados más relevantes obtenidos durante los ensayos de la placa encargada de gestionar el suministro eléctrico para un heliostato autónomo, desarrollándose en los meses de junio, julio y agosto.

Los datos recopilados durante estos meses se enfocan en la generación de energía, la eficiencia de conversión de la radiación solar en energía eléctrica, y el comportamiento del sistema en diferentes escenarios que van desde la total exposición al sol hasta condiciones parcial o completamente nubladas. Este análisis permite identificar los factores clave que afectan a las limitaciones del sistema para que a partir de ellos se puedan extraer conclusiones y proponer posibles mejoras en el diseño y la operación del sistema.

4.1. Descripción de las condiciones de prueba.

El sistema estuvo en funcionamiento continuo desde el 20 de junio hasta el 27 agosto de 2024, en Málaga, situado en un balcón norte de la Escuela de Ingenierías Industriales. Durante este período, las condiciones climáticas fueron óptimas para la operación del sistema, con temperaturas medias que variaron entre 19 °C y 31 °C, predominando los días soleados, favoreciendo así al sistema debido a la alta captación de energía solar.

Sin embargo, debido a la localización del panel fotovoltaico, algunas mediciones presentan fluctuaciones en la potencia captada producidas por las sombras proyectadas por distintos elementos del edificio, quedando reflejado en las gráficas que se exponen más adelante. Además de las condiciones climáticas y las características del entorno donde se realizó la instalación, es importante destacar el método utilizado para simular el consumo energético de un sistema real de seguimiento solar.

Para este propósito, se implementó un motor que se accionaba de forma controlada y cíclica, operando durante 2 segundos cada 28 segundos de parada, replicando el comportamiento de un sistema de seguimiento solar en condiciones adversas y exigentes, ciclo que se mantuvo activo las 24 horas del día, permitiendo así una simulación continua del consumo de energía.

Funcionamiento irreal ya que, en un sistema real, el motor no debería estar en funcionamiento durante la noche, ya que no sería necesario ajustar la posición del heliostato sin luz solar, este modo de operación se implementó para poner el sistema bajo condiciones de mayor exigencia y observar su capacidad para gestionar la energía en escenarios extremos, permitiendo así, no solo probar la resistencia del sistema, sino también evaluar su capacidad de mantener el funcionamiento del motor con la energía almacenada en la batería.

Gracias a esta simulación, fue posible obtener una visión realista del comportamiento del sistema, lo que permitió ajustar y optimizar tanto la gestión de la carga como el almacenamiento energético para garantizar que el heliostato pudiera funcionar eficientemente incluso bajo condiciones más exigentes de consumo.

4.1.1. Escenarios climáticos y horarios de operación.

Ambos meses presentaron alta irradiación solar. En el mes de junio hubo algunos días nublados y en general fue un mes con temperaturas más suaves que agosto, ya que este fue más caluroso, lo que pudo influir levemente en la eficiencia de la placa fotovoltaica.

En base a los horarios de operación del sistema, en términos generales, entre las 10:00 y 16:00 horas, cuando la incidencia solar directa fue mayor, se produjo la máxima generación de energía. Por el contrario, durante las mañanas, las sombras del edificio afectaron el rendimiento del sistema, creando variaciones en la captación de la energía solar. Esto se reflejó en las gráficas de producción

de energía, con picos durante el mediodía y caídas pronunciadas cuando las sombras cubrían parte del panel fotovoltaico.

4.2. Resultados de la gestión de la energía

4.2.1. Generación total de energía

A continuación se adjuntan gráficas que muestran la evolución temporal de los registros de tensión e intensidad tanto de la célula fotovoltaica como de la batería quedando reflejadas las condiciones de irradiación solar a las que estuvo expuesto el sistema durante el registro completo.

Variación de la tensión de la batería durante la lectura de datos.

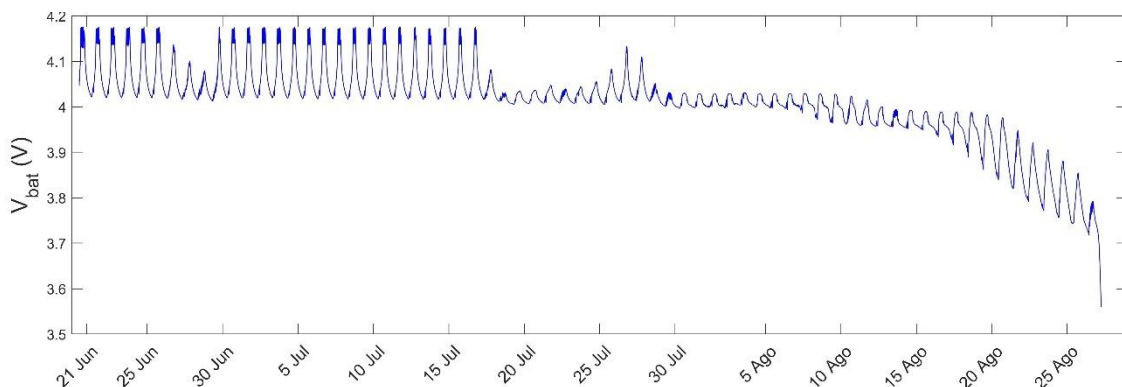


Figura 24.- Representación gráfica de la variación de la tensión de la batería Samsung INR18650-35E durante el periodo de registro de datos.

En la *Figura 24* se muestra la serie temporal completa de datos resistivos a la tensión de la batería. Se observa como su tensión ha ido oscilando entre su tensión máxima y mínima, describiendo así los ciclos solares diarios. Durante los días 27 y 29 de junio se observa que la batería de litio no alcanza la tensión máxima de carga, esto es debido a que durante esos días las condiciones climatológicas fueron distintas a las del resto del mes, presentando un cielo nublado o siendo directamente días nublados.

Otro cambio drástico a destacar es que a partir del 18 de julio, la tensión máxima de la batería cae drásticamente. Esto es debido a dos factores clave, el primero es que debido a un día de lluvia se produce una capa considerable de sedimento encima de la célula fotovoltaica impidiendo así el completo rendimiento de esta, a esto se suma que conforme van pasando los días, al estar alejándose del solsticio de verano, la incidencia del sol es menor.

El día 26 de julio, como se puede observar en la *Figura 25*, se procede a la retirada de dicha capa de suciedad que se había formado, reflejándose así en los días posteriores con el alcance de mayores tensiones máximas.

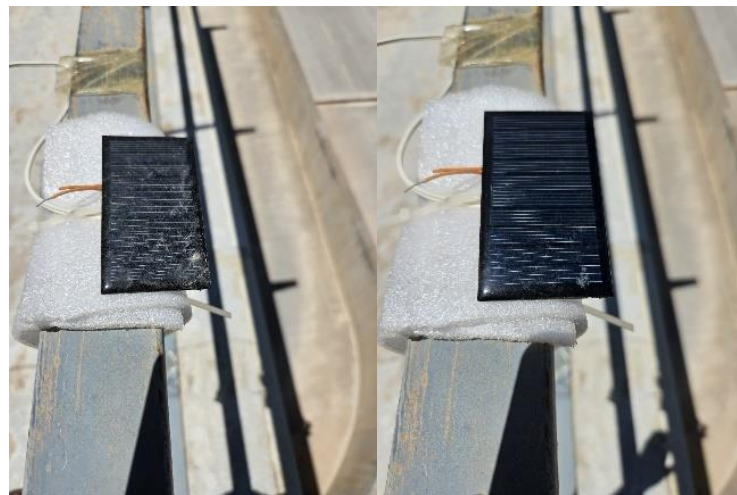


Figura 25.- Célula fotovoltaica antes y después de su limpieza. Fecha: 26/07/2024

Un momento clave en este análisis, es el 15 de agosto, puesto que a partir de dicho día el sistema presenta una tendencia clara decreciente en cuanto a la tensión de la batería, no alcanzando así el punto de tensión máxima. Esta situación se produce debido a que la energía que la célula fotovoltaica genera durante las horas de exposición al sol no es suficiente para que el sistema de almacenamiento alcance su capacidad máxima, produciendo así una caída progresiva de la tensión diaria registrada, hasta el punto, de llegar al extremo que dicha tensión sea mínima, dejando inoperativo el sistema.

Variación de la intensidad de la batería durante la lectura de datos.

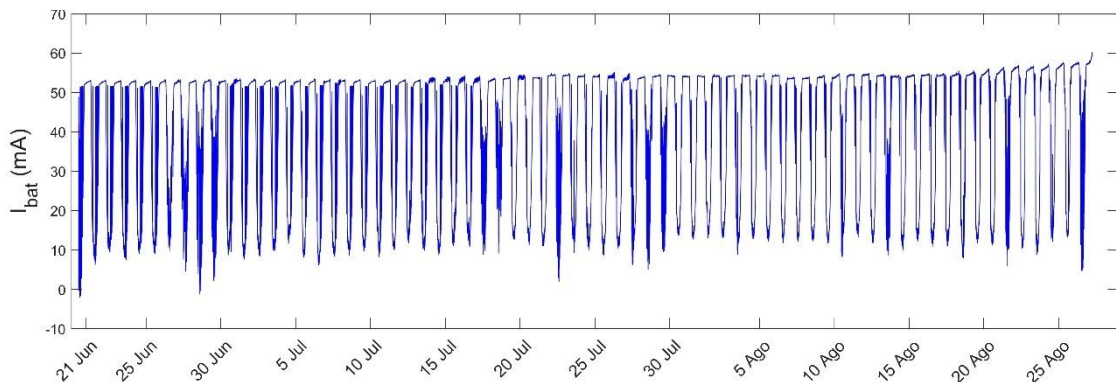


Figura 26.- Representación gráfica de la variación de la intensidad de la batería Samsung INR18650-35E durante el periodo de registro de datos.

La *Figura 26* corrobora el inicio de esa caída progresiva del sistema, ya que como se puede observar, la intensidad que consume la batería permanece oscilando alrededor de los 53 mA hasta que el registro de datos alcanza el 15 de agosto, donde la intensidad comienza a aumentar progresivamente con el paso de los días debido a que, como se ha explicado en el análisis de la gráfica anterior, la capacidad de la energía almacenada en la batería cada vez era menor, no alcanzando así la tensión mínima necesaria para sustentar el sistema. En consecuencia de este descenso de tensión, para poder sustentar el sistema, el convertor DC-DC encargado de mantener una tensión estable a su salida de 3.3 V, requiere de una mayor intensidad, obligando a que la batería proporcione mayor intensidad, la cual queda reflejada en el incremento progresivo a partir de ese día concreto.

Potencia generada por la célula fotovoltaica durante la toma de datos.

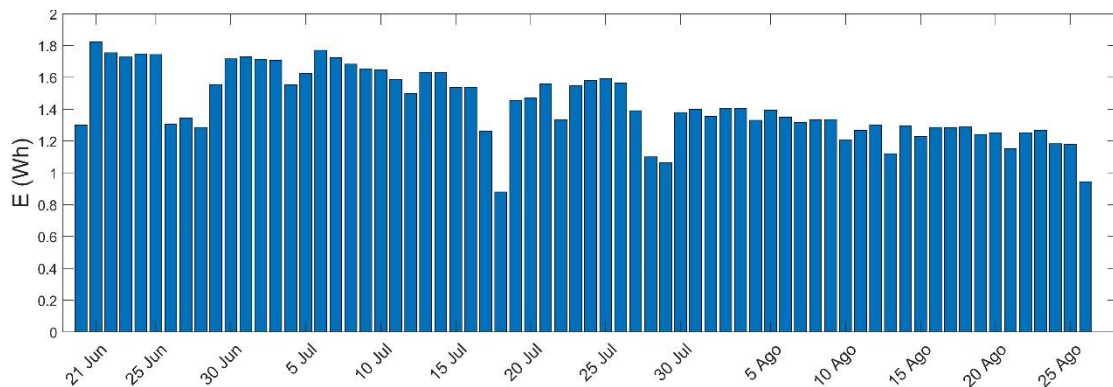


Figura 27.- Representación gráfica de la generación de energía en vatios hora de la célula fotovoltaica durante cada día natural en el periodo de registro de datos.

En la *Figura 27* se representa la potencia energética generada, expresada en vatios hora, por la placa fotovoltaica durante la toma de datos. Se pueden observar días puntuales en los que la célula fotovoltaica genera potencias muy dispares a las del resto de días. Esto se debe a diversas variaciones climatológicas como puede ser un día con cielos parcial o totalmente nublados, o por el contrario días de lluvia en los que la incidencia del sol es baja.

A destacar de esta gráfica, se observa que la potencia generada va decreciendo de forma gradual conforme discurren los días, en consecuencia del ir alejándonos del solsticio de verano, lo cual produce un descenso de horas de energía solar y la aparición de sombras con una prolongación mayor generadas por la fachada norte del edificio, contrastando así el correcto funcionamiento del sistema.

4.2.2. Análisis de los resultados en días específicos.

En este apartado se realizará un análisis detallado de los datos registrados por el sistema en días puntuales a lo largo del periodo de funcionamiento. El objetivo de este es identificar cómo se comportó el sistema de gestión de energía en condiciones específicas, evaluando la generación de energía, el consumo y

la gestión de la batería, examinando días con distintos niveles de irradiación solar, comparando la tensión e intensidad registrada tanto en la batería como en la célula solar en momentos de alta y baja exposición solar con la finalidad de obtener una visión más detallada del rendimiento global del sistema.

Las gráficas a analizar en este apartado representan en el eje de abscisas la hora civil local y en el eje de ordenadas la tensión y la intensidad registradas tanto en la célula fotovoltaica como en las bornas de la batería de litio.

Día soleado promedio en el mes de junio.

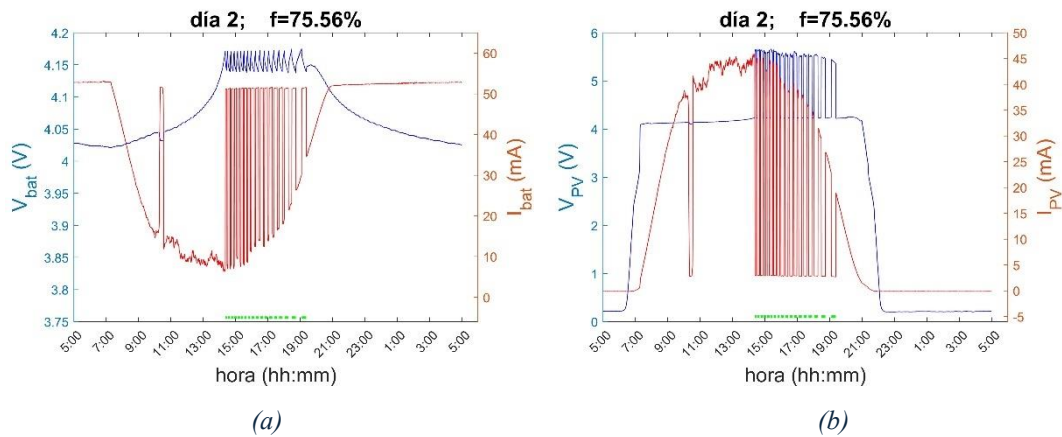


Figura 28.- Registro de datos del 21 de junio de 2024. Día soleado representativo con factor de aprovechamiento de la energía del 75.56%. (a) Representación gráfica de la tensión y la intensidad de la batería de litio. (b) Representación gráfica de la tensión y la intensidad generada por la célula fotovoltaica.

En las gráficas mostradas, correspondientes a un día soleado, se observa cómo la intensidad generada por la célula fotovoltaica sigue un perfil de radiación solar normal, el cual refleja los ciclos solares. Conforme las mediciones se van aproximando al mediodía, alrededor de las 12:00 h, la intensidad aumenta, esto se debe a que es cuando se produce la máxima incidencia solar, debido al ángulo de incidencia. Por esa misma razón, cuando se alejan de este punto la intensidad comienza a disminuir.

Un fenómeno a destacar, el cual se repite en todas las gráficas posteriores, ocurre alrededor de las 10:00 h, donde se detecta una caída drástica de la

intensidad pero apenas notable en la tensión, se debe a que las sombras, las cuales son proyectadas por estructuras cercanas, hacen que la célula siga polarizada por la radiación difusa, lo que reduce temporalmente la captación solar.

Hacia las 14:00 h, se observa una repetida variación tanto en la tensión como en la intensidad generada por la célula fotovoltaica y la recibida por la batería. Este fenómeno ocurre cuando la batería de litio alcanza el 100 % de su capacidad, lo que activa el regulador de carga TP4056 para evitar sobrecargas. Cuando la batería llega a su máxima capacidad de almacenamiento, el regulador interrumpe el flujo de energía desde la célula hasta la batería para evitar sobrecargas, dejando la célula fotovoltaica "en abierto", es decir, sin estar conectada a una carga. En ese momento, la tensión de la célula fotovoltaica aumenta, alcanzando aproximadamente 5.5 V, que corresponde a su tensión en circuito abierto, mientras la intensidad desciende.

Cuando la célula fotovoltaica está cargando la batería, la tensión se mantiene alrededor de 4.2 V, ya que está conectada a una carga. Sin embargo, al desconectarse, la célula ya no está bajo carga, lo que provoca un aumento de la tensión a su valor en circuito abierto. Estos picos intermitentes de tensión reflejan la regulación dinámica que realiza el TP4056, asegurando que la batería se mantenga dentro de los límites seguros de operación.

Otro suceso a destacar en la *Figura 28*, es que la curva azul, muestra una oscilación en la tensión de la batería entre 4.12 V y 4.17 V. Esta variación refleja los ciclos de carga y descarga controlados por el TP4056, cuya amplitud es resultado directo de los parámetros internos del módulo de carga, lo que provoca que con la suficiente irradiación solar, la batería se mantenga entre dos valores elevados de porcentaje de carga, como por ejemplo el 95% y el 100%. Este comportamiento asegura un alto nivel de carga durante el día, pero también sugiere la posibilidad de optimización para reducir la frecuencia entre estos pequeños picos y mejorar la durabilidad a largo plazo.

Día con condiciones climatológicas adversas en el mes de junio.

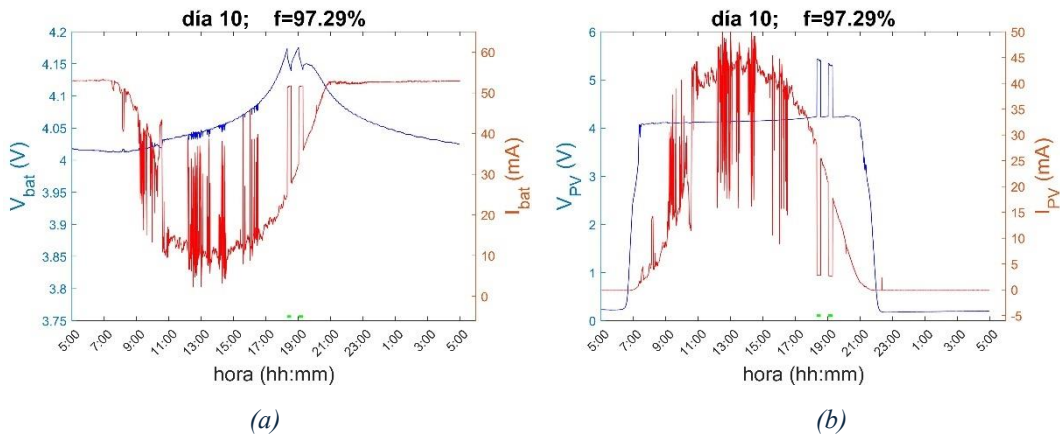


Figura 29.- Registro de datos del 1 de julio de 2024. Día con condiciones climatológicas adversas con factor de aprovechamiento de la energía del 97.29%. (a) Representación gráfica de la tensión y la intensidad requerida por la batería de litio. (b) Representación gráfica de la tensión y la intensidad generada por la célula fotovoltaica.

En las gráficas correspondientes de un día con condiciones climáticas adversas, ya sea un día nublado o lluvioso, se observa una distorsión del perfil de radiación solar normal que se presenta en días soleados. En lugar de un aumento gradual de la tensión, tanto la generada por la célula fotovoltaica como la requerida por la batería, se aprecian fluctuaciones, indicando la presencia de sombras causadas por las nubes, provocando así esos cambios bruscos en la intensidad. Al igual que se ha comentado para los efectos de las sombras por elementos arquitectónicos, la presencia de nubes afecta sobre todo a la intensidad generada por la célula. Por el contrario, estas variaciones en las condiciones de radiación no generan ningún tipo de ruido en la tensión de alimentación proporcionada con la batería.

En la *Figura 29a*, se observa que la curva de la tensión crece lentamente, esto se debe a que a pesar de la presencia de nubes y por consiguiente una radiación solar irregular durante el día, la energía que genera la célula sigue siendo suficiente ya que sobre las 18:00, la batería alcanza su capacidad máxima, activando el regulador TP4056 para evitar sobrecargas tal y como se ha explicado en el análisis gráfico de un día soleado promedio.

Día soleado promedio en el mes de julio.

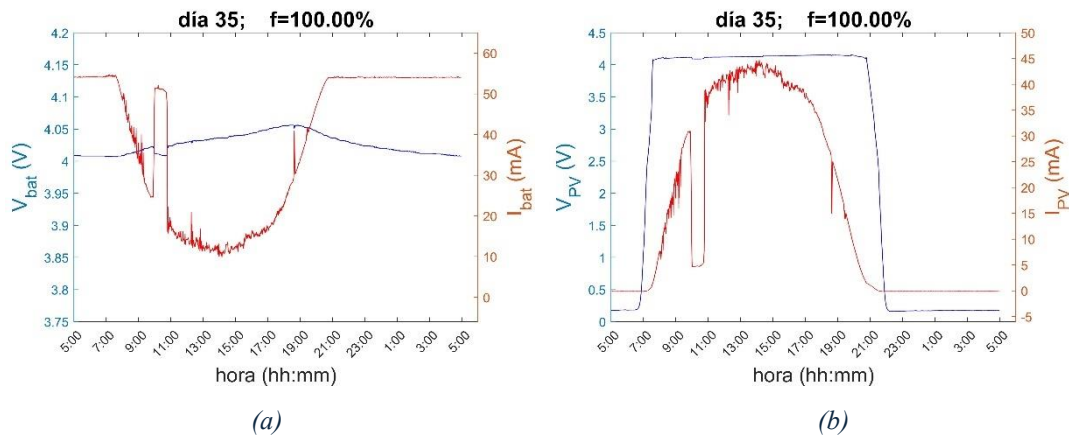


Figura 30.- Registro de datos del 25 de julio de 2024. Día soleado representativo con factor de aprovechamiento de la energía del 100%. (a) Representación gráfica de la tensión y la intensidad de la batería de litio. (b) Representación gráfica de la tensión y la intensidad generada por la célula fotovoltaica.

En la *Figura 30*, se muestra un día soleado del mes de julio. Se observa que la tensión generada por la célula fotovoltaica se mantiene estable durante la mayor parte del día, reflejando condiciones de irradiación solar estable. Como ya se había analizado anteriormente en un día soleado promedio, alrededor de las 10:00 h, se produce una caída drástica de la intensidad más prolongada en el tiempo, ya que a medida que el sol se desplaza hacia el sur, como la célula está ubicada en una fachada norte, las sombras proyectadas por los distintos elementos arquitectónicos del edificio se vuelven más prolongados en el tiempo, afectando considerablemente la captación de energía solar por parte de la célula.

En este día la carga de la batería ya no alcanza su capacidad máxima, es por ello por lo que no es necesario que el regulador de carga TP4056 desconecte la célula fotovoltaica del sistema durante el suministro de la energía, no produciéndose así los típicos picos tanto de tensión como de intensidad que se mostraban en otras condiciones.

Día con condiciones climatológicas adversas en el mes de agosto.

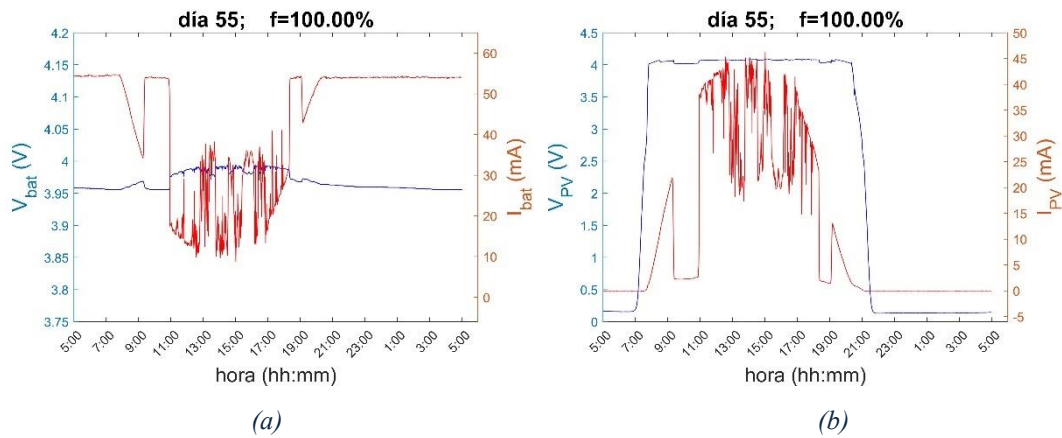


Figura 31.- Registro de datos del 14 de agosto de 2024. Día con condiciones climatológicas adversas con factor de aprovechamiento de la energía del 100%. (a) Representación gráfica de la tensión y la intensidad de la batería de litio. (b) Representación gráfica de la tensión y la intensidad generada por la célula fotovoltaica.

En las Figuras 31 a y b, las cuales representan un día con nubes, se observan variaciones significativas en la intensidad, principalmente en intervalos irregulares, confirmando así que se trata de la presencia de nubes las cuales intervienen en la radiación solar haciendo así que llegue a la célula una luz difusa, de esta forma quedan reflejadas en la gráfica las caídas bruscas en la intensidad generada por la célula fotovoltaica. Estas caídas obligan a que la batería incremente el flujo de intensidad para poder contrarrestar dichas caídas de la intensidad suministrada por la célula y poder mantener el sistema estable. A diferencia de la intensidad, la oscilación de la tensión es muy leve en comparación con la intensidad, lo que indica que aunque la luz solar fue difusa y variable, la célula mantuvo su nivel de tensión relativamente estable.

Un acontecimiento nuevo que se refleja en estas gráficas se produce alrededor de las 18:00 h, aparece una nueva sombra generada por los elementos arquitectónicos del edificio, acentuando la distorsión en el perfil típico de radiación solar de la gráfica de la intensidad. Como ya se había explicado anteriormente, la batería no es capaz de alcanzar su capacidad máxima,

impidiendo así que el regulador de carga realizara cortes en el suministro, es por esto por lo que no aparecen los picos de tensión.

4.2.3. Análisis del factor de aprovechamiento energético de la célula fotovoltaica.

A través de la gráfica adjunta, se puede observar cómo, con el continuo funcionamiento del sistema, la batería requirió progresivamente más energía suministrada por la célula fotovoltaica, alcanzando el 100% del suministro. Este aumento en la demanda de energía captada refleja tanto el uso continuo del sistema como las variaciones en las condiciones ambientales. Se pueden observar cuatro días de junio donde la batería y el sistema aprovecharon el 100% de la energía suministrada por la célula, esto es debido a las condiciones climatológicas de dichos días, principalmente un cielo nuboso.

Este factor representa, en términos porcentuales, la relación entre la energía generada por la célula y la que realmente ha sido empleada por el sistema para su correcto funcionamiento. Por ejemplo, si este factor es del 75%, significa que la batería solo necesitó esa cantidad de energía para sustentarse, y el 25% restante se desechó debido a que la batería no podía almacenar más energía. Si por el contrario, el factor es del 100%, esto indica que toda la energía que ha generado la célula ese día se ha empleado directamente para alimentar el sistema y no se ha desperdiciado nada.

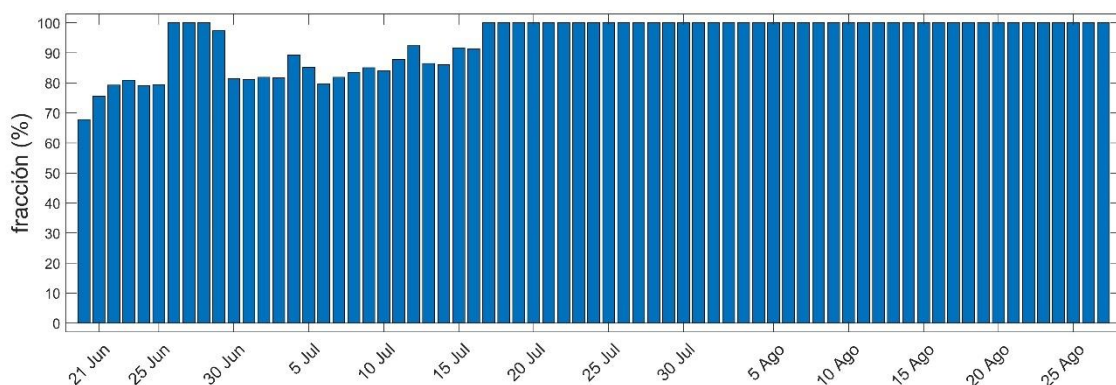


Figura 32.- Representación gráfica de la absorción de energía por la batería en comparación con la energía generada por la célula fotovoltaica durante el periodo de registro de datos.

Durante el periodo que comprende entre el 21 de junio y el 16 de julio, es evidente que el factor de aprovechamiento del sistema se mantuvo por debajo del 100% debido a las condiciones meteorológicas favorables y una irradiación solar suficiente, permitiendo así que la célula fotovoltaica cubriera las necesidades energéticas del sistema. Sin embargo, durante el resto del mes de julio y agosto, el decremento de la exposición solar y quizás el aumento de temperaturas resultó en un incremento de la dependencia de la batería por parte del sistema para satisfacer sus necesidades energéticas.

4.2.4. Análisis de la pérdida de capacidad de la batería de litio.

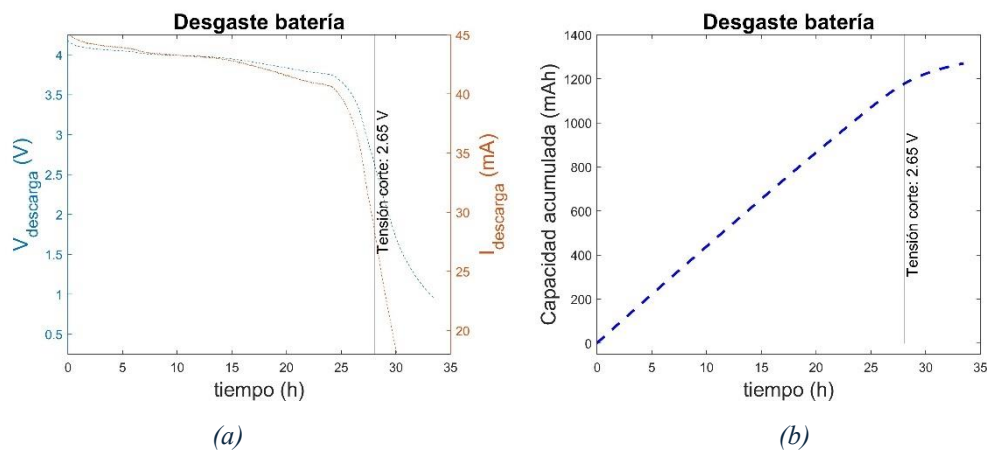


Figura 33.- Representación gráfica del estado de la vida útil de la batería de litio tras el periodo de registro de datos.

La gráfica refleja el estado actual de la batería de litio Samsung INR18650-35E, que ha experimentado un nivel de degradación moderado tras casi 3 meses de funcionamiento continuo con ciclos constantes de carga y descarga. Aunque la degradación no ha sido muy pronunciada, es importante señalar que el TP4056, aunque protege la batería contra sobrecargas y descargas profundas, no está diseñado para mantener la batería dentro de un rango de carga óptimo que prolongue su vida útil. Este módulo no permite predefinir los límites del porcentaje de carga, por lo que la batería opera en un rango que no necesariamente maximiza su durabilidad a largo plazo.



El ciclo de carga constante/voltaje constante (CC/CV) del regulador de carga optimiza el proceso, asegurando que la batería opere dentro de unos límites especificados por el fabricante, minimizando el estrés al que es sometida la célula. Aunque este enfoque protege a la batería de daños graves, como la sobrecarga, no optimiza los ciclos de carga para preservar su capacidad de manera óptima. Por lo tanto, aunque la batería mantiene su eficiencia durante cientos de ciclos, una mejora futura podría consistir en un control más preciso sobre los límites de carga para maximizar su durabilidad y rendimiento a largo plazo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

5.1. Conclusiones del rendimiento del sistema.

El análisis del rendimiento del sistema de gestión de la energía de un heliostato autónomo entre los meses de junio y agosto ha revelado varias conclusiones clave en cuanto a su capacidad y limitaciones. Este ha demostrado un buen rendimiento general, aunque afectado por factores externos como las sombras proyectadas por edificios y variaciones climáticas que, en ciertas ocasiones, condicionaron su operatividad.

En condiciones óptimas de irradiación solar, especialmente en el mes de junio y mitad de julio, el sistema mantuvo una generación de energía óptima, aprovechando al máximo la captación de energía de la célula fotovoltaica e incluso sobrepasando el suministro energético necesario para sustentar el sistema, lo que permitió cubrir las necesidades energéticas del sistema, logrando en algunos días que la batería alcanzara su capacidad máxima de almacenamiento. Sin embargo, las gráficas muestran que, conforme iba avanzando el verano, la capacidad de generación del sistema se fue viendo afectada, sobre todo a partir de mediados de agosto, cuando la energía captada ya no era suficiente para sostener completamente el funcionamiento del heliostato.

Este agotamiento de la energía en el sistema no debe ser visto como un fallo inherente del diseño, sino más bien como una consecuencia de la célula fotovoltaica seleccionada, que resulta pequeña y cuya orientación y ubicación no eran las óptimas para captar energía de manera eficiente. Esto no limita las capacidades del sistema en sí, sino que destaca la importancia de una adecuada selección y posicionamiento de las células fotovoltaicas. A pesar de esto, se ha logrado implementar un sistema que ha funcionado intermitentemente durante un período prolongado, lo que evidencia su fiabilidad. Además, se ha conseguido monitorizar los resultados de manera precisa y obtener conclusiones lógicas

basadas en los datos recogidos, lo que demuestra el éxito del sistema en alcanzar sus objetivos fundamentales de monitoreo y gestión energética.

Un punto importante a destacar es que las variaciones en la intensidad generada por la célula fotovoltaica y la intensidad requerida por la batería presentaron fluctuaciones constantes debido a la presencia de sombras y condiciones climatológicas adversas, principalmente la presencia de nubes que interferían en la radiación procedente del sol. A pesar de esto, el sistema fue capaz de mantener un nivel de tensión relativamente estable.

Otra conclusión importante que se puede obtener es que la eficiencia en la gestión de la carga a través del regulador TP4056, ya que gracias a este se evitó la sobrecarga de la batería cuando alcanzaba su capacidad máxima, generando esos picos de tensión que ya se comentaron durante el análisis de las distintas situaciones.

Finalmente, tras casi tres meses de funcionamiento continuo, se puede concluir que la vida útil de la batería Samsung INR18650-35E no se ha visto afectada significativamente siendo sometida a múltiples ciclos de carga y descarga, pero gracias a la adecuada gestión energética implementada, no ha sufrido degradaciones significativas en su capacidad acumulada (mAh), manteniendo su eficiencia operativa. Sin embargo, al comparar las gráficas más recientes con las iniciales, se ha observado una ligera reducción en la capacidad de la batería. Se observa un patrón de dientes de sierra en la tensión, con variaciones entre 4.0V y 4.2V, tensiones muy cercanas al límite de carga máximo. Este comportamiento sugiere que los ciclos de carga y descarga de pequeña amplitud en la zona alta de la fracción de carga pueden estar afectando la batería a largo plazo.

En conclusión, este sistema ha demostrado ser adecuado y capaz de gestionar adecuadamente la energía generada, aunque presenta limitaciones en escenarios con baja irradiación solar o sombreado constante. Los hallazgos

obtenidos proporcionan una base sólida para futuras mejoras en la captación de energía y en la optimización del sistema para maximizar su rendimiento bajo distintas condiciones climáticas.

5.2. Líneas futuras: Implementación de la funcionalidad del TP4056 para la gestión eficiente de la batería del sistema.

En futuras iteraciones del sistema, se prevé implementar una funcionalidad avanzada sobre el módulo de carga TP4056, con el objetivo de optimizar el rendimiento y la vida útil de la batería de litio INR18650-35E. Esta modificación permitirá controlar de manera precisa el rango de carga de la batería, manteniéndola siempre entre aproximadamente el 40% y 80% de su capacidad total.

El ajuste del voltaje de desconexión del TP4056 permitirá que el sistema corte la carga cuando la batería alcance una tensión inferior a los 4.2 V habituales, asegurando así que la batería nunca llegue a su capacidad máxima, lo que, según estudios, prolonga el ciclo de vida de las celdas de litio al reducir el estrés a largo plazo. Con esta funcionalidad, el sistema será más eficiente y duradero. Además, al mantener el rango de operación en este intervalo controlado, se asegura un rendimiento estable y fiable en el tiempo, garantizando que el heliostato autónomo siga operando de forma óptima, incluso con el paso de los años.

Este tipo de mejoras se alinean con los objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad, ya que alargar la vida útil de la batería no solo disminuye los costos asociados con el remplazo de componentes, sino que también reduce el impacto ambiental del sistema a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lorenzo, E. (s. f.). *Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos.: Vol. II* (2006.^a ed.). Progensa. Promotora General de Estudios.
- [2] Mompín Poblet, J. (1983). *Energía Solar Fotovoltaica* (1^a edición). Marcombo. Boixareu.
- [3] Díaz, T., & Carmona, G. (s. f.). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (1^a edición). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- [4] Reto A10. Puertos... | Librería CATEDU. (s. f.). Recuperado 17 de junio de 2024, de <https://libros.catedu.es/books/retos-imagina-tdr-steam-y-arduinoblocks/page/710-reto-a10-puertos-de-expansion-i2c-pantalla-lcd>
- [5] Batería recargable litio-ion Samsung 18650 35E 3.7v 3500mah. (s. f.). Recuperado 11 de septiembre de 2024, de https://www.hdibattery.com/p11803989_celda-de-litio-ion-samsung-18650-35e-3-7v-3500mah.html#leermas
- [6] bestlitio.com—Baterías 18650. (s. f.). Recuperado 16 de junio de 2024, de <https://www.bestlitio.com/baterias-18650>
- [7] *Comprensión de la batería 18650: Todo lo que necesita saber.* (2023, noviembre 4). <https://solarbatterymanufacturer.com/es/entendiendo-la-bateria-18650/>

- [8] *Controlador Dual L298N Mini para motores—Puente H - Electronilab.* (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://electronilab.co/tienda/controlador-dual-l298n-mini-para-motores-puente-h/>
- [9] *Convertor analógico-digital.* (s. f.). *ingeniatic.* Recuperado 17 de junio de 2024, de <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/425-convertor-analogico-digital>
- [10] *ESP32 Microcontrolador Wifi y Bluetooth para proyectos IOT.* (s. f.). *ElectroHobby.* Recuperado 18 de julio de 2024, de <https://www.electrohobby.es/138-esp32>
- [11] *Helioestado autoestable con estructura de hormigón.* (s. f.). Recuperado 23 de julio de 2024, de <https://tectonica.archi/materials/helioestado-autoestable-con-estructura-de-hormigon/>
- [12] *I2C - Puerto, Introducción, trama y protocolo.* (2017, octubre 28). *HeTPro-Tutoriales.* <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/i2c/>
- [13] *Nuevos diseños en tecnologías solares de concentración—Energía y Sostenibilidad.* (2016, marzo 16). <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2016/03/16/132936>
- [14] *Termosolar de Ouarzazate en Marruecos, adjudicada a SENER y ACWA Power | REVE Actualidad del sector eólico en España y en el mundo.* (2015, enero 12). <https://www.evwind.com/2015/01/12/el-consorcio-integrado-por-sener-gana-el-contrato-para-las-fases-noor-2-y-noor-3-del-complejo-termosolar-de-ouarzazate-en-marruecos/>
- [15] *Willem Jacob 's Gravesande.* (s. f.). Recuperado 23 de julio de 2024, de <http://picus.unica.it/index.php?page=Filosofo&id=98&lang=en>



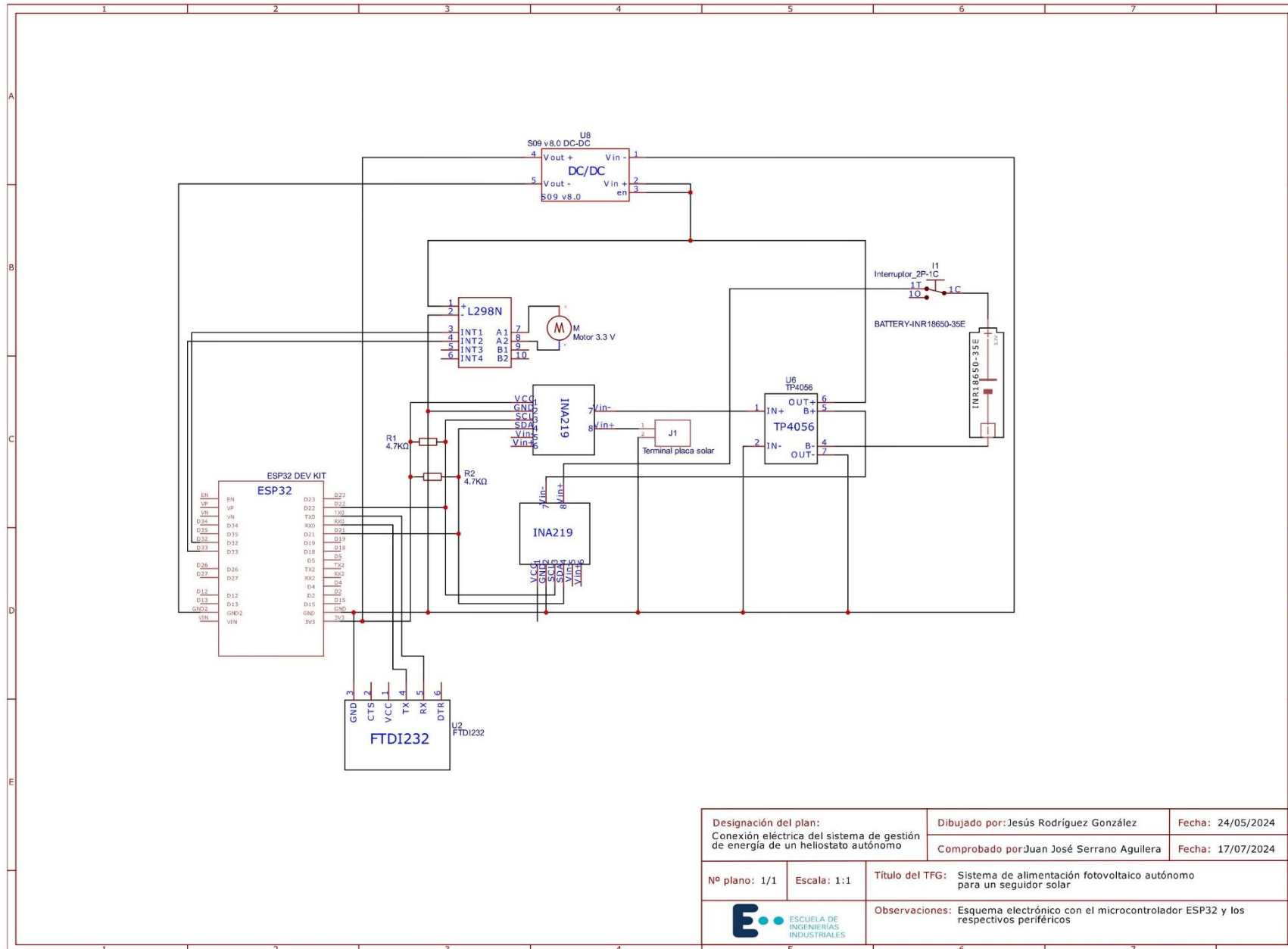
[16] *Banda Prohibida* | PVEducation. (s. f.). Recuperado 14 de septiembre de 2024, de <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/dispositivos-semiconductores/banda-prohibida>




ANEXO I:

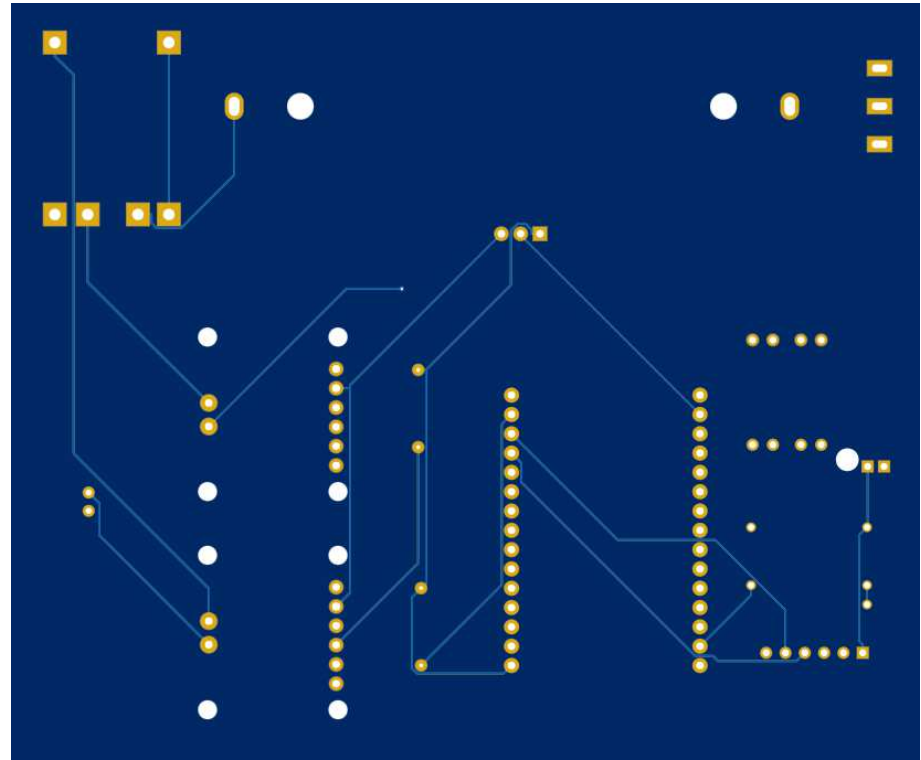
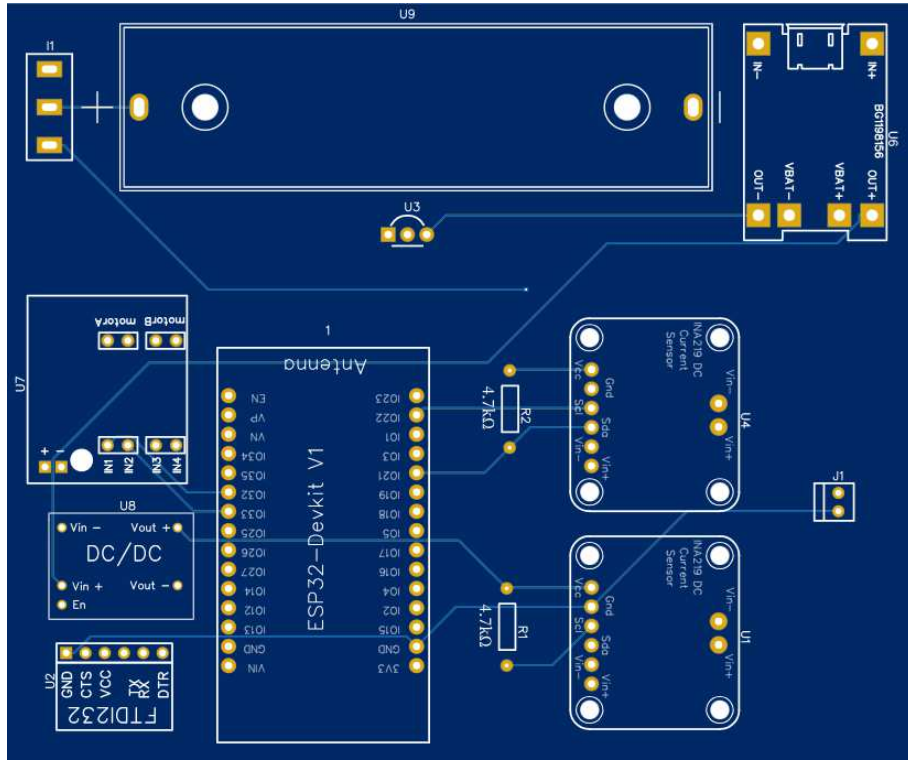
Planos eléctricos y PCB

ESQUEMÁTICO ELECTRICO DEL SISTEMA



Designación del plan: Conexión eléctrica del sistema de gestión de energía de un heliostato autónomo		Dibujado por: Jesús Rodríguez González	Fecha: 24/05/2024
		Comprobado por: Juan José Serrano Aguilera	Fecha: 17/07/2024
Nº plano: 1/1	Escala: 1:1	Título del TFG: Sistema de alimentación fotovoltaica autónomo para un seguidor solar	
		Observaciones: Esquema electrónico con el microcontrolador ESP32 y los respectivos periféricos	

DISEÑO PCB DEL SISTEMA





ANEXO II:

Código del sistema

CÓDIGO DE DESCARGA BATERÍA DE LITIO – CURVA I-V

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

Adafruit_INA219 ina219; // Se carga la librería para usar los pines SDA
y SCL

#define Direccion_Esclavo 0x40 // Dirección esclavo I2C por
defecto del INA219
#define Direccion_Configuracion 0x00 // Dirección registro
configuración I2C
#define Registro_Voltaje 0x02 // Dirección resgistro voltaje I2C
#define Registro_RShunt 0x01 // Dirección resgistro voltaje
RShunt I2C
#define Registro_Corriente 0x04 // Dirección resgistro corriente
I2C

boolean esperaDatos = false;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Configuro la velocidad de transmisión de datos

  // Inicializa el sensor INA219 con los pines SDA y SCL especificados
  if (!ina219.begin())
  {
    while (1)
      ;
  }

  // Reset INA219 para borrar cualquier dato registrado anteriormente

  // Inicializa la comunicación I2C
  Wire.begin();

  // Transmite el byte 0x399F (byte para resetear la configuración del
  INA219, byte extraído del Datasheet) al dispositivo esclavo con
  dirección SLAVE_ADDRESS
  Wire.beginTransmission(Direccion_Esclavo);
  Wire.write(Direccion_Configuracion); // Enviar el puntero de
  dirección (dirección registro configuración INA219)
  Wire.write(0x39); // Envía el primer byte (byte de
  reinicio datasheet)
```

```
Wire.write(0x9F); // Envía el segundo byte (byte
de reinicio datasheet)
int error1 = Wire.endTransmission();

// Verifica si ocurrieron errores durante la transmisión
if (error1 == 0)
{
}
else
{
    Serial.println(error1);
}
// Configura la calibración

// Transmite el byte 0xBBBF (byte para configurar las características
operativas del INA219, byte extraído del Datasheet) al dispositivo
esclavo con dirección SLAVE_ADDRESS, configurando así 16V de rango y
una precisión de 320 mV
Wire.beginTransmission(Direccion_Esclavo);
Wire.write(Direccion_Configuracion); // Enviar el puntero de
dirección (dirección registro configuración INA219)
Wire.write(0xBB); // Envía el primer byte (byte de
configuración)
Wire.write(0xBF); // Envía el segundo byte (byte
de configuración)
int error2 = Wire.endTransmission();
}

boolean voltajesNegativosMostrados = false; // Variable para controlar
si los voltajes negativos ya se han mostrado (Para calcular complemento
a 2 de los datos negativos)

void loop()
{
    if (Serial.available() > 0)
    { // Si ha dato
esperando en el buffer de recepción
        String mensaje = Serial.readStringUntil('\r'); // Lee el mensaje
enviado por MATLAB
        mensaje.trim(); // Elimina los
espacios en blanco al principio y al final del mensaje

        if (mensaje.equalsIgnoreCase("Datos"))
        { // Si el mensaje es "Datos" (clave a introducir desde Matlab)
comienza el bucle
            esperaDatos = true;
        }
    }
}
```

```
}

if (esperaDatos)
{
    // Variables para almacenar las lecturas de voltaje e intensidad
    float sumVoltage = 0.0;
    float sumCurrent = 0.0;
    float sumCurrentLeyOhm = 0.0;
    float sumVoltageShunt = 0.0;
    uint16_t voltageRShuntData;

    // Realiza 20 medidas y suma los valores
    for (int i = 0; i < 20; i++)
    {

        // Medida de voltaje
        Wire.beginTransmission(Direccion_Esclavo); // Dirección esclavo
del INA219
        Wire.write(Registro_Voltaje);           // Esta instrucción
junto con la anterior indican donde tiene que acceder (Marcos)
        Wire.endTransmission(false);           // No libera el bus
(Deja bloqueado el bus para evitar datos indeseados)

        Wire.requestFrom(Direccion_Esclavo, 2); // Solicita 2 bytes de
datos de voltaje
        if (Wire.available() == 2)
        {
            // Si hay dos
bytes disponibles en el puerto I2C procedentes del INA219 se ejecuta lo
siguiente
            byte data[2];                       // Se define un
array de dos elementos para guardar los datos
            data[0] = Wire.read();               // Lee el
primer byte
            data[1] = Wire.read();               // Lee el
segundo byte
            int16_t voltageData = (data[0] << 8) | data[1]; // Combina los
bytes en un dato de 16 bits introduciendo el primer byte y
desplazandolo 8 veces hacia la izquierda, seguidamente introduce el
segundo byte
            voltageData = voltageData >> 3;     // Desplaza el
dato tres veces a la derecha para eliminar los 3 bits menos
significativos (Sección 8.6.3.2 Datasheet INA219, página 23)
            sumVoltage += voltageData * 0.004;  // Convierte
los datos a Voltios (Se multiplica por 0.004 porque en el datasheet te
indica que el LSB del dato equivale a 4mV) (Sección 8.6.3.2 Datasheet
INA219, página 23)
        }
    }
}
```

```
// Medida de voltaje RShunt
Wire.beginTransmission(Direccion_Esclavo); // Dirección del
INA219
Wire.write(Registro_RShunt);           // Esta instrucción
junto con la anterior indican donde tiene que acceder (Marcos)
Wire.endTransmission(false);          // No libera el bus

Wire.requestFrom(Direccion_Esclavo, 2); // Solicita 2 bytes de
datos de corriente
if (Wire.available() == 2)
{
    // Si hay dos
bytes disponibles en el puerto I2C procedentes del INA219 se ejecuta lo
siguiente
    byte data[2];                       // Se define un
array de dos elementos para guardar los datos
    data[0] = Wire.read();               // Lee el primer
byte
    data[1] = Wire.read();               // Lee el segundo
byte
    voltageRShuntData = (data[0] << 8) | data[1]; // Combina los
bytes en un dato de 16 bits introduciendo el primer byte y
desplazandolo 8 veces hacia la izquierda, seguidamente introduce el
segundo byte

    // Muestra los voltajes negativos
    if (voltageRShuntData & 0x8000)
    {

        // Realiza el complemento a dos para obtener el valor
absoluto
        voltageRShuntData = ~voltageRShuntData + 1;

        // Multiplica por -0.01 para convertirlo a negativo
        sumVoltageShunt += voltageRShuntData * -0.01;
    }
    else
    {
        // Convierte los datos positivos a voltage en mV
        sumVoltageShunt += voltageRShuntData * 0.01;
    }
}

// Medida de corriente

float IntensidadLeyOhm = voltageRShuntData * 0.1; // Calcula el
valor de la intensidad que genera la placa en mA
```

```
// Si se mide la intensidad por los pines soldados del INA219 la
RShunt es 0.12343 ohmios y si se mide por las bornas verdes del INA219
la RShunt es 0.1
    sumCurrentLeyOhm += IntensidadLeyOhm; // Suma las medidas para el
promediado

    delay(20); // Espera 20 ms entre cada medida de todas las que
promedia
}

// Calcula el promedio dividiendo la suma entre el número de
medidas
int numeroMedidas = 20;
float averageVoltage = sumVoltage / numeroMedidas;
float averageCurrentLeyOhm = sumCurrentLeyOhm / numeroMedidas;
float averageVoltageShunt = sumVoltageShunt / numeroMedidas;

Serial.print(averageVoltage, 3); // Imprime el promedio de las 20
medidas del voltaje en el bus con 3 decimales
Serial.print("_");
Serial.print(averageVoltageShunt, 3); // Imprime el promedio de las
20 medidas del voltaje en la RShunt con 3 decimales
Serial.print("_");
Serial.print(averageCurrentLeyOhm, 3); // Imprime el promedio de
las 20 medidas de la intensidad en la RShunt con 3 decimales
Serial.print('\r');

Serial.flush(); // Asegura que todos los datos se envíen.

Serial.println("Datos enviados.");

esperaDatos = false;
}
}
```


CÓDIGO DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL DE UN HELIOSTATO AUTÓNOMO

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
#include "esp_sleep.h"

Adafruit_INA219 ina219_Bateria(0x41); // Crea una instancia del sensor
INA219 para la batería
Adafruit_INA219 ina219_Placa(0x40); // Crea una instancia del sensor
INA219 para la placa

#define Direccion_Esclavo_Bateria 0x41 // Dirección esclavo I2C
#define Direccion_Esclavo_Placa 0x40 // Dirección esclavo I2C
#define Direccion_Configuracion 0x00 // Dirección configuración I2C
#define Registro_Voltaje 0x02 // Dirección resgistro voltaje
I2C
#define Registro_RShunt 0x01 // Dirección resgistro voltaje
RShunt I2C
#define Registro_Corriente 0x04 // Dirección resgistro corriente
I2C

// Define los pines para las direcciones del motor
const int motorPin1 = 32; // Pin de control de dirección IN1
const int motorPin2 = 33; // Pin de control de dirección IN2

const int sensorPin = 36; // Define el pin analógico donde está
conectado el TMP36

// Función para inicializar un sensor INA219
void iniciarSensor(Adafruit_INA219 &sensor, String nombre)
{
  if (!sensor.begin())
  { // Intenta iniciar el sensor y verifica si falla
    while (1)
      ; // Detiene el programa si no se encuentra el sensor
  }
}

// Función para resetear un sensor INA219
void resetearSensor(byte direccion, String nombre)
{
  Wire.beginTransmission(direccion); // Inicia la transmisión I2C al
  sensor
```

```
Wire.write(Direccion_Configuracion); // Envía la dirección del
registro de configuración
Wire.write(0x80); // Primer byte de la secuencia
de reinicio
Wire.write(0x00); // Segundo byte de la secuencia
de reinicio
Wire.endTransmission(); // Termina la transmisión
}

// Función para configurar un sensor INA219
void configurarSensor(byte direccion, String nombre)
{
    Wire.beginTransmission(direccion); // Inicia la transmisión I2C al
sensor
    Wire.write(Direccion_Configuracion); // Envía la dirección del
registro de configuración
    Wire.write(0x19); // Primer byte de la secuencia
de configuración
    Wire.write(0x9F); // Segundo byte de la secuencia
de configuración
    Wire.endTransmission(); // Termina la transmisión
}

boolean voltajesNegativosMostrados = false; // Variable para controlar
si los voltajes negativos ya se han mostrado (Para calcular complemento
a 2 de los datos negativos)

void measureSensor(byte direccion, float &sumVoltage, float
&sumVoltageShunt, float &sumCurrent, String nombre)
{
    uint16_t voltageRShuntData;
    uint16_t voltageRShunt;

    // Medida de voltaje
    Wire.beginTransmission(direccion); // Dirección del INA219
    Wire.write(Registro_Voltaje); // Esta instrucción junto con la
anterior indican donde tiene que acceder (Marcos)
    Wire.endTransmission(false); // No libera el bus (Deja
bloqueado el bus para evitar datos indeseados)

    Wire.requestFrom((uint8_t)direccion, (uint8_t)2); // Solicita 2 bytes
de datos de voltaje. Es necesario especificar claramente la versión de
la función que se debe utilizar "uint8_t" para evitar posibles
ambigüedades evitando sobrecargas de la función
    if (Wire.available() == 2)
```

```
{ // Si hay dos bytes
disponibles en el puerto I2C procedentes del INA219 se ejecuta lo
siguiente
    byte data[2]; // Se define un
array de dos elementos para guardar los datos
    data[0] = Wire.read(); // Lee el primer
byte
    data[1] = Wire.read(); // Lee el segundo
byte
    int16_t voltageData = (data[0] << 8) | data[1]; // Combina los
bytes en un dato de 16 bits introduciendo el primer byte y
desplazandolo 8 veces hacia la izquierda, seguidamente introduce el
segundo byte
    voltageData = voltageData >> 3; // Desplaza el dato
tres veces a la derecha para eliminar los 3 bits menos significativos
(Sección 8.6.3.2 Datasheet INA219, página 23)
    sumVoltage += voltageData * 0.004; // Convierte los
datos a Voltios (Se multiplica por 0.004 porque en el datasheet te
indica que el LSB del dato equivale a 4mV) (Sección 8.6.3.2 Datasheet
INA219, página 23)
}

// Medida de voltaje RShunt
Wire.beginTransmission(direccion); // Dirección del INA219
Wire.write(Registro_RShunt); // Instrucción para leer datos de
corriente
Wire.endTransmission(false); // No libera el bus

Wire.requestFrom((uint8_t)direccion, (uint8_t)2); // Solicita 2 bytes
de datos de corriente
if (Wire.available() == 2)
{
    // Si hay dos bytes
disponibles en el puerto I2C procedentes del INA219 se ejecuta lo
siguiente
    byte data[2]; // Se define un array
de dos elementos para guardar los datos
    data[0] = Wire.read(); // Lee el primer byte
    data[1] = Wire.read(); // Lee el segundo
byte
    voltageRShuntData = (data[0] << 8) | data[1]; // Combina los bytes
en un dato de 16 bits introduciendo el primer byte y desplazandolo 8
veces hacia la izquierda, seguidamente introduce el segundo byte
}

// Comprueba si el bit 16 del dato es igual a 1, es decir, si el
voltaje es negativo
// Muestra los voltajes negativos
```

```
if (voltageRShuntData & 0x8000)
{
    // Realiza el complemento a dos para obtener el valor absoluto
    voltageRShuntData = ~voltageRShuntData + 1;

    // Multiplica por -0.01 para convertirlo a mV
    sumVoltageShunt += voltageRShuntData * -0.01;
}
else
{
    // Convierte los datos positivos a voltage en mV
    sumVoltageShunt += voltageRShuntData * 0.01;
}

// Medida de corriente

sumCurrent = sumVoltageShunt / 0.096978; // Calcula el valor de la
intensidad que genera la placa en mA
// Si se mide la intensidad
por los pines soldados del INA219 la RShunt es 0.12343 ohmios y si se
mide por las bornas verdes del INA219 la RShunt es 0.096978
}

void setup()
{
    // Inicia la comunicación serial a 9600 baudios
    Serial.begin(9600, SERIAL_8N1); // 9600 baudios, 8 bits de datos, sin
paridad, 1 bit de stop
    analogReadResolution(12); // Configura la resolución del ADC a
12 bits (0-4095)

    // Inicializa los sensores INA219 con los pines SDA y SCL
especificados
    iniciarSensor(ina219_Bateria, "batería"); // Inicializa el sensor de
la batería
    iniciarSensor(ina219_Placa, "placa"); // Inicializa el sensor de
la placa

    resetearSensor(Direccion_Esclavo_Bateria, "batería"); // Reinicia
el sensor de la batería
    resetearSensor(Direccion_Esclavo_Placa, "placa"); // Reinicia
el sensor de la placa
    configurarSensor(Direccion_Esclavo_Bateria, "batería"); // Reinicia
el sensor de la batería
}
```

```
configurarSensor(Direccion_Esclavo_Placa, "placa"); // Reinicia
el sensor de la placa

// Configura los pines del motor como salidas
pinMode(motorPin1, OUTPUT);
pinMode(motorPin2, OUTPUT);
}

void loop()
{
    // Variables para el sensor de batería
    float sumVoltageBattery = 0.0, sumCurrentBattery = 0.0,
sumVoltageShuntBattery = 0.0;
    // Variables para el sensor de la placa
    float sumVoltageBoard = 0.0, sumCurrentBoard = 0.0,
sumVoltageShuntBoard = 0.0;
    // Variable para sumar las temperaturas
    float sumTemperature = 0.0;

    // Enciende el motor durante 1 segundo
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
    delay(2000); // Espera 2 segundo
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
    digitalWrite(motorPin2, HIGH);
    delay(100); // Se detiene 100 ms antes de realizar las medidas

    // Realiza 20 medidas y suma los valores para cada sensor
    for (int i = 0; i < 100; i++)
    {
        measureSensor(Direccion_Esclavo_Bateria, sumVoltageBattery,
sumVoltageShuntBattery, sumCurrentBattery, "batería");
        measureSensor(Direccion_Esclavo_Placa, sumVoltageBoard,
sumVoltageShuntBoard, sumCurrentBoard, "placa");

        int sensorValue = analogRead(sensorPin); // Lee el valor
analógico del pin
        float voltage = sensorValue * 3.3 / 4095; // Convierte el valor
leído a voltaje (0-3.3V)
        float temperature = (voltage - 0.75) * 100; // Convierte el voltaje
a temperatura en grados Celsius. Factor de conversión 0.01V/°C
proporcionado por el Datasheet.
        sumTemperature += temperature; // Suma la temperatura
a la acumulación

        delay(10); // Espera 10 ms entre cada medida
    }
}
```

```
// Calcula el promedio para el sensor de batería
float averageVoltageBattery = sumVoltageBattery / 100;
float averageCurrentBattery = sumCurrentBattery / 100;
float averageVoltageShuntBattery = sumVoltageShuntBattery / 100;

// Calcula el promedio para el sensor de la placa
float averageVoltageBoard = sumVoltageBoard / 100;
float averageCurrentBoard = sumCurrentBoard / 100;
float averageVoltageShuntBoard = sumVoltageShuntBoard / 100;

// Muestra los valores promedio en el Monitor Serial para cada sensor
Serial.print(averageVoltageBattery, 3);
Serial.print("_");
Serial.print(averageVoltageShuntBattery, 3);
Serial.print("_");
Serial.print(averageCurrentBattery, 3);
Serial.print("_");
Serial.print(averageVoltageBoard, 3);
Serial.print("_");
Serial.print(averageVoltageShuntBoard, 3);
Serial.print("_");
Serial.print(averageCurrentBoard, 3);

Serial.print('\r');

Serial.flush(); // Asegura que todos los datos se envíen.

// Configura el ESP32 para entrar en modo Deep Sleep durante 30
segundos
esp_sleep_enable_timer_wakeup(28 * 1000000); // 28 segundos en
microsegundos
esp_deep_sleep_start();
}
```



ANEXO III:

Presupuestos

LISTA DE COMPONENTES

NOMBRE DEL PRODUCTO	Sistema de alimentación de un heliostato autónomo.
APROBADO POR	Juan José Serrano Aguilera
FECHA DE APROBACIÓN	19/05/2024
CANTIDAD DE PIEZAS	15
COSTO TOTAL	44.45 €



NÚMERO DE PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	IMAGEN DE LA PIEZA	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL PIEZA	MONTAJE
1	ESP-32	Microcontrolador con Wi-Fi, Bluetooth y múltiples interfaces (GPIO, SPI, I2C, UART)	1		3.37 €	3.37 €	0 €
2	INA219	Sensor de tensión e intensidad compatible con I2C	2		1.36 €	2.72 €	0 €
3	Mini L298N	Módulo controlador de motores dual H-Bridge.	1		0.82 €	0.82 €	0 €
4	FT232RL	Convertidor USB a UART.	1		2.41 €	2.41 €	0 €
5	DC-DC S09	DC-DC S09: Convertidor reductor de voltaje ajustable.	1		1.26 €	1.26 €	0 €
6	TP4056	Módulo de carga para baterías de iones de litio con control de corriente constante.	1		0.37 €	0.37 €	0 €
7	INR18650-35E	Batería de litio	1		8.89 €	8.89 €	0 €
8	Caja porta baterías	Soporte para conectar baterías.	1		1.17 €	1.17 €	0 €
9	Interruptor conmutador	Dispositivo mecánico para controlar el flujo de corriente.	1		1.43 €	1.43 €	0 €
10	Célula fotovoltaica	Dispositivo que transforma la luz solar en electricidad.	1		3.71 €	3.71 €	0 €
11	Motor C.C.	Motor de corriente continua.	1		2.27 €	2.27 €	0 €
12	Resistencias 4.7k	Componente pasivo para limitar corriente.	2		0.1 €	0.2 €	0 €
12	PCB	Placa de circuito impreso.	1		8.60 €	8.60 €	5.13 €
13	Fungible (Flux y estaño)	Material empleado para el montaje.	--		2.10 €	2.10 €	0 €
CANTIDAD TOTAL DE PIEZAS			15			TOTAL	44.45 €



ANEXO IV:

Hojas de características

INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I²C Interface

1 Features

- Senses Bus Voltages from 0 to 26 V
- Reports Current, Voltage, and Power
- 16 Programmable Addresses
- High Accuracy: 0.5% (Maximum) Over Temperature (INA219B)
- Filtering Options
- Calibration Registers
- SOT23-8 and SOIC-8 Packages

2 Applications

- Servers
- Telecom Equipment
- Notebook Computers
- Power Management
- Battery Chargers
- Welding Equipment
- Power Supplies
- Test Equipment

3 Description

The INA219 is a current shunt and power monitor with an I²C- or SMBUS-compatible interface. The device monitors both shunt voltage drop and bus supply voltage, with programmable conversion times and filtering. A programmable calibration value, combined with an internal multiplier, enables direct readouts of current in amperes. An additional multiplying register calculates power in watts. The I²C- or SMBUS-compatible interface features 16 programmable addresses.

The INA219 is available in two grades: A and B. The B grade version has higher accuracy and higher precision specifications.

The INA219 senses across shunts on buses that can vary from 0 to 26 V. The device uses a single 3- to 5.5-V supply, drawing a maximum of 1 mA of supply current. The INA219 operates from –40°C to 125°C.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
INA219	SOIC (8)	3.91 mm × 4.90 mm
	SOT-23 (8)	1.63 mm × 2.90 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Simplified Schematic

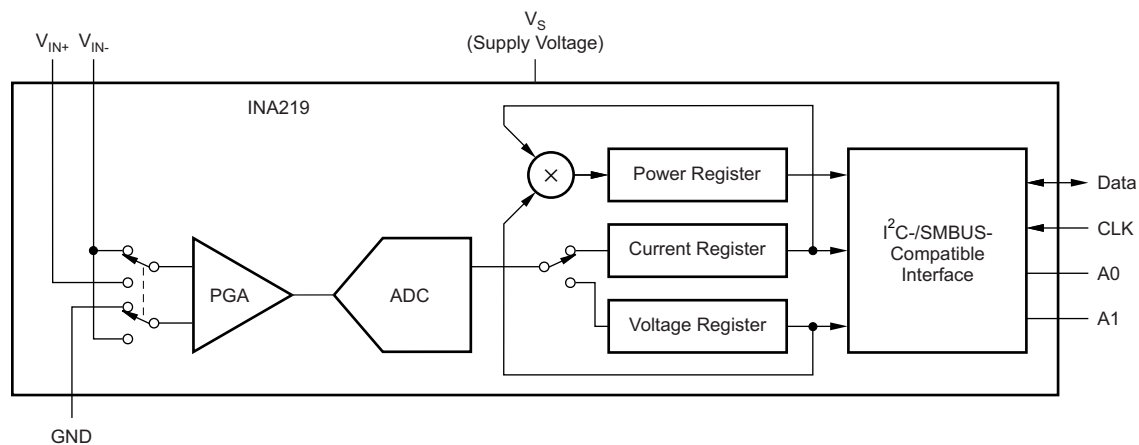


Table of Contents

1 Features	1	8.3 Feature Description	9
2 Applications	1	8.4 Device Functional Modes	11
3 Description	1	8.5 Programming	12
4 Revision History	2	8.6 Register Maps	18
5 Related Products	3	9 Application and Implementation	25
6 Pin Configuration and Functions	3	9.1 Application Information	25
7 Specifications	4	9.2 Typical Application	25
7.1 Absolute Maximum Ratings	4	10 Power Supply Recommendations	27
7.2 ESD Ratings	4	11 Layout	27
7.3 Recommended Operating Conditions	4	11.1 Layout Guidelines	27
7.4 Thermal Information	4	11.2 Layout Example	27
7.5 Electrical Characteristics	5	12 Device and Documentation Support	28
7.6 Bus Timing Diagram Definitions	6	12.1 Community Resources	28
7.7 Typical Characteristics	7	12.2 Trademarks	28
8 Detailed Description	9	12.3 Electrostatic Discharge Caution	28
8.1 Overview	9	12.4 Glossary	28
8.2 Functional Block Diagram	9	13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information	28

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

Changes from Revision F (September 2011) to Revision G	Page
• Added <i>ESD Ratings</i> table, <i>Feature Description</i> section, <i>Device Functional Modes</i> , <i>Application and Implementation</i> section, <i>Power Supply Recommendations</i> section, <i>Layout</i> section, <i>Device and Documentation Support</i> section, and <i>Mechanical, Packaging, and Orderable Information</i> section	1
• Updated <i>Bus Timing Diagram Definitions</i> table. I ² C timing table values were previously based on simulation and not characterized	6

Changes from Revision E (September 2010) to Revision F	Page
• Changed step 5 and step 6 values in Table 8	26

Changes from Revision D (September 2010) to Revision E	Page
• Updated <i>Packaging Information</i> table	3

5 Related Products

DEVICE	DESCRIPTION
INA209	Current/power monitor with watchdog, peak-hold, and fast comparator functions
INA210 , INA211 , INA212 , INA213 , INA214	Zero-drift, low-cost, analog current shunt monitor series in small package

6 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN		I/O	DESCRIPTION
	SOT-23	SOIC		
IN+	1	8	Analog Input	Positive differential shunt voltage. Connect to positive side of shunt resistor.
IN-	2	7	Analog Input	Negative differential shunt voltage. Connect to negative side of shunt resistor. Bus voltage is measured from this pin to ground.
GND	3	6	Analog	Ground
V _s	4	5	Analog	Power supply, 3 to 5.5 V
SCL	5	4	Digital Input	Serial bus clock line
SDA	6	3	Digital I/O	Serial bus data line
A0	7	2	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.
A1	8	1	Digital Input	Address pin. Table 1 shows pin settings and corresponding addresses.

7 Specifications

7.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT
V _S	Supply voltage		6	V
Analog Inputs IN+, IN-	Differential (V _{IN+} – V _{IN-}) ⁽²⁾	–26	26	V
	Common-mode (V _{IN+} + V _{IN-}) / 2	–0.3	26	V
SDA		GND – 0.3	6	V
SCL		GND – 0.3	V _S + 0.3	V
Input current into any pin			5	mA
Open-drain digital output current			10	mA
Operating temperature		–40	125	°C
T _J	Junction temperature		150	°C
T _{stg}	Storage temperature	–65	150	°C

(1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, which do not imply functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions*. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

(2) V_{IN+} and V_{IN-} may have a differential voltage of –26 to 26 V; however, the voltage at these pins must not exceed the range –0.3 to 26 V.

7.2 ESD Ratings

		VALUE	UNIT
V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001, all pins ⁽¹⁾	±4000
		Charged device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101, all pins ⁽²⁾	±750
		Machine Model (MM)	±200

(1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

(2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

7.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	NOM	MAX	UNIT
V _{CM}			12		V
V _S			3.3		V
T _A		–25		85	°C

7.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾		INA219		UNIT
		D (SOIC)	DCN (SOT)	
		8 PINS	8 PINS	
R _{θJA}	Junction-to-ambient thermal resistance	111.3	135.4	°C/W
R _{θJC(top)}	Junction-to-case (top) thermal resistance	55.9	68.1	°C/W
R _{θJB}	Junction-to-board thermal resistance	52	48.9	°C/W
ψ _{JT}	Junction-to-top characterization parameter	10.7	9.9	°C/W
ψ _{JB}	Junction-to-board characterization parameter	51.5	48.4	°C/W
R _{θJC(bot)}	Junction-to-case (bottom) thermal resistance	N/A	N/A	°C/W

(1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the *Semiconductor and IC Package Thermal Metrics* application report, SPRA953.

7.5 Electrical Characteristics:

At $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3.3\text{ V}$, $V_{IN+} = 12\text{V}$, $V_{SHUNT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 32\text{ mV}$, $\text{PGA} = /1$, and $\text{BRNG}^{(1)} = 1$, unless otherwise noted.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	INA219A			INA219B			UNIT	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
INPUT									
V_{SHUNT}	Full-scale current sense (input) voltage range	PGA = /1	0		±40	0		±40	mV
		PGA = /2	0		±80	0		±80	mV
		PGA = /4	0		±160	0		±160	mV
		PGA = /8	0		±320	0		±320	mV
Bus voltage (input voltage) range ⁽²⁾	BRNG = 1	0		32	0		32	V	
	BRNG = 0	0		16	0		16	V	
CMRR	Common-mode rejection	$V_{IN+} = 0$ to 26 V	100	120		100	120		dB
V_{OS}	Offset voltage, RTI ⁽³⁾ vs Temperature	PGA = /1		±10	±100		±10	±50 ⁽⁴⁾	µV
		PGA = /2		±20	±125		±20	±75 ⁽⁴⁾	µV
		PGA = /4		±30	±150		±30	±75 ⁽⁴⁾	µV
		PGA = /8		±40	±200		±40	±100 ⁽⁴⁾	µV
		$T_A = -25^\circ\text{C}$ to 85°C		0.1			0.1		µV/°C
PSRR	vs Power Supply	$V_S = 3$ to 5.5 V		10			10		µV/V
	Current sense gain error vs Temperature	$T_A = -25^\circ\text{C}$ to 85°C		±40			±40		m%
	IN+ pin input bias current	Active mode		20			20		µA
	IN– pin input bias current V_{IN-} pin input impedance	Active mode		20 320			20 320		µA kΩ
	IN+ pin input leakage ⁽⁵⁾	Power-down mode		0.1	±0.5		0.1	±0.5	µA
	IN– pin input leakage ⁽⁵⁾	Power-down mode		0.1	±0.5		0.1	±0.5	µA
DC ACCURACY									
	ADC basic resolution			12			12		bits
	Shunt voltage, 1 LSB step size			10			10		µV
	Bus voltage, 1 LSB step size			4			4		mV
	Current measurement error over Temperature			±0.2%	±0.5%		±0.2%	±0.3% ⁽⁴⁾	
		$T_A = -25^\circ\text{C}$ to 85°C				±1%		±0.5% ⁽⁴⁾	
	Bus voltage measurement error over Temperature			±0.2%	±0.5%		±0.2%	±0.5%	
		$T_A = -25^\circ\text{C}$ to 85°C				±1%		±1%	
	Differential nonlinearity			±0.1			±0.1		LSB
ADC TIMING									
ADC conversion time	12 bit			532	586		532	586	µs
	11 bit			276	304		276	304	µs
	10 bit			148	163		148	163	µs
	9 bit			84	93		84	93	µs
	Minimum convert input low time			4			4		µs
SMBus									
	SMBus timeout ⁽⁶⁾			28	35		28	35	ms
DIGITAL INPUTS (SDA as Input, SCL, A0, A1)									
	Input capacitance			3			3		pF
	Leakage input current	$0 \leq V_{IN} \leq V_S$		0.1	1		0.1	1	µA
	V_{IH} input logic level			0.7 (V_S)	6		0.7 (V_S)	6	V
	V_{IL} input logic level			–0.3	0.3 (V_S)		–0.3	0.3 (V_S)	V

(1) BRNG is bit 13 of the Configuration register 00h in [Figure 19](#).

(2) This parameter only expresses the full-scale range of the ADC scaling. In no event should more than 26 V be applied to this device.

(3) Referred-to-input (RTI)

(4) Indicates improved specifications of the INA219B.

(5) Input leakage is positive (current flowing into the pin) for the conditions shown at the top of the table. Negative leakage currents can occur under different input conditions.

(6) SMBus timeout in the INA219 resets the interface any time SCL or SDA is low for over 28 ms.

Electrical Characteristics: (continued)

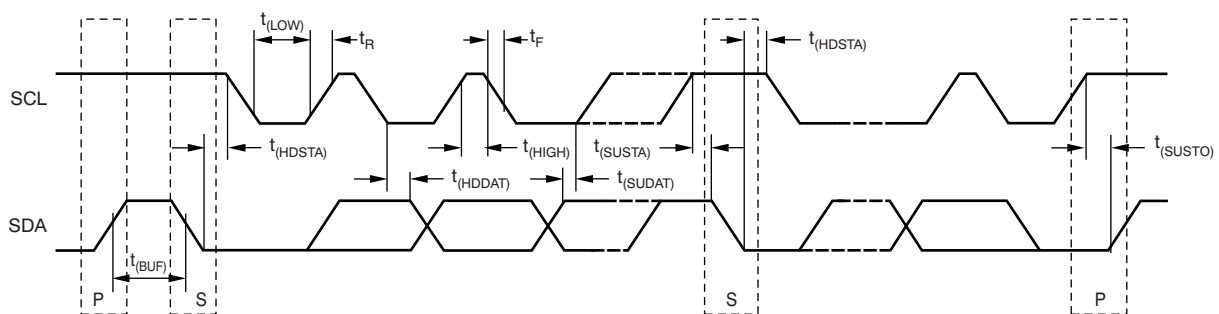
 At $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3.3\text{ V}$, $V_{IN+} = 12\text{V}$, $V_{SHUNT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 32\text{ mV}$, $\text{PGA} = /1$, and $\text{BRNG}^{(1)} = 1$, unless otherwise noted.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	INA219A			INA219B			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Hysteresis			500			500		mV
OPEN-DRAIN DIGITAL OUTPUTS (SDA)								
Logic 0 output level	$I_{\text{SINK}} = 3\text{ mA}$		0.15	0.4		0.15	0.4	V
High-level output leakage current	$V_{\text{OUT}} = V_S$		0.1	1		0.1	1	μA
POWER SUPPLY								
Operating supply range		3		5.5	3		5.5	V
Quiescent current			0.7	1		0.7	1	mA
Quiescent current, power-down mode			6	15		6	15	μA
Power-on reset threshold			2			2		V

7.6 Bus Timing Diagram Definitions⁽¹⁾

		FAST MODE		HIGH-SPEED MODE		UNIT
		MIN	MAX	MIN	MAX	
f_{SCL}	SCL operating frequency	0.001	0.4	0.001	2.56	MHz
$t_{\text{(BUF)}}$	Bus free time between STOP and START condition	1300		160		ns
$t_{\text{(HDSTA)}}$	Hold time after repeated START condition. After this period, the first clock is generated.	600		160		ns
$t_{\text{(SUSTA)}}$	Repeated START condition setup time	600		160		ns
$t_{\text{(SUSTO)}}$	STOP condition setup time	600		160		ns
$t_{\text{(HDDAT)}}$	Data hold time	0	900	0	90	ns
$t_{\text{(SUDAT)}}$	Data setup time	100		10		ns
$t_{\text{(LOW)}}$	SCL clock LOW period	1300		250		ns
$t_{\text{(HIGH)}}$	SCL clock HIGH period	600		60		ns
$t_{\text{F DA}}$	Data fall time		300		150	ns
$t_{\text{F CL}}$	Clock fall time		300		40	ns
$t_{\text{R CL}}$	Clock rise time		300		40	ns
$t_{\text{R CL}}$	Clock rise time for SCLK $\leq 100\text{kHz}$		1000			ns

(1) Values based on a statistical analysis of a one-time sample of devices. Minimum and maximum values are not ensured and not production tested.


Figure 1. Bus Timing Diagram

7.7 Typical Characteristics

At $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3.3\text{ V}$, $V_{IN+} = 12\text{ V}$, $V_{SHUNT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 32\text{ mV}$, $\text{PGA} = /1$, and $\text{BRNG} = 1$, unless otherwise noted.

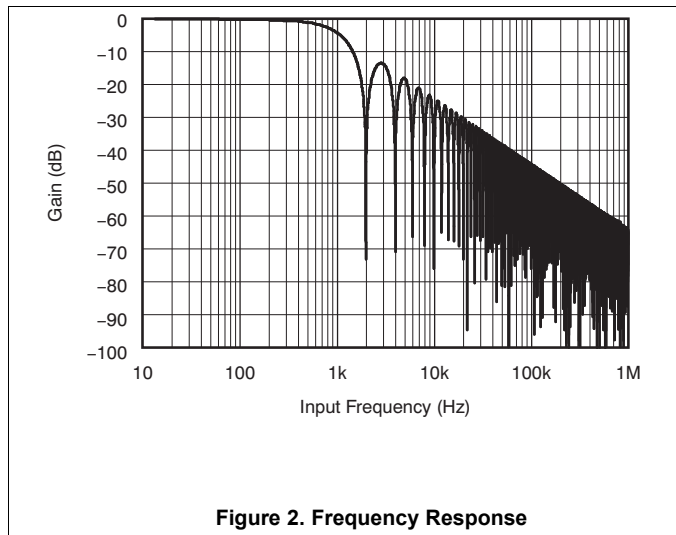


Figure 2. Frequency Response

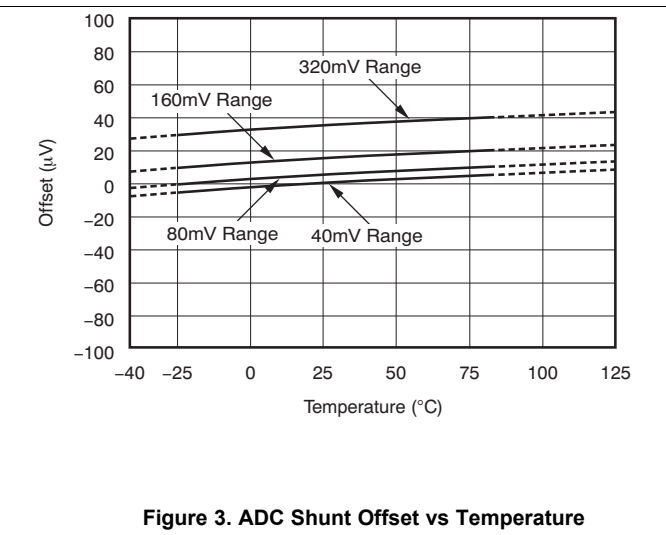


Figure 3. ADC Shunt Offset vs Temperature

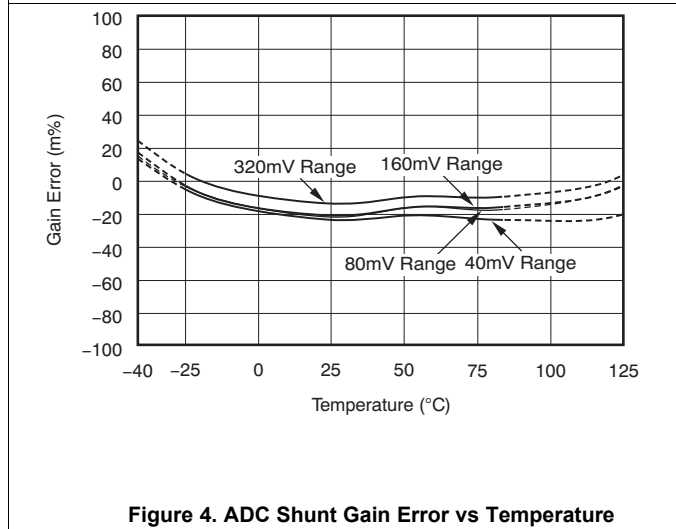


Figure 4. ADC Shunt Gain Error vs Temperature

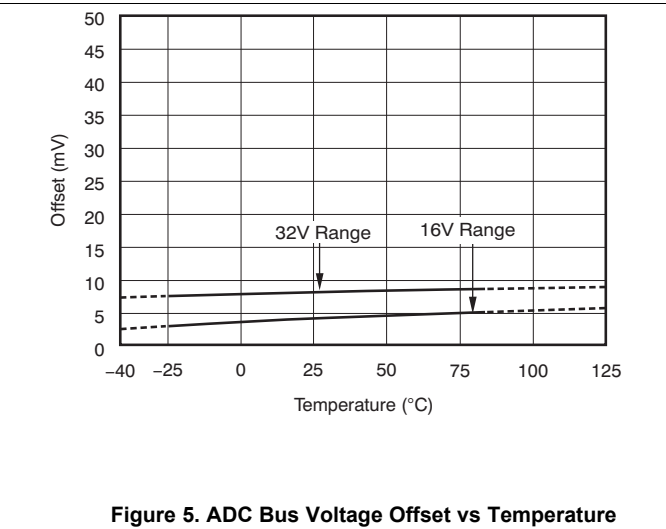


Figure 5. ADC Bus Voltage Offset vs Temperature

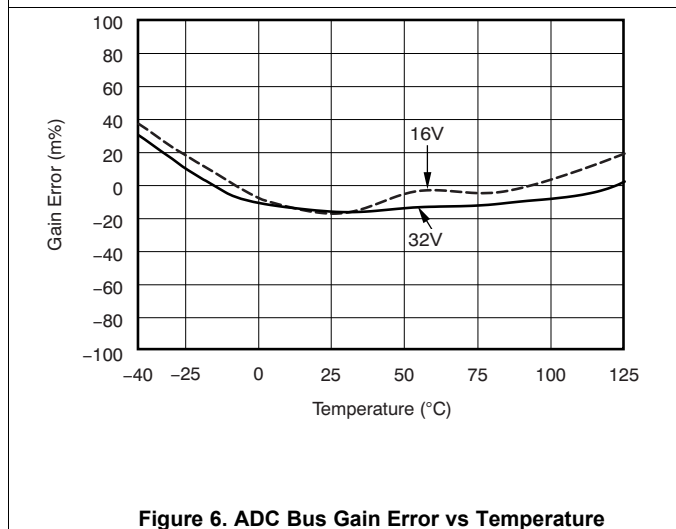


Figure 6. ADC Bus Gain Error vs Temperature

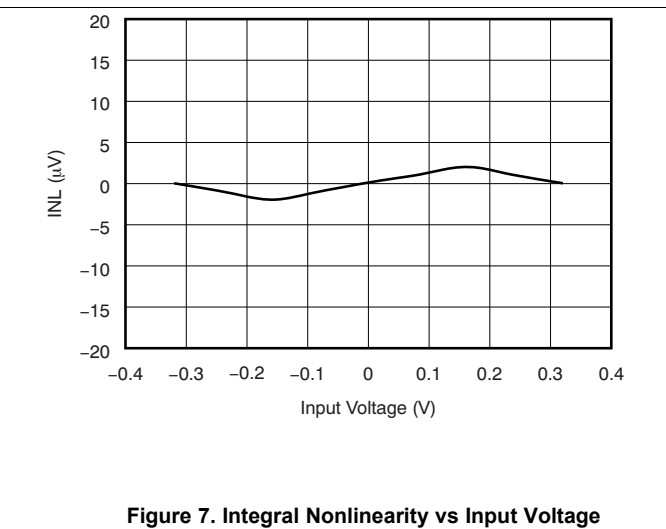


Figure 7. Integral Nonlinearity vs Input Voltage

Typical Characteristics (continued)

At $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3.3\text{ V}$, $V_{IN+} = 12\text{ V}$, $V_{SHUNT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 32\text{ mV}$, $\text{PGA} = /1$, and $\text{BRNG} = 1$, unless otherwise noted.

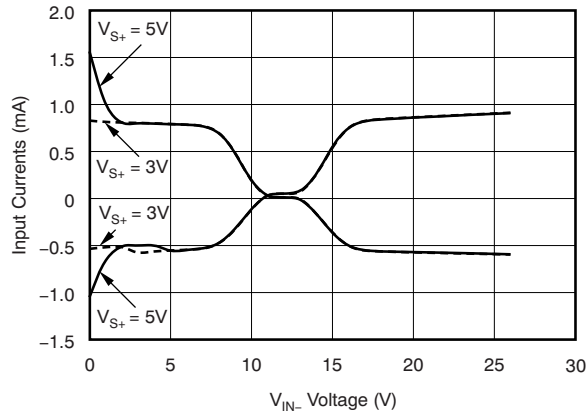


Figure 8. Input Currents With Large Differential Voltages (V_{IN+} at 12 V, Sweep Of V_{IN-})

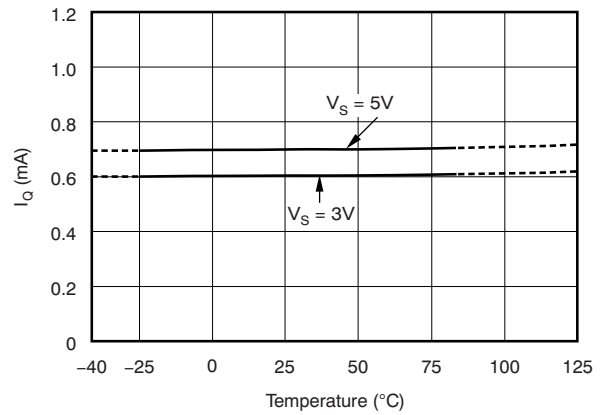


Figure 9. Active I_Q vs Temperature

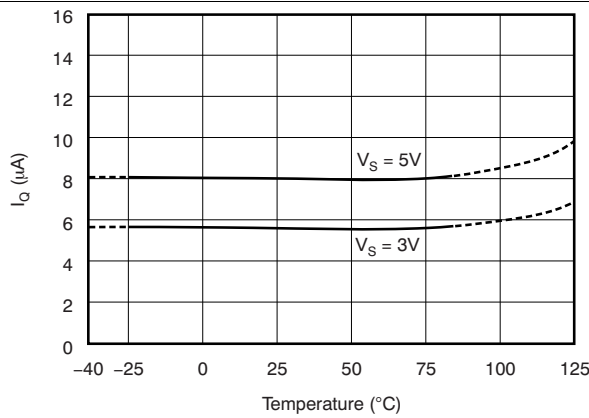


Figure 10. Shutdown I_Q vs Temperature

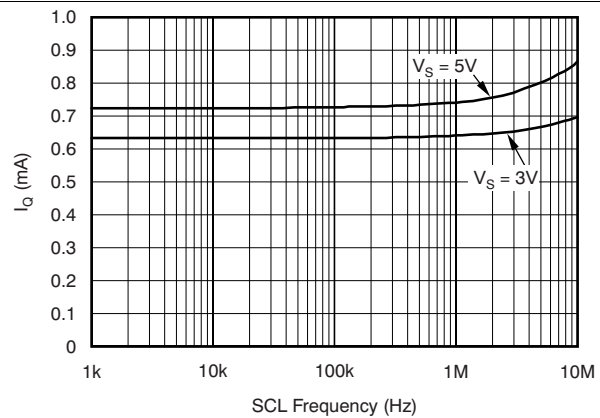


Figure 11. Active I_Q vs I^2C Clock Frequency

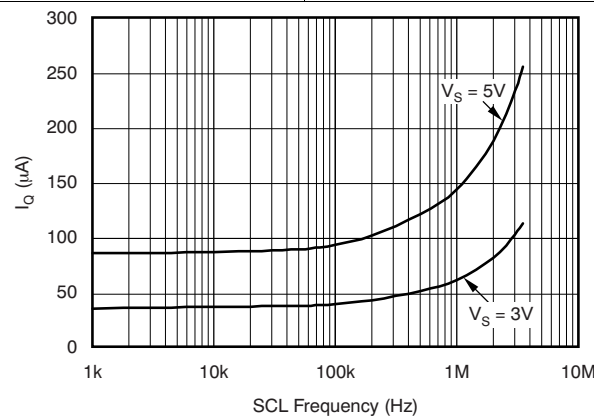


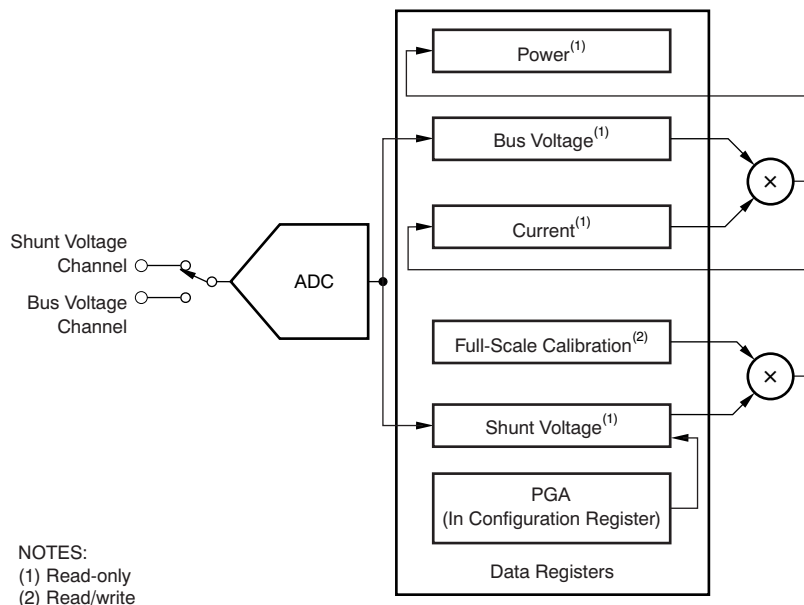
Figure 12. Shutdown I_Q vs I^2C Clock Frequency

8 Detailed Description

8.1 Overview

The INA219 is a digital current sense amplifier with an I²C- and SMBus-compatible interface. It provides digital current, voltage, and power readings necessary for accurate decision-making in precisely-controlled systems. Programmable registers allow flexible configuration for measurement resolution as well as continuous-versus-triggered operation. Detailed register information appears at the end of this data sheet, beginning with [Table 2](#). See the [Functional Block Diagram](#) section for a block diagram of the INA219 device.

8.2 Functional Block Diagram



8.3 Feature Description

8.3.1 Basic ADC Functions

The two analog inputs to the INA219, IN+ and IN–, connect to a shunt resistor in the bus of interest. The INA219 is typically powered by a separate supply from 3 to 5.5 V. The bus being sensed can vary from 0 to 26 V. There are no special considerations for power-supply sequencing (for example, a bus voltage can be present with the supply voltage off, and vice-versa). The INA219 senses the small drop across the shunt for shunt voltage, and senses the voltage with respect to ground from IN– for the bus voltage. [Figure 13](#) shows this operation.

When the INA219 is in the normal operating mode (that is, MODE bits of the Configuration register are set to 111), it continuously converts the shunt voltage up to the number set in the shunt voltage averaging function (Configuration register, SADC bits). The device then converts the bus voltage up to the number set in the bus voltage averaging (Configuration register, BADC bits). The Mode control in the Configuration register also permits selecting modes to convert only voltage or current, either continuously or in response to an event (triggered).

All current and power calculations are performed in the background and do not contribute to conversion time; conversion times shown in the [Electrical Characteristics](#): can be used to determine the actual conversion time.

Power-Down mode reduces the quiescent current and turns off current into the INA219 inputs, avoiding any supply drain. Full recovery from Power-Down requires 40 μs. ADC Off mode (set by the Configuration register, MODE bits) stops all conversions.

Writing any of the triggered convert modes into the Configuration register (even if the desired mode is already programmed into the register) triggers a single-shot conversion. [Table 6](#) lists the triggered convert mode settings.

Feature Description (continued)

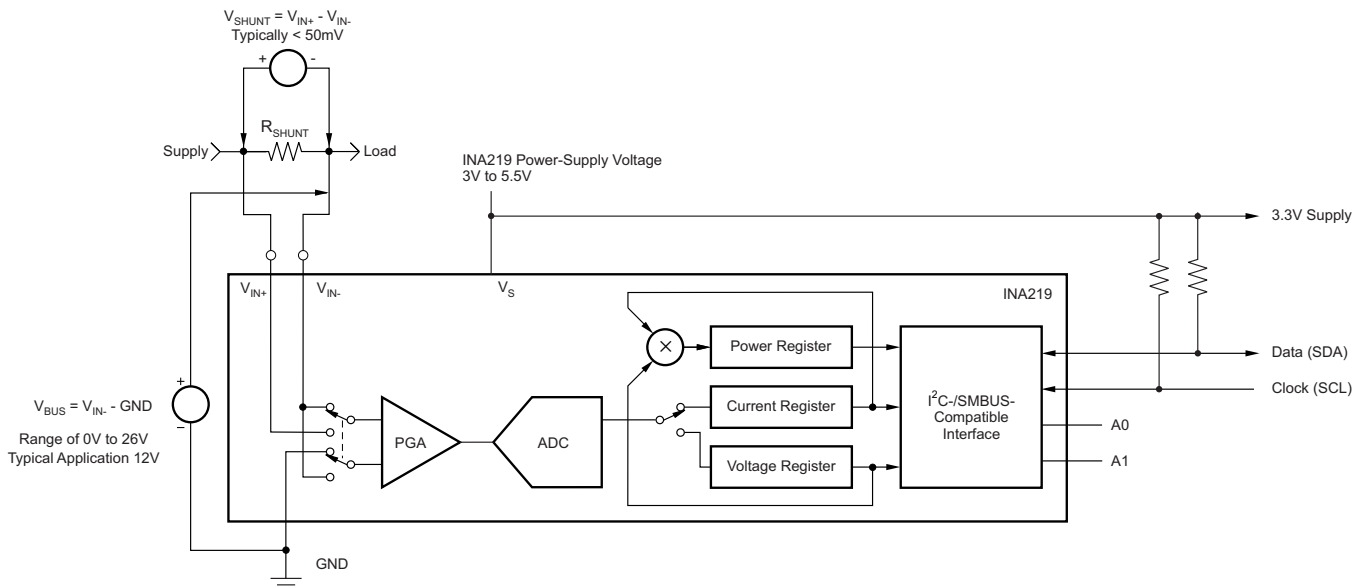


Figure 13. INA219 Configured for Shunt and Bus Voltage Measurement

Although the INA219 can be read at any time, and the data from the last conversion remain available, the conversion ready bit (Status register, CNVR bit) is provided to help coordinate one-shot or triggered conversions. The conversion ready bit is set after all conversions, averaging, and multiplication operations are complete.

The conversion ready bit clears under any of these conditions:

- Writing to the Configuration register, except when configuring the MODE bits for power down or ADC off (disable) modes
- Reading the Status register
- Triggering a single-shot conversion with the convert pin

8.3.1.1 Power Measurement

Current and bus voltage are converted at different points in time, depending on the resolution and averaging mode settings. For instance, when configured for 12-bit and 128 sample averaging, up to 68 ms in time between sampling these two values is possible. Again, these calculations are performed in the background and do not add to the overall conversion time.

8.3.1.2 PGA Function

If larger full-scale shunt voltages are desired, the INA219 provides a PGA function that increases the full-scale range up to 2, 4, or 8 times (320 mV). Additionally, the bus voltage measurement has two full-scale ranges: 16 or 32 V.

8.3.1.3 Compatibility With TI Hot Swap Controllers

The INA219 is designed for compatibility with hot swap controllers such as the TI [TPS2490](#). The TPS2490 uses a high-side shunt with a limit at 50 mV; the INA219 full-scale range of 40 mV enables the use of the same shunt for current sensing below this limit. When sensing is required at (or through) the 50-mV sense point of the TPS2490, the PGA of the INA219 can be set to /2 to provide an 80-mV full-scale range.

8.4 Device Functional Modes

8.4.1 Filtering and Input Considerations

Measuring current is often noisy, and such noise can be difficult to define. The INA219 offers several options for filtering by choosing resolution and averaging in the Configuration register. These filtering options can be set independently for either voltage or current measurement.

The internal ADC is based on a delta-sigma ($\Delta\Sigma$) front-end with a 500-kHz ($\pm 30\%$) typical sampling rate. This architecture has good inherent noise rejection; however, transients that occur at or very close to the sampling rate harmonics can cause problems. Because these signals are at 1 MHz and higher, they can be dealt with by incorporating filtering at the input of the INA219. The high frequency enables the use of low-value series resistors on the filter for negligible effects on measurement accuracy. In general, filtering the INA219 input is only necessary if there are transients at exact harmonics of the 500-kHz ($\pm 30\%$) sampling rate (>1 MHz). Filter using the lowest possible series resistance and ceramic capacitor. Recommended values are 0.1 to 1 μF . Figure 14 shows the INA219 with an additional filter added at the input.

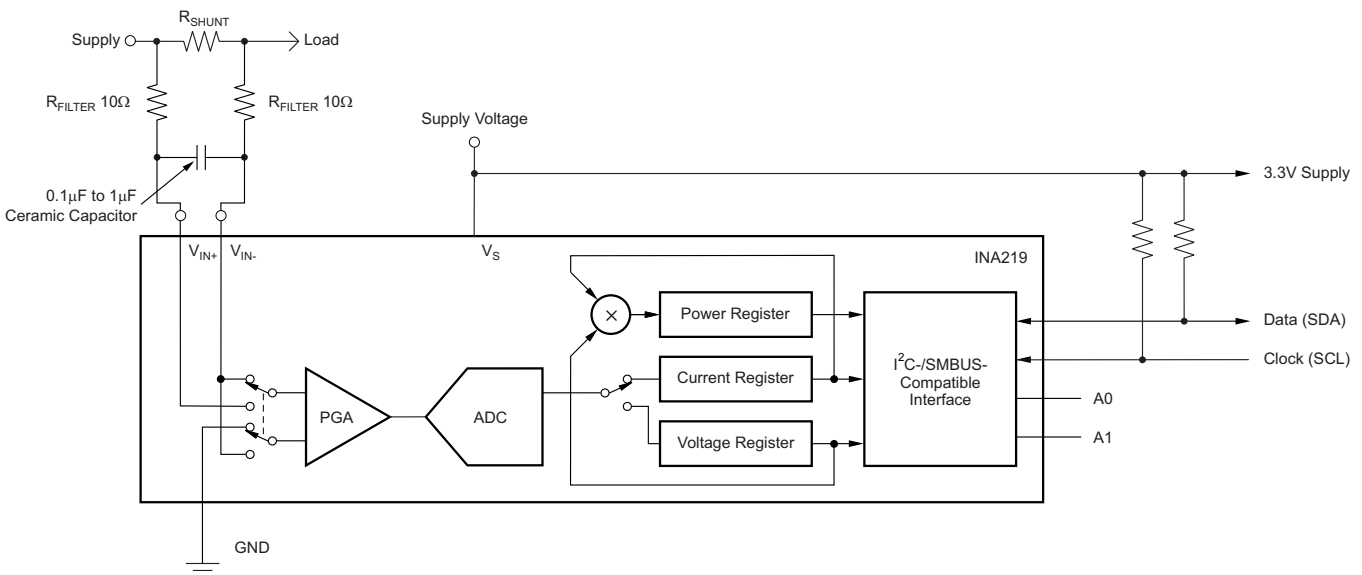


Figure 14. INA219 With Input Filtering

Overload conditions are another consideration for the INA219 inputs. The INA219 inputs are specified to tolerate 26 V across the inputs. A large differential scenario might be a short to ground on the load side of the shunt. This type of event can result in full power-supply voltage across the shunt (as long the power supply or energy storage capacitors support it). It must be remembered that removing a short to ground can result in inductive kickbacks that could exceed the 26-V differential and common-mode rating of the INA219. Inductive kickback voltages are best dealt with by zener-type transient-absorbing devices combined with sufficient energy storage capacitance.

In applications that do not have large energy storage electrolytics on one or both sides of the shunt, an input overstress condition may result from an excessive dV/dt of the voltage applied to the input. A hard physical short is the most likely cause of this event, particularly in applications with no large electrolytics present. This problem occurs because an excessive dV/dt can activate the ESD protection in the INA219 in systems where large currents are available. Testing has demonstrated that the addition of 10- Ω resistors in series with each input of the INA219 sufficiently protects the inputs against dV/dt failure up to the 26-V rating of the INA219. These resistors have no significant effect on accuracy.

8.5 Programming

An important aspect of the INA219 device is that it measure current or power if it is programmed based on the system. The device measures both the differential voltage applied between the IN+ and IN- input pins and the voltage at IN- pin. In order for the device to report both current and power values, the user must program the resolution of the Current Register (04h) and the value of the shunt resistor (R_{SHUNT}) present in the application to develop the differential voltage applied between the input pins. Both the Current_LSB and shunt resistor value are used in the calculation of the Calibration Register value that the device uses to calculate the corresponding current and power values based on the measured shunt and bus voltages.

After programming the Calibration Register, the Current Register (04h) and Power Register (03h) update accordingly based on the corresponding shunt voltage and bus voltage measurements. Until the Calibration Register is programmed, the Current Register (04h) and Power Register (03h) remain at zero.

8.5.1 Programming the Calibration Register

The Calibration Register is calculated based on [Equation 1](#). This equation includes the term Current_LSB, which is the programmed value for the LSB for the Current Register (04h). The user uses this value to convert the value in the Current Register (04h) to the actual current in amperes. The highest resolution for the Current Register (04h) can be obtained by using the smallest allowable Current_LSB based on the maximum expected current as shown in [Equation 2](#). While this value yields the highest resolution, it is common to select a value for the Current_LSB to the nearest round number above this value to simplify the conversion of the Current Register (04h) and Power Register (03h) to amperes and watts respectively. The R_{SHUNT} term is the value of the external shunt used to develop the differential voltage across the input pins. The Power Register (03h) is internally set to be 20 times the programmed Current_LSB see [Equation 3](#).

$$\text{Cal} = \text{trunc} \left[\frac{0.04096}{\text{Current_LSB} \times R_{SHUNT}} \right]$$

where

- 0.04096 is an internal fixed value used to ensure scaling is maintained properly (1)

$$\text{Current_LSB} = \frac{\text{Maximum Expected Current}}{2^{15}} \quad (2)$$

$$\text{Power_LSB} = 20 \text{ Current_LSB} \quad (3)$$

Shunt voltage is calculated by multiplying the Shunt Voltage Register contents with the Shunt Voltage LSB of 10 μV .

The Bus Voltage register bits are not right-aligned. In order to compute the value of the Bus Voltage, Bus Voltage Register contents must be shifted right by three bits. This shift puts the BD0 bit in the LSB position so that the contents can be multiplied by the Bus Voltage LSB of 4-mV to compute the bus voltage measured by the device.

After programming the Calibration Register, the value expected in the Current Register (04h) can be calculated by multiplying the Shunt Voltage register contents by the Calibration Register and then dividing by 4096 as shown in [Equation 4](#). To obtain a value in amperes the Current register value is multiplied by the programmed Current_LSB.

$$\text{Current Register} = \frac{\text{Shunt Voltage Register} \times \text{Calibration Register}}{4096} \quad (4)$$

The value expected in the Power register (03h) can be calculated by multiplying the Current register value by the Bus Voltage register value and then dividing by 5000 as shown in [Equation 5](#). Power Register content is multiplied by Power LSB which is 20 times the Current_LSB for a power value in watts.

$$\text{Power Register} = \frac{\text{Current Register} \times \text{Bus Voltage Register}}{5000} \quad (5)$$

Programming (continued)

8.5.2 Programming the Power Measurement Engine

8.5.2.1 Calibration Register and Scaling

The Calibration Register enables the user to scale the Current Register (04h) and Power Register (03h) to the most useful value for a given application. For example, set the Calibration Register such that the largest possible number is generated in the Current Register (04h) or Power Register (03h) at the expected full-scale point. This approach yields the highest resolution using the previously calculated minimum Current_LSB in the equation for the Calibration Register. The Calibration Register can also be selected to provide values in the Current Register (04h) and Power Register (03h) that either provide direct decimal equivalents of the values being measured, or yield a round LSB value for each corresponding register. After these choices have been made, the Calibration Register also offers possibilities for end user system-level calibration. After determining the exact current by using an external ammeter, the value of the Calibration Register can then be adjusted based on the measured current result of the INA219 to cancel the total system error as shown in [Equation 6](#).

$$\text{Corrected_Full_Scale_Cal} = \text{trunc} \left(\frac{\text{Cal} \times \text{MeasShuntCurrent}}{\text{INA219_Current}} \right) \quad (6)$$

8.5.3 Simple Current Shunt Monitor Usage (No Programming Necessary)

The INA219 can be used without any programming if it is only necessary to read a shunt voltage drop and bus voltage with the default 12-bit resolution, 320-mV shunt full-scale range (PGA = /8), 32-V bus full-scale range, and continuous conversion of shunt and bus voltage.

Without programming, current is measured by reading the shunt voltage. The Current register and Power register are only available if the Calibration register contains a programmed value.

8.5.4 Default Settings

The default power-up states of the registers are shown in the [Register Details](#) section of this data sheet. These registers are volatile, and if programmed to other than default values, must be re-programmed at every device power-up. Detailed information on programming the Calibration register specifically is given in the section, [Programming the Calibration Register](#).

8.5.5 Bus Overview

The INA219 offers compatibility with both I²C and SMBus interfaces. The I²C and SMBus protocols are essentially compatible with one another.

The I²C interface is used throughout this data sheet as the primary example, with SMBus protocol specified only when a difference between the two systems is being addressed. Two bidirectional lines, SCL and SDA, connect the INA219 to the bus. Both SCL and SDA are open-drain connections.

The device that initiates the transfer is called a *master*, and the devices controlled by the master are *slaves*. The bus must be controlled by a master device that generates the serial clock (SCL), controls the bus access, and generates START and STOP conditions.

To address a specific device, the master initiates a START condition by pulling the data signal line (SDA) from a HIGH to a LOW logic level while SCL is HIGH. All slaves on the bus shift in the slave address byte on the rising edge of SCL, with the last bit indicating whether a read or write operation is intended. During the ninth clock pulse, the slave being addressed responds to the master by generating an Acknowledge and pulling SDA LOW.

Data transfer is then initiated and eight bits of data are sent, followed by an *Acknowledge* bit. During data transfer, SDA must remain stable while SCL is HIGH. Any change in SDA while SCL is HIGH is interpreted as a START or STOP condition.

Once all data have been transferred, the master generates a STOP condition, indicated by pulling SDA from LOW to HIGH while SCL is HIGH. The INA219 includes a 28-ms timeout on its interface to prevent locking up an SMBus.

Programming (continued)

8.5.5.1 Serial Bus Address

To communicate with the INA219, the master must first address slave devices through a slave address byte. The slave address byte consists of seven address bits, and a direction bit indicating the intent of executing a read or write operation.

The INA219 has two address pins, A0 and A1. [Table 1](#) describes the pin logic levels for each of the 16 possible addresses. The state of pins A0 and A1 is sampled on every bus communication and should be set before any activity on the interface occurs. The address pins are read at the start of each communication event.

Table 1. INA219 Address Pins and Slave Addresses

A1	A0	SLAVE ADDRESS
GND	GND	1000000
GND	V _{S+}	1000001
GND	SDA	1000010
GND	SCL	1000011
V _{S+}	GND	1000100
V _{S+}	V _{S+}	1000101
V _{S+}	SDA	1000110
V _{S+}	SCL	1000111
SDA	GND	1001000
SDA	V _{S+}	1001001
SDA	SDA	1001010
SDA	SCL	1001011
SCL	GND	1001100
SCL	V _{S+}	1001101
SCL	SDA	1001110
SCL	SCL	1001111

8.5.5.2 Serial Interface

The INA219 operates only as a slave device on the I²C bus and SMBus. Connections to the bus are made through the open-drain I/O lines SDA and SCL. The SDA and SCL pins feature integrated spike suppression filters and Schmitt triggers to minimize the effects of input spikes and bus noise. The INA219 supports the transmission protocol for fast (1- to 400-kHz) and high-speed (1-kHz to 2.56-MHz) modes. All data bytes are transmitted most significant byte first.

8.5.6 Writing to and Reading from the INA219

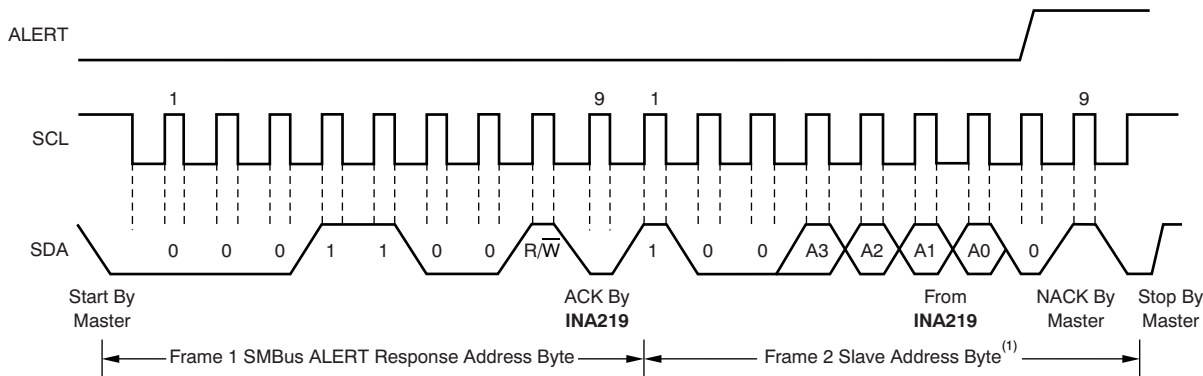
Accessing a particular register on the INA219 is accomplished by writing the appropriate value to the register pointer. Refer to [Table 2](#) for a complete list of registers and corresponding addresses. The value for the register pointer as shown in [Figure 18](#) is the first byte transferred after the slave address byte with the R/W bit LOW. Every write operation to the INA219 requires a value for the register pointer.

Writing to a register begins with the first byte transmitted by the master. This byte is the slave address, with the R/W bit LOW. The INA219 then acknowledges receipt of a valid address. The next byte transmitted by the master is the address of the register to which data will be written. This register address value updates the register pointer to the desired register. The next two bytes are written to the register addressed by the register pointer. The INA219 acknowledges receipt of each data byte. The master may terminate data transfer by generating a START or STOP condition.

When reading from the INA219, the last value stored in the register pointer by a write operation determines which register is read during a read operation. To change the register pointer for a read operation, a new value must be written to the register pointer. This write is accomplished by issuing a slave address byte with the R/W bit LOW, followed by the register pointer byte. No additional data are required. The master then generates a START condition and sends the slave address byte with the R/W bit HIGH to initiate the read command. The next byte is transmitted by the slave and is the most significant byte of the register indicated by the register

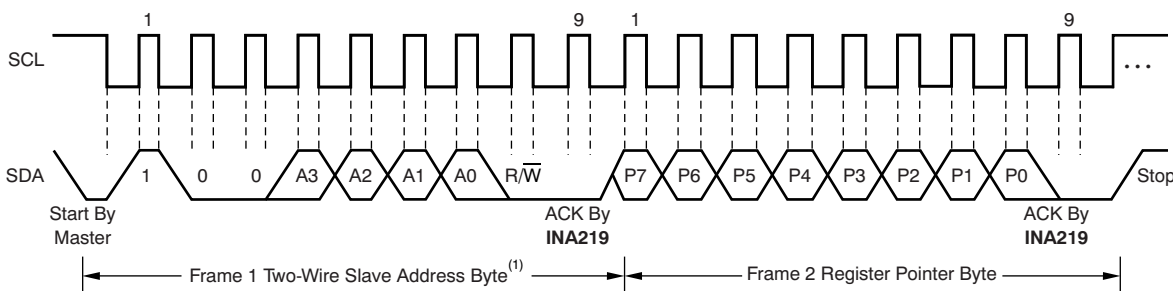
pointer. This byte is followed by an *Acknowledge* from the master; then the slave transmits the least significant byte. The master acknowledges receipt of the data byte. The master may terminate data transfer by generating a *Not-Acknowledge* after receiving any data byte, or generating a START or STOP condition. If repeated reads from the same register are desired, it is not necessary to continually send the register pointer bytes; the INA219 retains the register pointer value until it is changed by the next write operation.

[Figure 15](#) and [Figure 16](#) show write and read operation timing diagrams, respectively. Note that register bytes are sent most-significant byte first, followed by the least significant byte. [Figure 17](#) shows the timing diagram for the SMBus Alert response operation. [Figure 18](#) shows a typical register pointer configuration.



NOTE (1): The value of the Slave Address Byte is determined by the settings of the A0 and A1 pins. Refer to Table 1.

Figure 17. Timing Diagram for SMBus Alert



NOTE (1): The value of the Slave Address Byte is determined by the settings of the A0 and A1 pins. Refer to Table 1.

Figure 18. Typical Register Pointer Set

8.5.6.1 High-Speed I²C Mode

When the bus is idle, both the SDA and SCL lines are pulled high by the pull-up devices. The master generates a start condition followed by a valid serial byte containing high-speed (HS) master code 00001XXX. This transmission is made in fast (400 kbps) or standard (100 kbps) (F/S) mode at no more than 400 kbps. The INA219 does not acknowledge the HS master code, but does recognize it and switches its internal filters to support 2.56 Mbps operation.

The master then generates a repeated start condition (a repeated start condition has the same timing as the start condition). After this repeated start condition, the protocol is the same as F/S mode, except that transmission speeds up to 2.56 Mbps are allowed. Instead of using a stop condition, repeated start conditions should be used to secure the bus in HS-mode. A stop condition ends the HS-mode and switches all the internal filters of the INA219 to support the F/S mode. For bus timing, see [Bus Timing Diagram Definitions^{\(1\)}](#) and [Figure 1](#).

8.5.6.2 Power-Up Conditions

Power-up conditions apply to a software reset through the RST bit (bit 15) in the Configuration register, or the I²C bus General Call Reset.

(1) Values based on a statistical analysis of a one-time sample of devices. Minimum and maximum values are not ensured and not production tested.

8.6 Register Maps

8.6.1 Register Information

The INA219 uses a bank of registers for holding configuration settings, measurement results, maximum/minimum limits, and status information. [Table 2](#) summarizes the INA219 registers; [Functional Block Diagram](#) shows registers.

Register contents are updated 4 μ s after completion of the write command. Therefore, a 4- μ s delay is required between completion of a write to a given register and a subsequent read of that register (without changing the pointer) when using SCL frequencies in excess of 1 MHz.

Table 2. Summary of Register Set

POINTER ADDRESS	REGISTER NAME	FUNCTION	POWER-ON RESET		TYPE ⁽¹⁾
			BINARY	HEX	
00	Configuration	All-register reset, settings for bus voltage range, PGA Gain, ADC resolution/averaging.	00111001 10011111	399F	R/W
01	Shunt voltage	Shunt voltage measurement data.	Shunt voltage	—	R
02	Bus voltage	Bus voltage measurement data.	Bus voltage	—	R
03	Power ⁽²⁾	Power measurement data.	00000000 00000000	0000	R
04	Current ⁽²⁾	Contains the value of the current flowing through the shunt resistor.	00000000 00000000	0000	R
05	Calibration	Sets full-scale range and LSB of current and power measurements. Overall system calibration.	00000000 00000000	0000	R/W

(1) Type: R = Read only, R/W = Read/Write.

(2) The Power register and Current register default to 0 because the Calibration register defaults to 0, yielding a zero current value until the Calibration register is programmed.

8.6.2 Register Details

All INA219 16-bit registers are actually two 8-bit bytes through the I²C interface.

8.6.2.1 Configuration Register (address = 00h) [reset = 399Fh]

Figure 19. Configuration Register

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
RST	—	BRNG	PG1	PG0	BADC 4	BADC 3	BADC 2	BADC 1	SADC 4	SADC 3	SADC 2	SADC 1	MODE 3	MODE 2	MODE 1
R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1

LEGEND: R/W = Read/Write; R = Read only; -n = value after reset

Table 3. Bit Descriptions

RST:	Reset Bit
Bit 15	Setting this bit to '1' generates a system reset that is the same as power-on reset. Resets all registers to default values; this bit self-clears.
BRNG:	Bus Voltage Range
Bit 13	0 = 16V FSR 1 = 32V FSR (default value)
PG:	PGA (Shunt Voltage Only)
Bits 11, 12	Sets PGA gain and range. Note that the PGA defaults to +8 (320mV range). Table 4 shows the gain and range for the various product gain settings.

Table 4. PG Bit Settings⁽¹⁾

PG1	PG0	GAIN	Range
0	0	1	±40 mV
0	1	/2	±80 mV
1	0	/4	±160 mV
1	1	/8	±320 mV

(1) Shaded values are default.

BADC:	BADC Bus ADC Resolution/Averaging
Bits 7–10	These bits adjust the Bus ADC resolution (9-, 10-, 11-, or 12-bit) or set the number of samples used when averaging results for the Bus Voltage Register (02h).

SADC: **SADC Shunt ADC Resolution/Averaging**

Bits 3–6

These bits adjust the Shunt ADC resolution (9-, 10-, 11-, or 12-bit) or set the number of samples used when averaging results for the Shunt Voltage Register (01h).
 BADC (Bus) and SADC (Shunt) ADC resolution/averaging and conversion time settings are shown in [Table 5](#).

Table 5. ADC Settings⁽¹⁾

ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	Mode/Samples	Conversion Time
0	X ⁽²⁾	0	0	9 bit	84 µs
0	X ⁽²⁾	0	1	10 bit	148 µs
0	X ⁽²⁾	1	0	11 bit	276 µs
0	X ⁽²⁾	1	1	12 bit	532 µs
1	0	0	0	12 bit	532 µs
1	0	0	1	2	1.06 ms
1	0	1	0	4	2.13 ms
1	0	1	1	8	4.26 ms
1	1	0	0	16	8.51 ms
1	1	0	1	32	17.02 ms
1	1	1	0	64	34.05 ms
1	1	1	1	128	68.10 ms

(1) Shaded values are default.

(2) X = Don't care

MODE: **Operating Mode**

Bits 0–2

Selects continuous, triggered, or power-down mode of operation. These bits default to continuous shunt and bus measurement mode. The mode settings are shown in [Table 6](#).

Table 6. Mode Settings⁽¹⁾

MODE3	MODE2	MODE1	MODE
0	0	0	Power-down
0	0	1	Shunt voltage, triggered
0	1	0	Bus voltage, triggered
0	1	1	Shunt and bus, triggered
1	0	0	ADC off (disabled)
1	0	1	Shunt voltage, continuous
1	1	0	Bus voltage, continuous
1	1	1	Shunt and bus, continuous

(1) Shaded values are default.

8.6.3 Data Output Registers

8.6.3.1 Shunt Voltage Register (address = 01h)

The Shunt Voltage register stores the current shunt voltage reading, V_{SHUNT} . Shunt Voltage register bits are shifted according to the PGA setting selected in the Configuration register (00h). When multiple sign bits are present, they will all be the same value. Negative numbers are represented in 2's complement format. Generate the 2's complement of a negative number by complementing the absolute value binary number and adding 1. Extend the sign, denoting a negative number by setting the MSB = 1. Extend the sign to any additional sign bits to form the 16-bit word.

Example: For a value of $V_{SHUNT} = -320$ mV:

1. Take the absolute value (include accuracy to 0.01 mV) → 320.00
2. Translate this number to a whole decimal number → 32000
3. Convert it to binary → 111 1101 0000 0000

4. Complement the binary result : 000 0010 1111 1111
5. Add 1 to the Complement to create the Two's Complement formatted result → 000 0011 0000 0000
6. Extend the sign and create the 16-bit word: 1000 0011 0000 0000 = 8300h (Remember to extend the sign to all sign-bits, as necessary based on the PGA setting.)

At PGA = /8, full-scale range = ±320 mV (decimal = 32000). For $V_{SHUNT} = +320$ mV, Value = 7D00h; For $V_{SHUNT} = -320$ mV, Value = 8300h; and LSB = 10 μ V.

Figure 20. Shunt Voltage Register at PGA = /8

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SIGN	SD14 ₈	SD13 ₈	SD12 ₈	SD11 ₈	SD10 ₈	SD9 ₈	SD8 ₈	SD7 ₈	SD6 ₈	SD5 ₈	SD4 ₈	SD3 ₈	SD2 ₈	SD1 ₈	SD0 ₈

At PGA = /4, full-scale range = ±160 mV (decimal = 16000). For $V_{SHUNT} = +160$ mV, Value = 3E80h; For $V_{SHUNT} = -160$ mV, Value = C180h; and LSB = 10 μ V.

Figure 21. Shunt Voltage Register at PGA = /4

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SIGN	SIGN	SD13 ₄	SD12 ₄	SD11 ₄	SD10 ₄	SD9 ₄	SD8 ₄	SD7 ₄	SD6 ₄	SD5 ₄	SD4 ₄	SD3 ₄	SD2 ₄	SD1 ₄	SD0 ₄

At PGA = /2, full-scale range = ±80 mV (decimal = 8000). For $V_{SHUNT} = +80$ mV, Value = 1F40h; For $V_{SHUNT} = -80$ mV, Value = E0C0h; and LSB = 10 μ V.

Figure 22. Shunt Voltage Register at PGA = /2

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SIGN	SIGN	SIGN	SD12 ₂	SD11 ₂	SD10 ₂	SD9 ₂	SD8 ₂	SD7 ₂	SD6 ₂	SD5 ₂	SD4 ₂	SD3 ₂	SD2 ₂	SD1 ₂	SD0 ₂

At PGA = /1, full-scale range = ±40 mV (decimal = 4000). For $V_{SHUNT} = +40$ mV, Value = 0FA0h; For $V_{SHUNT} = -40$ mV, Value = F060h; and LSB = 10 μ V.

Figure 23. Shunt Voltage Register at PGA = /1

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
SIGN	SIGN	SIGN	SIGN	SD11 ₁	SD10 ₁	SD9 ₁	SD8 ₁	SD7 ₁	SD6 ₁	SD5 ₁	SD4 ₁	SD3 ₁	SD2 ₁	SD1 ₁	SD0 ₁

Table 7. Shunt Voltage Register Format⁽¹⁾

V _{SHUNT} Reading (mV)	Decimal Value	PGA = /8 (D15:D0)	PGA = /4 (D15:D0)	PGA = /2 (D15:D0)	PGA = /1 (D15:D0)
320.02	32002	0111 1101 0000 0000	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
320.01	32001	0111 1101 0000 0000	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
320.00	32000	0111 1101 0000 0000	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
319.99	31999	0111 1100 1111 1111	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
319.98	31998	0111 1100 1111 1110	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
160.02	16002	0011 1110 1000 0010	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
160.01	16001	0011 1110 1000 0001	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
160.00	16000	0011 1110 1000 0000	0011 1110 1000 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
159.99	15999	0011 1110 0111 1111	0011 1110 0111 1111	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
159.98	15998	0011 1110 0111 1110	0011 1110 0111 1110	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80.02	8002	0001 1111 0100 0010	0001 1111 0100 0010	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
80.01	8001	0001 1111 0100 0001	0001 1111 0100 0001	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
80.00	8000	0001 1111 0100 0000	0001 1111 0100 0000	0001 1111 0100 0000	0000 1111 1010 0000
79.99	7999	0001 1111 0011 1111	0001 1111 0011 1111	0001 1111 0011 1111	0000 1111 1010 0000
79.98	7998	0001 1111 0011 1110	0001 1111 0011 1110	0001 1111 0011 1110	0000 1111 1010 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
40.02	4002	0000 1111 1010 0010	0000 1111 1010 0010	0000 1111 1010 0010	0000 1111 1010 0000
40.01	4001	0000 1111 1010 0001	0000 1111 1010 0001	0000 1111 1010 0001	0000 1111 1010 0000
40.00	4000	0000 1111 1010 0000	0000 1111 1010 0000	0000 1111 1010 0000	0000 1111 1010 0000
39.99	3999	0000 1111 1001 1111	0000 1111 1001 1111	0000 1111 1001 1111	0000 1111 1001 1111
39.98	3998	0000 1111 1001 1110	0000 1111 1001 1110	0000 1111 1001 1110	0000 1111 1001 1110
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.02	2	0000 0000 0000 0010	0000 0000 0000 0010	0000 0000 0000 0010	0000 0000 0000 0010
0.01	1	0000 0000 0000 0001	0000 0000 0000 0001	0000 0000 0000 0001	0000 0000 0000 0001
0	0	0000 0000 0000 0000	0000 0000 0000 0000	0000 0000 0000 0000	0000 0000 0000 0000
-0.01	-1	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111
-0.02	-2	1111 1111 1111 1110	1111 1111 1111 1110	1111 1111 1111 1110	1111 1111 1111 1110
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-39.98	-3998	1111 0000 0110 0010	1111 0000 0110 0010	1111 0000 0110 0010	1111 0000 0110 0010
-39.99	-3999	1111 0000 0110 0001	1111 0000 0110 0001	1111 0000 0110 0001	1111 0000 0110 0001
-40.00	-4000	1111 0000 0110 0000	1111 0000 0110 0000	1111 0000 0110 0000	1111 0000 0110 0000
-40.01	-4001	1111 0000 0101 1111	1111 0000 0101 1111	1111 0000 0101 1111	1111 0000 0110 0000
-40.02	-4002	1111 0000 0101 1110	1111 0000 0101 1110	1111 0000 0101 1110	1111 0000 0110 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-79.98	-7998	1110 0000 1100 0010	1110 0000 1100 0010	1110 0000 1100 0010	1111 0000 0110 0000
-79.99	-7999	1110 0000 1100 0001	1110 0000 1100 0001	1110 0000 1100 0001	1111 0000 0110 0000
-80.00	-8000	1110 0000 1100 0000	1110 0000 1100 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-80.01	-8001	1110 0000 1011 1111	1110 0000 1011 1111	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-80.02	-8002	1110 0000 1011 1110	1110 0000 1011 1110	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-159.98	-15998	1100 0001 1000 0010	1100 0001 1000 0010	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-159.99	-15999	1100 0001 1000 0001	1100 0001 1000 0001	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-160.00	-16000	1100 0001 1000 0000	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-160.01	-16001	1100 0001 0111 1111	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-160.02	-16002	1100 0001 0111 1110	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-319.98	-31998	1000 0011 0000 0010	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-319.99	-31999	1000 0011 0000 0001	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-320.00	-32000	1000 0011 0000 0000	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-320.01	-32001	1000 0011 0000 0000	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000
-320.02	-32002	1000 0011 0000 0000	1100 0001 1000 0000	1110 0000 1100 0000	1111 0000 0110 0000

(1) Out-of-range values are shown in gray shading.

8.6.3.2 Bus Voltage Register (address = 02h)

The Bus Voltage register stores the most recent bus voltage reading, V_{BUS} . At full-scale range = 32 V (decimal = 8000, hex = 1F40), and LSB = 4 mV.

Figure 24. Bus Voltage Register

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
BD12	BD11	BD10	BD9	BD8	BD7	BD6	BD5	BD4	BD3	BD2	BD1	BD0	—	CNVR	OVF

At full-scale range = 16 V (decimal = 4000, hex = 0FA0), and LSB = 4 mV.

CNVR: Conversion Ready

Bit 1 Although the data from the last conversion can be read at any time, the INA219 Conversion Ready bit (CNVR) indicates when data from a conversion is available in the data output registers. The CNVR bit is set after all conversions, averaging, and multiplications are complete. CNVR will clear under the following conditions:

- 1.) Writing a new mode into the Operating Mode bits in the Configuration Register (except for Power-Down or Disable)
- 2.) Reading the Power Register

OVF: Math Overflow Flag

Bit 0 The Math Overflow Flag (OVF) is set when the Power or Current calculations are out of range. It indicates that current and power data may be meaningless.

8.6.3.3 Power Register (address = 03h) [reset = 00h]

Full-scale range and LSB are set by the Calibration register. See the [Programming the Calibration Register](#).

Figure 25. Power Register

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
PD15	PD14	PD13	PD12	PD11	PD10	PD9	PD8	PD7	PD6	PD5	PD4	PD3	PD2	PD1	PD0
R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0

LEGEND: R/W = Read/Write; R = Read only; -n = value after reset

The Power register records power in watts by multiplying the values of the current with the value of the bus voltage according to the equation [Equation 5](#):

8.6.3.4 Current Register (address = 04h) [reset = 00h]

Full-scale range and LSB depend on the value entered in the Calibration register. See [Programming the Calibration Register](#) for more information. Negative values are stored in 2's complement format.

Figure 26. Current Register

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
CSIGN	CD14	CD13	CD12	CD11	CD10	CD9	CD8	CD7	CD6	CD5	CD4	CD3	CD2	CD1	CD0
R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0	R-0

LEGEND: R/W = Read/Write; R = Read only; -n = value after reset

The value of the Current register is calculated by multiplying the value in the Shunt Voltage register with the value in the Calibration register according to the [Equation 4](#):

8.6.4 Calibration Register

8.6.4.1 Calibration Register (address = 05h) [reset = 00h]

Current and power calibration are set by bits FS15 to FS1 of the Calibration register. Note that bit FS0 is not used in the calculation. This register sets the current that corresponds to a full-scale drop across the shunt. Full-scale range and the LSB of the current and power measurement depend on the value entered in this register. See the [Programming the Calibration Register](#). This register is suitable for use in overall system calibration. Note that the 0 POR values are all default.

Figure 27. Calibration Register⁽¹⁾

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
FS15	FS14	FS13	FS12	FS11	FS10	FS9	FS8	FS7	FS6	FS5	FS4	FS3	FS2	FS1	FS0
R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R-0

LEGEND: R/W = Read/Write; R = Read only; -n = value after reset

(1) FS0 is a *void* bit and will always be 0. It is not possible to write a 1 to FS0. CALIBRATION is the value stored in FS15:FS1.

9 Application and Implementation

NOTE

Information in the following applications sections is not part of the TI component specification, and TI does not warrant its accuracy or completeness. TI's customers are responsible for determining suitability of components for their purposes. Customers should validate and test their design implementation to confirm system functionality.

9.1 Application Information

The INA219 is a current shunt and power monitor with an I²C- and SMBus-compatible interface. The device monitors both a shunt voltage drop and bus supply voltage. Programmable calibration value, combined with an internal multiplier, enable readouts of current and power.

9.2 Typical Application

Figure 28 shows a typical application circuit for the INA219. Use a 0.1- μ F ceramic capacitor for power-supply bypassing, placed as closely as possible to the supply and ground pins.

The input filter circuit consisting of R_{F1} , R_{F2} , and C_F is not necessary in most applications. If the need for filtering is unknown, reserve board space for the components and install 0- Ω resistors for R_{F1} and R_{F2} and leave C_F unpopulated, unless a filter is needed (see [Filtering and Input Considerations](#)).

The pull-up resistors shown on the SDA and SCL lines are not needed if there are pullup resistors on these same lines elsewhere in the system. Resistor values shown are typical: consult either the I²C or SMBus specification to determine the acceptable minimum or maximum values and also refer to the [Specifications](#) for Output Current Limitations.

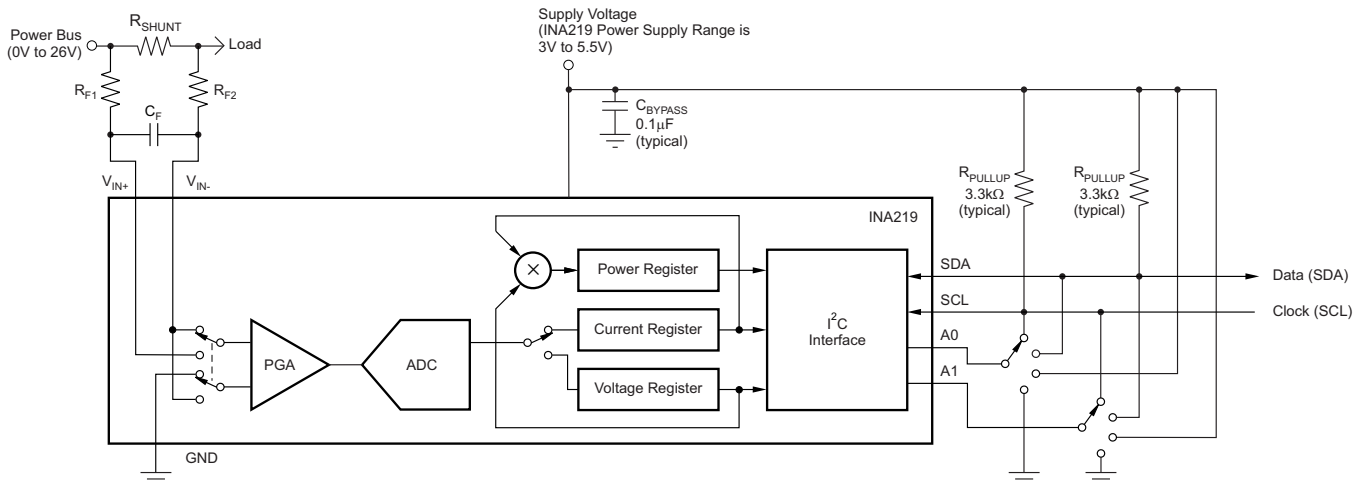


Figure 28. Typical Application Circuit

9.2.1 Design Requirements

The INA219 measures the voltage across a current-sensing resistor (R_{SHUNT}) when current passes through the resistor. The device also measures the bus supply voltage, and calculates power when calibrated. This section goes through the steps to program the device for power measurements, and shows the register results [Table 8](#).

The Conditions for the example circuit is: Maximum expected load current = 15 A, Nominal load current = 10 A, $V_{CM} = 12$ V, $R_{SHUNT} = 2$ m Ω , V_{SHUNT} FSR = 40 mV (PGA = /1), and BRNG = 0 (VBUS range = 16 V).

9.2.2 Detailed Design Procedure

Figure 29 shows a nominal 10-A load that creates a differential voltage of 20 mV across a 2-m Ω shunt resistor. The common mode is at 12 volts and the voltage present at the IN- pin is equal to the common-mode voltage minus the differential drop across the resistor.

Typical Application (continued)

For this example, the minimum-current LSB is calculated to be 457.78 $\mu\text{A/bit}$, assuming a maximum expected current of 15 A using Equation 2. This value is rounded up to 1 mA/bit and is chosen for the current LSB. Setting the current LSB to this value allows for sufficient precision while serving to simplify the math as well. Using Equation 1 results in a calibration value of 20480 (5000h). This value is then programmed into the Calibration register.

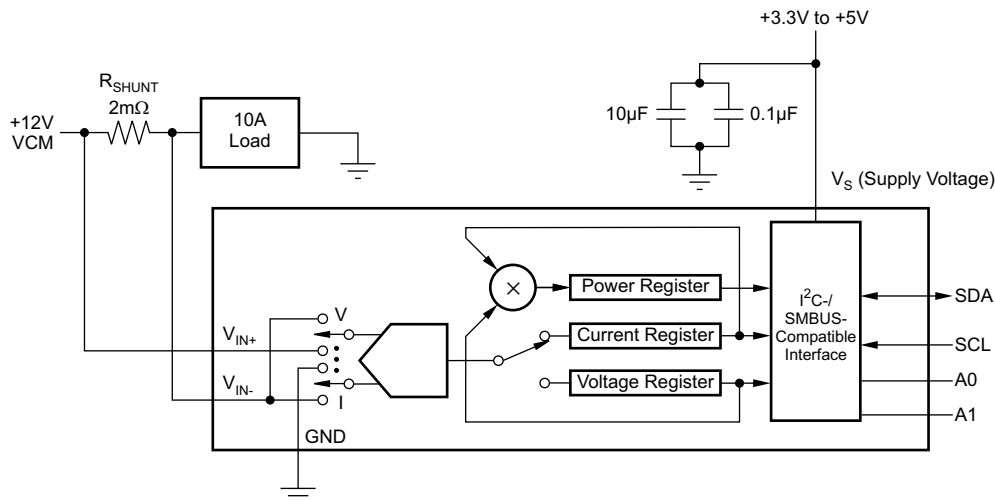


Figure 29. Example Circuit Configuration

The bus voltage is internally measured at the IN– pin to calculate the voltage level delivered to the load. The Bus Voltage register bits are not right-aligned; therefore, they must be shifted right by three bits. Multiply the shifted contents by the 4-mV LSB to compute the bus voltage measured by the device in volts. The shifted value of the Bus Voltage register contents is equal to BB3h, the decimal equivalent of 2995. This value of 2995 is multiplied by the 4-mV LSB, and results in a value of 11.98 V. As shown, the voltage at the IN– pin is 11.98 V. For a 40-mV, full-scale range, this small difference is not a significant deviation from the 12-V common-mode voltage. However, at larger full-scale ranges, this deviation can be much larger.

The Current register content is internally calculated using Equation 4, and the result of 10000 (2710h) is automatically loaded into the register. Current in amperes is equal to 1 mA/bit times 10000, and results in a 10-A load current.

The Power register content is internally calculated using Equation 5 and the result of 5990 (1766h) is automatically loaded into the register. Multiplying this result by the Power register LSB 20×10^{-3} (20 times 1×10^{-3} current LSB using Equation 3), results in a power calculation of $5990 \times 20 \text{ mW/bit}$, and equals 119.8 W. This result matches what is expected for this register. A calculation for the power delivered to the load uses 11.98 V (12 VCM – 20-mV shunt drop) multiplied by the load current of 10 A to give a 119.8-W result.

9.2.2.1 Register Results for the Example Circuit

Table 8 shows the register readings for the Calibration example.

Table 8. Register Results⁽¹⁾

REGISTER NAME	ADDRESS	CONTENTS	ADJ	DEC	LSB	VALUE
Configuration	00h	019Fh				
Shunt	01h	07D0h		2000	10 μV	20 mV
Bus	02h	5D98h	0BB3	2995	4 mV	11.98 V
Calibration	05h	5000h		20480		
Current	04h	2710h		10000	1 mA	10.0 A
Power	03h	1766h		5990	20 mW	119.8 W

(1) Conditions: load = 10 A, $V_{\text{CM}} = 12 \text{ V}$, $R_{\text{SHUNT}} = 2 \text{ m}\Omega$, $V_{\text{SHUNT FSR}} = 40 \text{ mV}$, and $V_{\text{BUS}} = V_{\text{IN-}}$, BRNG = 0 (VBUS range = 16 V).

10 Power Supply Recommendations

The input circuitry of the device can accurately measure signals on common-mode voltages beyond its power supply voltage, V_S . For example, the voltage applied to the V_S power supply terminal can be 5 V, whereas the load power-supply voltage being monitored (the common-mode voltage) can be as high as 26 V. Note also that the device can withstand the full 0-V to 26-V range at the input terminals, regardless of whether the device has power applied or not.

Place the required power-supply bypass capacitors as close as possible to the supply and ground terminals of the device to ensure stability. A typical value for this supply bypass capacitor is 0.1 μF . Applications with noisy or high-impedance power supplies may require additional decoupling capacitors to reject power-supply noise.

11 Layout

11.1 Layout Guidelines

Connect the input pins (IN+ and IN–) to the sensing resistor using a Kelvin connection or a 4-wire connection. These connection techniques ensure that only the current-sensing resistor impedance is detected between the input pins. Poor routing of the current-sensing resistor commonly results in additional resistance present between the input pins. Given the very low ohmic value of the current-sensing resistor, any additional high-current carrying impedance causes significant measurement errors. Place the power-supply bypass capacitor as close as possible to the supply and ground pins.

11.2 Layout Example

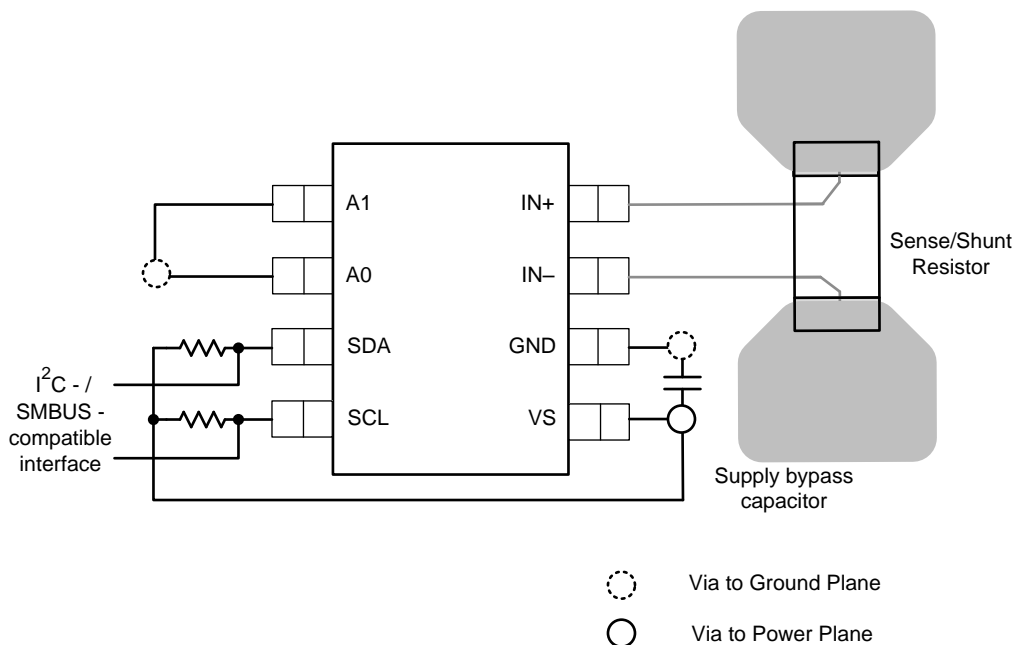


Figure 30. Recommended Layout

12 Device and Documentation Support

12.1 Community Resources

The following links connect to TI community resources. Linked contents are provided "AS IS" by the respective contributors. They do not constitute TI specifications and do not necessarily reflect TI's views; see TI's [Terms of Use](#).

TI E2E™ Online Community *TI's Engineer-to-Engineer (E2E) Community*. Created to foster collaboration among engineers. At e2e.ti.com, you can ask questions, share knowledge, explore ideas and help solve problems with fellow engineers.

Design Support *TI's Design Support* Quickly find helpful E2E forums along with design support tools and contact information for technical support.

12.2 Trademarks

E2E is a trademark of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

12.3 Electrostatic Discharge Caution



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

12.4 Glossary

[SLYZ022](#) — *TI Glossary*.

This glossary lists and explains terms, acronyms, and definitions.

13 Mechanical, Packaging, and Orderable Information

The following pages include mechanical, packaging, and orderable information. This information is the most current data available for the designated devices. This data is subject to change without notice and revision of this document. For browser-based versions of this data sheet, refer to the left-hand navigation.

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead finish/ Ball material (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
INA219AID	ACTIVE	SOIC	D	8	75	RoHS & Green	NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 125	I219A	Samples
INA219AIDCNR	ACTIVE	SOT-23	DCN	8	3000	RoHS & Green	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	A219	Samples
INA219AIDCNT	ACTIVE	SOT-23	DCN	8	250	RoHS & Green	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	A219	Samples
INA219AIDR	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	RoHS & Green	NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 125	I219A	Samples
INA219BIDCNR	ACTIVE	SOT-23	DCN	8	3000	RoHS & Green	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	B219	Samples
INA219BIDCNT	ACTIVE	SOT-23	DCN	8	250	RoHS & Green	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	B219	Samples
INA219BIDR	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	RoHS & Green	NIPDAU	Level-1-260C-UNLIM	-40 to 125	I219B	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

RoHS Exempt: TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

Green: TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet JS709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

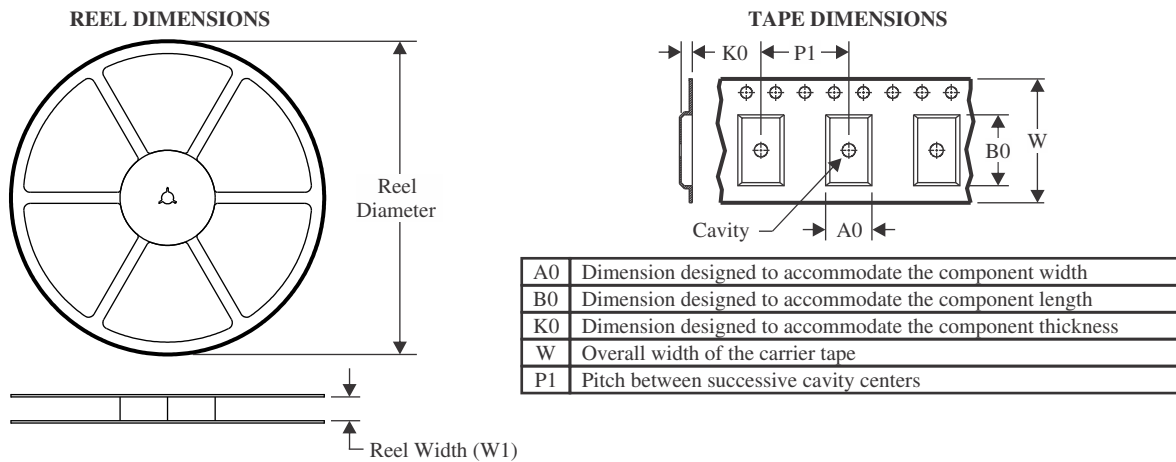
(5) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

⁽⁶⁾ Lead finish/Ball material - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

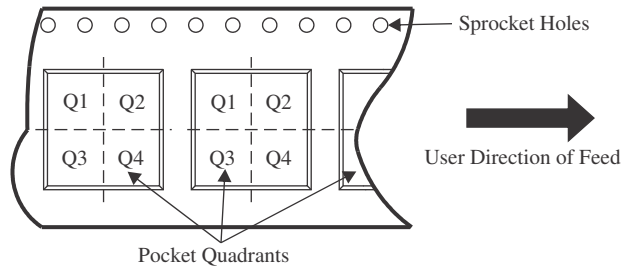
Important Information and Disclaimer:The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION

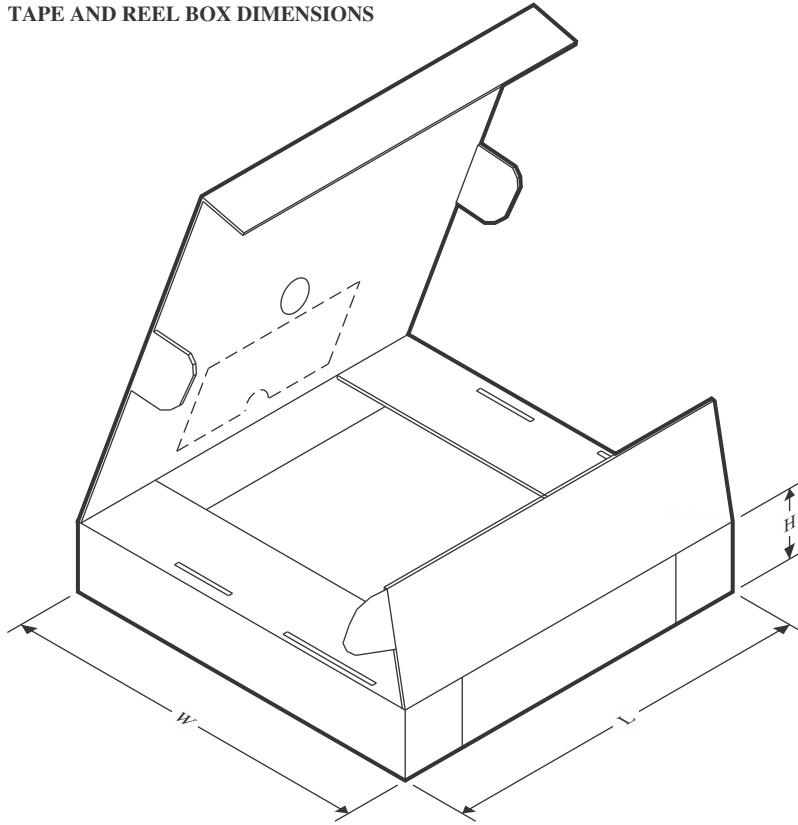


QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



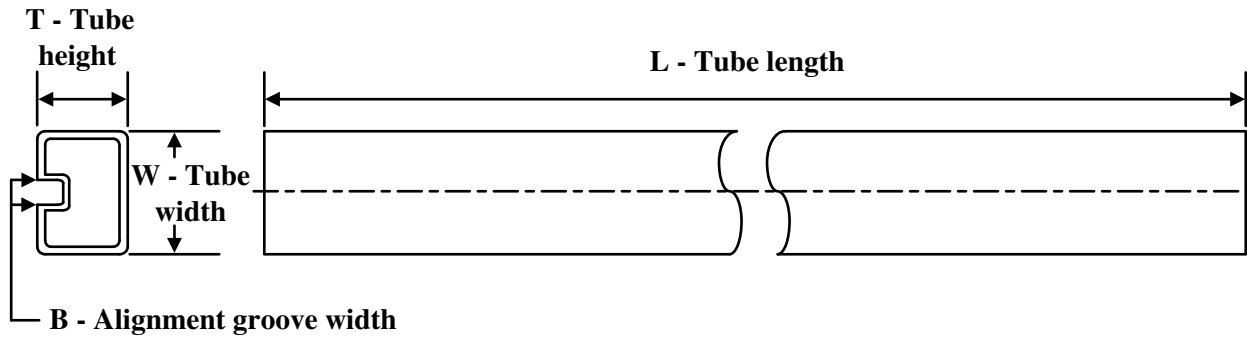
*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
INA219AIDCNR	SOT-23	DCN	8	3000	179.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219AIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	179.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219AIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219AIDR	SOIC	D	8	2500	330.0	12.5	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1
INA219BIDCNR	SOT-23	DCN	8	3000	179.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219BIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	179.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219BIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
INA219BIDR	SOIC	D	8	2500	330.0	12.5	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS


*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
INA219AIDCNR	SOT-23	DCN	8	3000	213.0	191.0	35.0
INA219AIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	213.0	191.0	35.0
INA219AIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	210.0	185.0	35.0
INA219AIDR	SOIC	D	8	2500	340.5	338.1	20.6
INA219BIDCNR	SOT-23	DCN	8	3000	213.0	191.0	35.0
INA219BIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	213.0	191.0	35.0
INA219BIDCNT	SOT-23	DCN	8	250	210.0	185.0	35.0
INA219BIDR	SOIC	D	8	2500	340.5	336.1	25.0

TUBE


*All dimensions are nominal

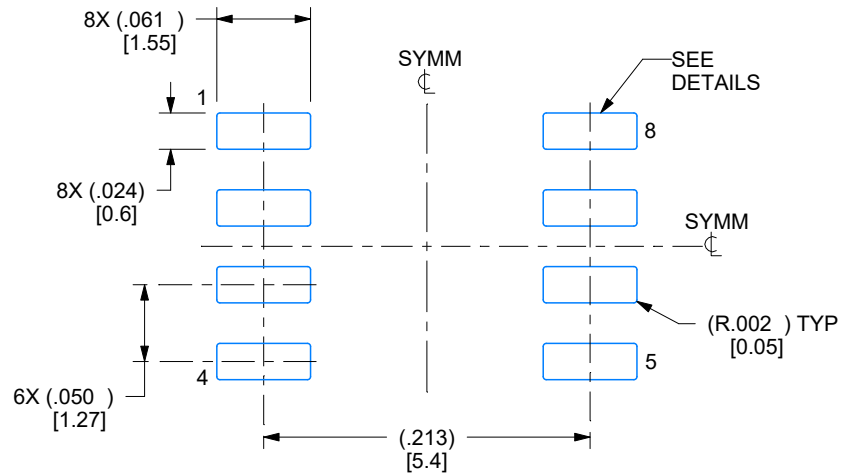
Device	Package Name	Package Type	Pins	SPQ	L (mm)	W (mm)	T (μm)	B (mm)
INA219AID	D	SOIC	8	75	507	8	3940	4.32

EXAMPLE BOARD LAYOUT

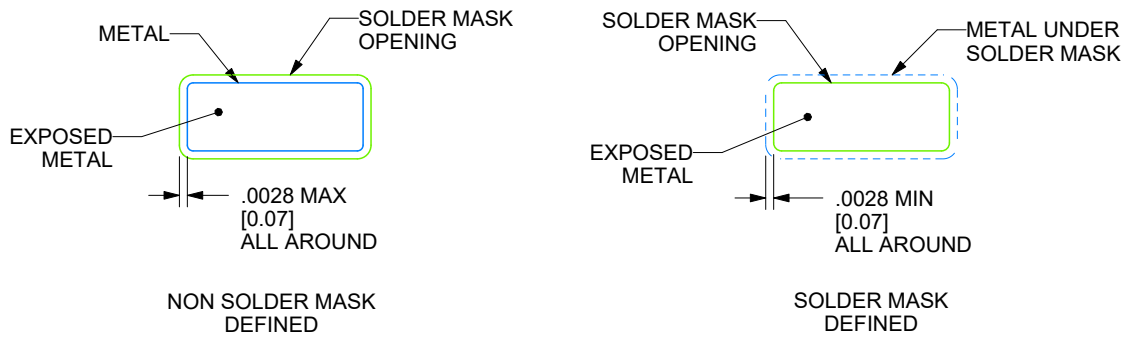
D0008A

SOIC - 1.75 mm max height

SMALL OUTLINE INTEGRATED CIRCUIT



LAND PATTERN EXAMPLE
EXPOSED METAL SHOWN
SCALE:8X



SOLDER MASK DETAILS

4214825/C 02/2019

NOTES: (continued)

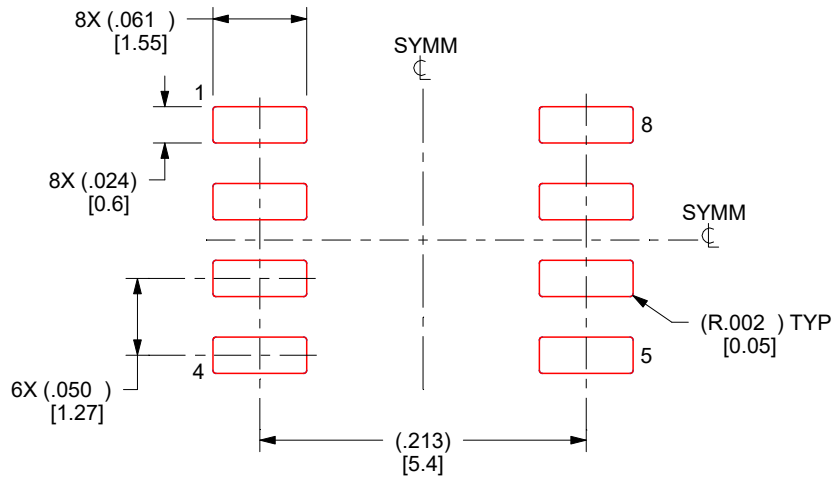
- 6. Publication IPC-7351 may have alternate designs.
- 7. Solder mask tolerances between and around signal pads can vary based on board fabrication site.

EXAMPLE STENCIL DESIGN

D0008A

SOIC - 1.75 mm max height

SMALL OUTLINE INTEGRATED CIRCUIT



SOLDER PASTE EXAMPLE
BASED ON .005 INCH [0.125 MM] THICK STENCIL
SCALE:8X

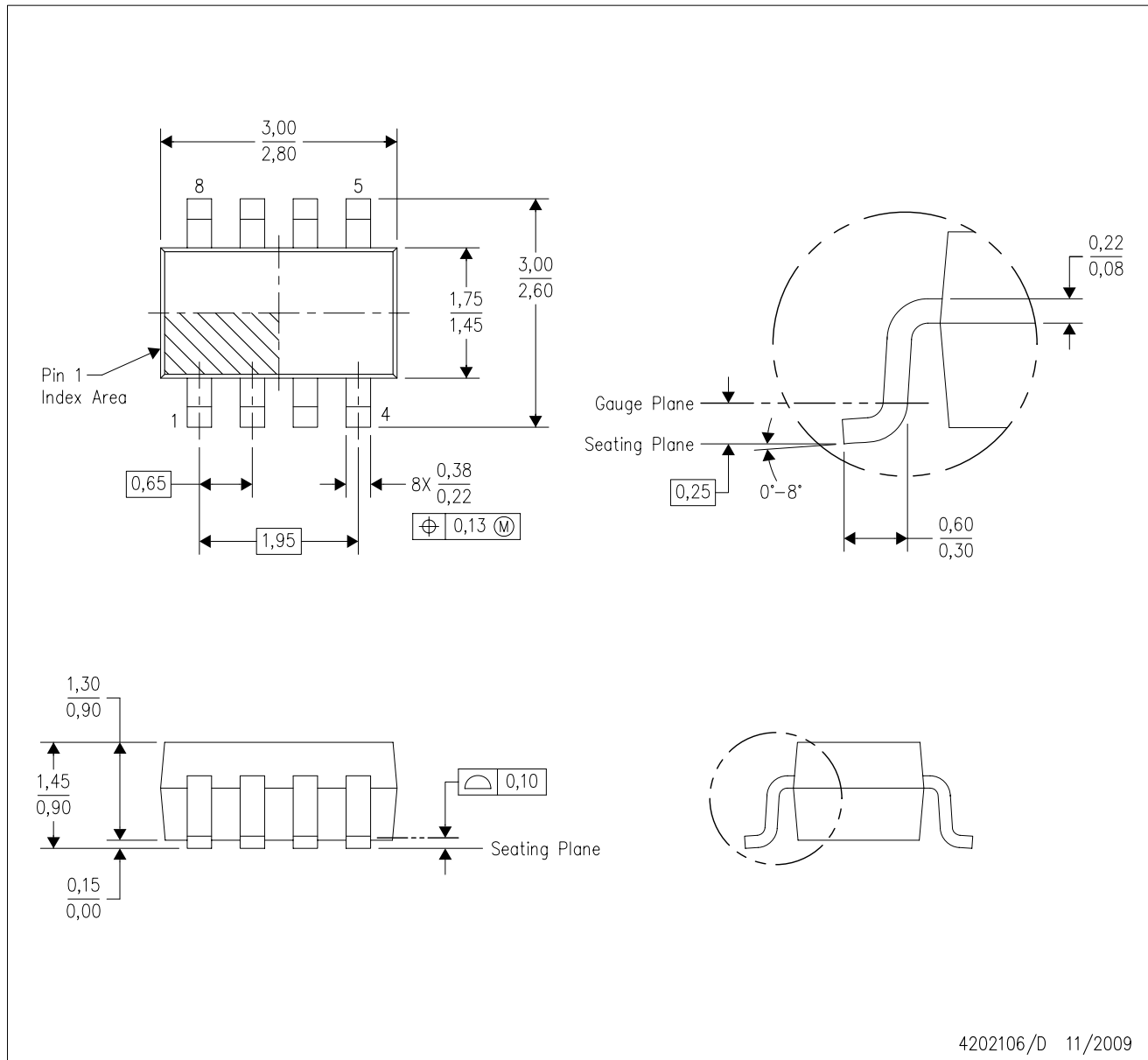
4214825/C 02/2019

NOTES: (continued)

8. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.
9. Board assembly site may have different recommendations for stencil design.

DCN (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE (DIE DOWN)

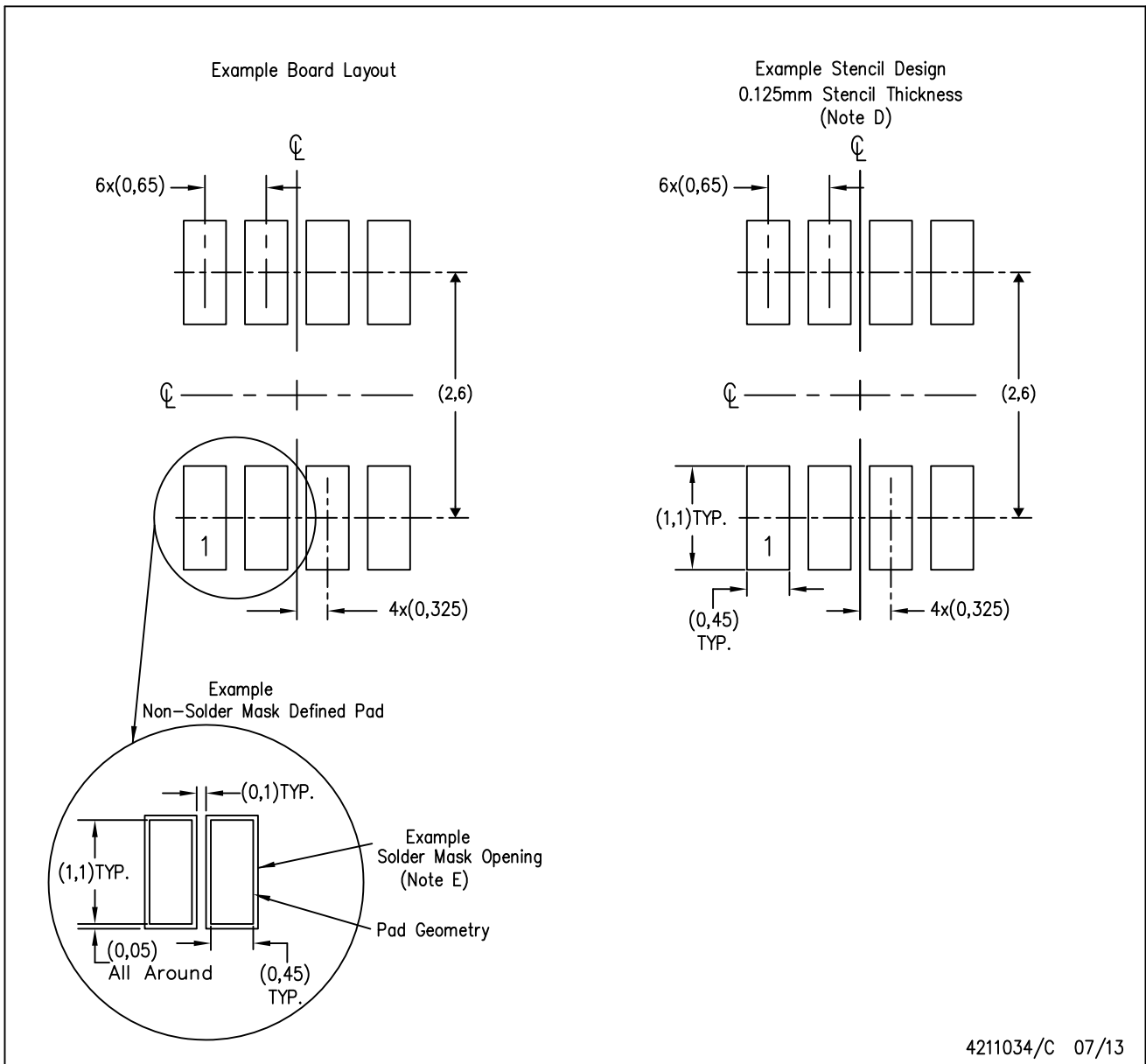


4202106/D 11/2009

- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Package outline exclusive of metal burr & dambar protrusion/intrusion.
 - D. Package outline inclusive of solder plating.
 - E. A visual index feature must be located within the Pin 1 index area.
 - F. Falls within JEDEC MO-178 Variation BA.
 - G. Body dimensions do not include flash or protrusion. Mold flash and protrusion shall not exceed 0.25 per side.

DCN (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE (DIE DOWN)



- NOTES:
- A. All linear dimensions are in millimeters.
 - B. This drawing is subject to change without notice.
 - C. Publication IPC-7351 is recommended for alternate designs.
 - D. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and also rounding corners will offer better paste release. Customers should contact their board assembly site for stencil design recommendations. Refer to IPC-7525.
 - E. Customers should contact their board fabrication site for solder mask tolerances between and around signal pads.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated

TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8

DESCRIPTION

The TP4056 is a complete constant-current/constant-voltage linear charger for single cell lithium-ion batteries. Its SOP package and low external component count make the TP4056 ideally suited for portable applications. Furthermore, the TP4056 can work within USB and wall adapter.

No blocking diode is required due to the internal PMOSFET architecture and have prevent to negative Charge Current Circuit. Thermal feedback regulates the charge current to limit the die temperature during high power operation or high ambient temperature. The charge voltage is fixed at 4.2V, and the charge current can be programmed externally with a single resistor. The TP4056 automatically terminates the charge cycle when the charge current drops to 1/10th the programmed value after the final float voltage is reached.

TP4056 Other features include current monitor, under voltage lockout, automatic recharge and two status pin to indicate charge termination and the presence of an input voltage.

FEATURES

- Programmable Charge Current Up to 1000mA
- No MOSFET, Sense Resistor or Blocking Diode Required
- Complete Linear Charger in SOP-8 Package for Single Cell Lithium-Ion Batteries
- Constant-Current/Constant-Voltage
- Charges Single Cell Li-Ion Batteries Directly from USB Port
- Preset 4.2V Charge Voltage with 1.5% Accuracy
- Automatic Recharge
- two Charge Status Output Pins
- C/10 Charge Termination
- 2.9V Trickle Charge Threshold (TP4056)
- Soft-Start Limits Inrush Current
- Available Radiator in 8-Lead SOP Package, the Radiator need connect GND or impending

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

- Input Supply Voltage(V_{CC}): $-0.3V \sim 8V$
- TEMP: $-0.3V \sim 10V$
- CE: $-0.3V \sim 10V$
- BAT Short-Circuit Duration: Continuous
- BAT Pin Current: 1200mA
- PROG Pin Current: 1200uA
- Maximum Junction Temperature: $145^{\circ}C$
- Operating Ambient Temperature Range: $-40^{\circ}C \sim 85^{\circ}C$
- Lead Temp.(Soldering, 10sec): $260^{\circ}C$

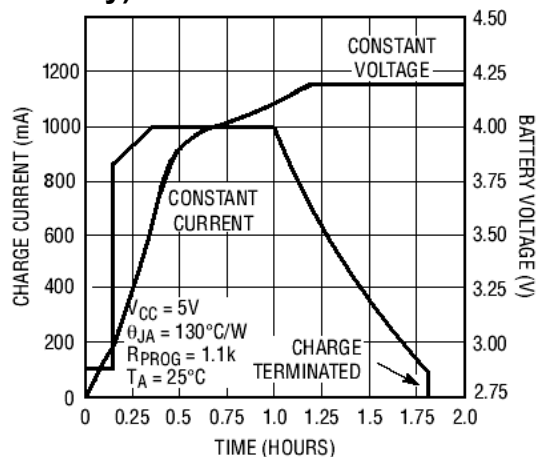
APPLICATIONS

- Cellular Telephones, PDAs, GPS
- Charging Docks and Cradles
- Digital Still Cameras, Portable Devices
- USB Bus-Powered Chargers,Chargers

PACKAGE/ORDER INFORMATION

SOP-8	
	ORDER PART NUMBER TP4056-42-SOP8-PP
	PART MARKING TP4056

Complete Charge Cycle (1000mAh Battery)



TEMP(Pin 1) :Temperature Sense Input Connecting TEMP pin to NTC thermistor's output in Lithium ion battery pack. If TEMP pin's voltage is below 45% or above 80% of supply voltage V_{IN} for more than 0.15S, this means that battery's temperature is too high or too low, charging is suspended. The temperature sense function can be disabled by grounding the TEMP pin.

PROG(Pin 2): Constant Charge Current Setting and Charge Current Monitor Pin charge current is set by connecting a resistor R_{ISET} from this pin to GND. When in precharge mode, the ISET pin's voltage is regulated to 0.2V. When in constant charge current mode, the ISET pin's voltage is regulated to 2V. In all modes during charging, the voltage on ISET pin can be used to measure the charge current as follows:

GND(Pin3): Ground Terminal

$$I_{BAT} = \frac{V_{PROG}}{R_{PROG}} \times 1200 \quad (V_{PROG}=1V)$$

Vcc(Pin 4): Positive Input Supply Voltage V_{IN} is the power supply to the internal circuit. When V_{IN} drops to within 30mv of the BAT pin voltage, TP4056 enters low power sleep mode, dropping BAT pin's current to less than 2uA.

BAT(Pin5): Battery Connection Pin. Connect the positive terminal of the battery to BAT pin. BAT pin draws less than 2uA current in chip disable mode or in sleep mode. BAT pin provides charge current to the battery and provides regulation voltage of 4.2V.

STDBY(Pin6): Open Drain Charge Status Output When the battery Charge Termination, the \overline{STDBY} pin is pulled low by an internal switch, otherwise \overline{STDBY} pin is in high impedance state.

CHRG (Pin7): Open Drain Charge Status Output When the battery is being charged, the \overline{CHRG} pin is pulled low by an internal switch, otherwise \overline{CHRG} pin is in high impedance state.

CE(Pin8): Chip Enable Input. A high input will put the device in the normal operating mode.

Pulling the CE pin to low level will put the YP4056 into disable mode. The CE pin can be driven by TTL or CMOS logic level.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes specifications which apply over the full operating temperature range, otherwise specifications are at $T_A=25^\circ\text{C}$, $V_{CC}=5V$, unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
V_{CC}	Input Supply Voltage		● 4.0	5	8.0	V	
I_{CC}	Input Supply Current	Charge Mode, $R_{PROG} = 1.2k$	●	150	500	μA	
		StandbyMode(Charge Terminated)	●	55	100	μA	
		Shutdown Mode (R_{PROG} Not Connected, $V_{CC} < V_{BAT}$, or $V_{CC} < V_{UV}$)	●	55	100	μA	
V_{FLOAL}	Regulated Output (Float) Voltage	$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$, $I_{BAT}=40\text{mA}$	4.137	4.2	4.263	V	
I_{BAT}	BAT Pin Current Text condition: $V_{BAT}=4.0V$	$R_{PROG} = 2.4k$, Current Mode	●	450	500	550	mA
		$R_{PROG} = 1.2k$, Current Mode	●	950	1000	1050	mA
		Standby Mode, $V_{BAT} = 4.2V$	●	0	-2.5	-6	μA
I_{TRIKL}	Trickle Charge Current	$V_{BAT} < V_{TRIKL}$, $R_{PROG}=1.2K$	●	120	130	140	mA
V_{TRIKL}	Trickle Charge Threshold Voltage	$R_{PROG}=1.2K$, V_{BAT} Rising		2.8	2.9	3.0	V
V_{TRHYS}	Trickle Charge Hysteresis Voltage	$R_{PROG}=1.2K$		60	80	100	mV
T_{LIM}	Junction Temperature in Constant Temperature Mode			145		$^\circ\text{C}$	

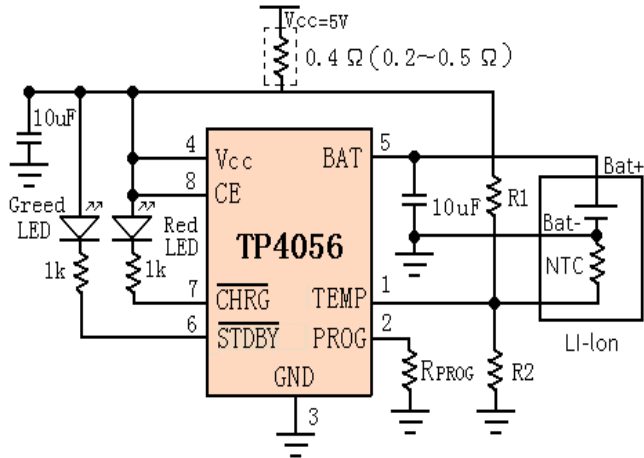
indicator light state

Charge state	Red LED $\overline{\text{CHRG}}$	Green LED $\overline{\text{STDBY}}$
charging	bright	extinguish
Charge Termination	extinguish	bright
Vin too low; Temperature of battery too low or too high; no battery	extinguish	extinguish
BAT PIN Connect 10u Capacitance; No battery	Green LED bright, Red LED Coruscate T=1-4 S	

Rprog Current Setting

R _{PROG} (k)	I _{BAT} (mA)
10	130
5	250
4	300
3	400
2	580
1.66	690
1.5	780
1.33	900
1.2	1000

TYPICAL APPLICATIONS



Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

SPECIFICATION OF PRODUCT

for Lithium-ion rechargeable cell

Model name : INR18650-35E

July, 9th, 2015

Samsung SDI Co., Ltd.

Cell Business Division



Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

Revision history

Revision No.	Date(^yr-m-d)	Page	Item	Description	Changes / Author
Ver. 1.0	'15-03-10	19		Ver. 1.0	Yunwoong Kim
Ver. 1.1	'15-07-09	19		Cycle life condition change	Yunwoong Kim

Tentative

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

1. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to the customer by Samsung SDI Co., Ltd.

2. Description and Model

2.1 Description	Cell (lithium-ion rechargeable cell)
2.2 Model	INR18650-35E
2.3 Site	Manufactured in Korea

3. Nominal Specifications

Item	Specification
3.1 Standard discharge Capacity	Min 3,350mAh - Charge : 0.5C(1,700mA), 4.2V, 0.02C(68mA) cut-off @RT - Discharge : 0.2C(680mA), 2.65V cut-off @RT *1C=3,400mA
3.2 Charging Voltage	4.2V
3.3 Nominal Voltage	3.60V
3.4 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.5 Charging Current	Standard charge: 1,700mA For cycle life : 1,020mA
3.6 Charging Time	Standard charge: 4hours
3.7 Max. Charge Current	2,000mA (not for cycle life)
3.8 Max. Discharge Current	8,000mA (for continuous discharge) 13,000mA (not for continuous discharge)
3.9 Discharge Cut-off Voltage	2.65V
3.10 Cell Weight	50 g max
3.11 Cell Dimension	Height : Max. 65.25 mm Diameter: Max. Φ 18.55 mm
3.12 Operating Temperature (Cell Surface Temperature)	Charge : 0 to 45°C Discharge : -10 to 60°C
3.13 Storage Temperature	1 year : -20~25°C (1*) 3 months : -20~45°C (1*) 1 month : -20~60°C (1*)

Note (1): If the cell is kept as ex-factory status (30% of charge),
The capacity recovery rate is more than 80%.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

4. Outline Dimensions

See the Fig. 1

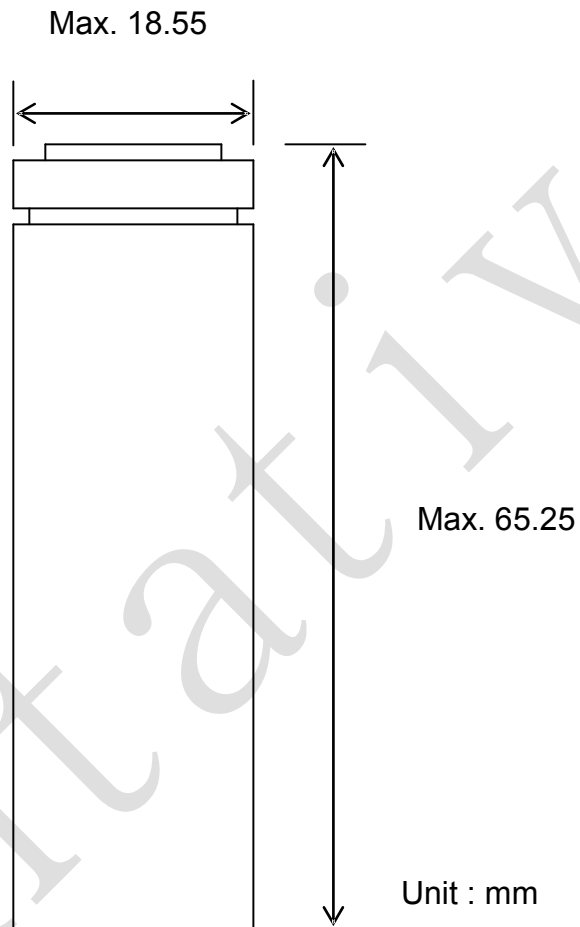


Fig. 1 Outline Dimensions of INR18650-35E

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

5. Appearance

There shall be no such defects as scratch, rust, discoloration, leakage which may adversely affect commercial value of the cell.

6. Standard Test Conditions

6.1 Environmental Conditions

Unless otherwise specified, all tests stated in this specification are conducted at temperature $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ and humidity 65%.

6.2 Measuring Equipment

(1) Amp-meter and Volt-meter

The amp-meter and volt-meter should have an accuracy of the grade 0.5mA and mV or higher.

(2) Slide caliper

The slide caliper should have 0.01 mm scale.

(3) Impedance meter

The impedance meter with AC 1kHz should be used.

7. Characteristics

7.1 Standard Charge

This "Standard Charge" means charging the cell with charge current of 1,700mA and constant voltage 4.2V at 23°C , 0.02C(68mA) cut-off.

7.2 Standard Discharge Capacity

The standard discharge capacity is the initial discharge capacity of the cell, which is measured with discharge current of 0.2C(680mA) with 2.65V cut-off at 23°C within 1 hour after the Standard charge.

$$\text{Standard Discharge Capacity} \geq 3,350\text{mAh}$$

7.3 Rated Discharge Capacity

The rated discharge capacity is the initial discharge capacity of the cell, which is measured with discharge current of 1C(3,400mA) with 2.65V cut-off at 23°C within 1 hour after the Standard charge.

$$\text{Rated Discharge Capacity} \geq 3,250\text{mAh (97\% of 3,350mAh)}$$

7.4 Initial internal impedance

Initial internal impedance measured at AC 1kHz after Standard charge.

$$\text{Initial internal impedance} \leq 35\text{m}\Omega$$

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

7.5 Temperature Dependence of Discharge Capacity

Discharge capacity comparison at each temperature, measured with discharge constant current 3,400mA and 2.65V cut-off with follow temperature after the Standard charging at 23°C.

Charge Temperature	Discharge temperature		
	-10°C	23°C	40°C
23°C			
Relative Capacity	40%	97%	97%

Note: If charge temperature and discharge temperature is not the same, the interval for temperature change is 3 hours.

Percentage as an index of the Standard discharge capacity (=3,350mAh) is 100%.

7.6 Temperature Dependence of Charge Capacity

Capacity comparison at each temperature, measured with discharge constant current 680mA and 2.65V cut-off at 23°C after the Standard charge is as follow temperature.

	Charge temperature			Discharge temperature
	0°C	23°C	45°C	
				23°C
Relative Capacity	60%	100%	100%	

Note: If charge temperature and discharge temperature is not the same, the interval for temperature change is 3 hours.

Percentage as an index of the Standard discharge capacity (=3,350mAh) is 100%.

7.7 Charge Rate Capabilities

Discharge capacity is measured with constant current 680mA and 2.65V cut-off after the cell is charged with 4.2V at 23°C as follows.

	Charge Condition	
	0.5C (1,700mA)	1.0C (3,400mA)
Current		
Cut-off	3h or 0.02C	2.5h or 0.02C
Relative Capacity	100%	97%

Note: Percentage as an index of the Standard discharge capacity (=3,350mAh) is 100%.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

7.8 Discharge Rate Capabilities

Discharge capacity is measured with the various currents in under table and 2.65V cut-off after the Standard charge at 23°C.

Current	Discharge Condition			
	0.2C (680mA)	1C (3,400mA)	2C (6,800mA)	8000mA
Relative Capacity	100%	97%	95%	92%

Note: Percentage as an index of the Standard discharge capacity (=3,350mAh) is 100%.

7.9 Cycle Life

Each cycle is an interval between the charge (charge current **1,020mA**) with 100mA cut-off and the discharge (discharge current **3,400mA**) with 2.65V cut-off. Capacity after 500cycles.

Capacity \geq 2,010mAh (60% of Standard Capacity)

7.10 Storage Characteristics

Capacity after storage for 20days at 60°C after the Standard charged at 23°C, measured with discharge current 680mA with 2.65V cut-off at 23°C.

Capacity recovery(after the storage) \geq 3,183mAh (95% of Standard Discharge Capacity)

7.11 Status of the cell as of ex-factory

The cell should be shipped in 3.49V ~ 3.69V Charging voltage range.

8. Mechanical Characteristics

8.1 Drop Test

Test method: Each fully charged cell or battery is dropped three times from a height of 1.0 m onto a concrete floor. The cells or batteries are dropped so as to obtain impacts in random orientations. After the test, the sample shall be put on rest for a minimum of one hour and then a visual inspection shall be performed.

Criteria: No fire, no explosion

(Test shall be performed with the following criteria IEC 62133)

8.2 Vibration Test

Test method: As to the UN transportation regulation(UN38.3), for each axis (X and Y axis with cylindrical cells) 7Hz→200Hz→7Hz for 15min, repetition 12 times totally 3hours, the acceleration 1g during 7 to 18Hz and 8g (amplitude 1.6mm) up to 200Hz.

Criteria: No leakage, with less than 10mV of OCV drop

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

9. Safety

9.1 Overcharge Test

Test method: To charge the standard charged cell with 12V and 3C(10.2A) at 23°C for 7 hours.

Criteria: No fire, and no explosion.

Overcharge test shall be performed with the UL1642 standard

9.2 External Short-circuit Test

Test method: To short-circuit the standard charged cell by connecting positive and negative terminal by less than 8020mΩ wire for 3 hours.

Criteria: No fire, and no explosion.

9.3 Reverse Charge Test

Test method: To charge reversely the standard discharged cell with charge current 3,400mA for 1.5 hours.

Criteria: No fire, and no explosion.

9.4 Heating Test

Test method: To heat the standard charged cell at heating rate of 5°C per minute up to 130°C and keep the cell in oven for 10 minutes.

Criteria: No fire, and no explosion.

10. Warranty

Samsung SDI will be responsible for replacing the cell against defects or poor workmanship for 15month from the date of shipping. Any other problems caused by malfunction of the equipment or unsuitable use of the cell are not under this warranty.

The warranty set forth in proper use, handling conditions described above, and excludes in the case of a defect which is not related to manufacturing of the cell.

11. Others

11.1 Storage for a long time

If the cell is kept for a long time (3months or more), It is strongly recommended that the cell is preserved at dry and low-temperature.

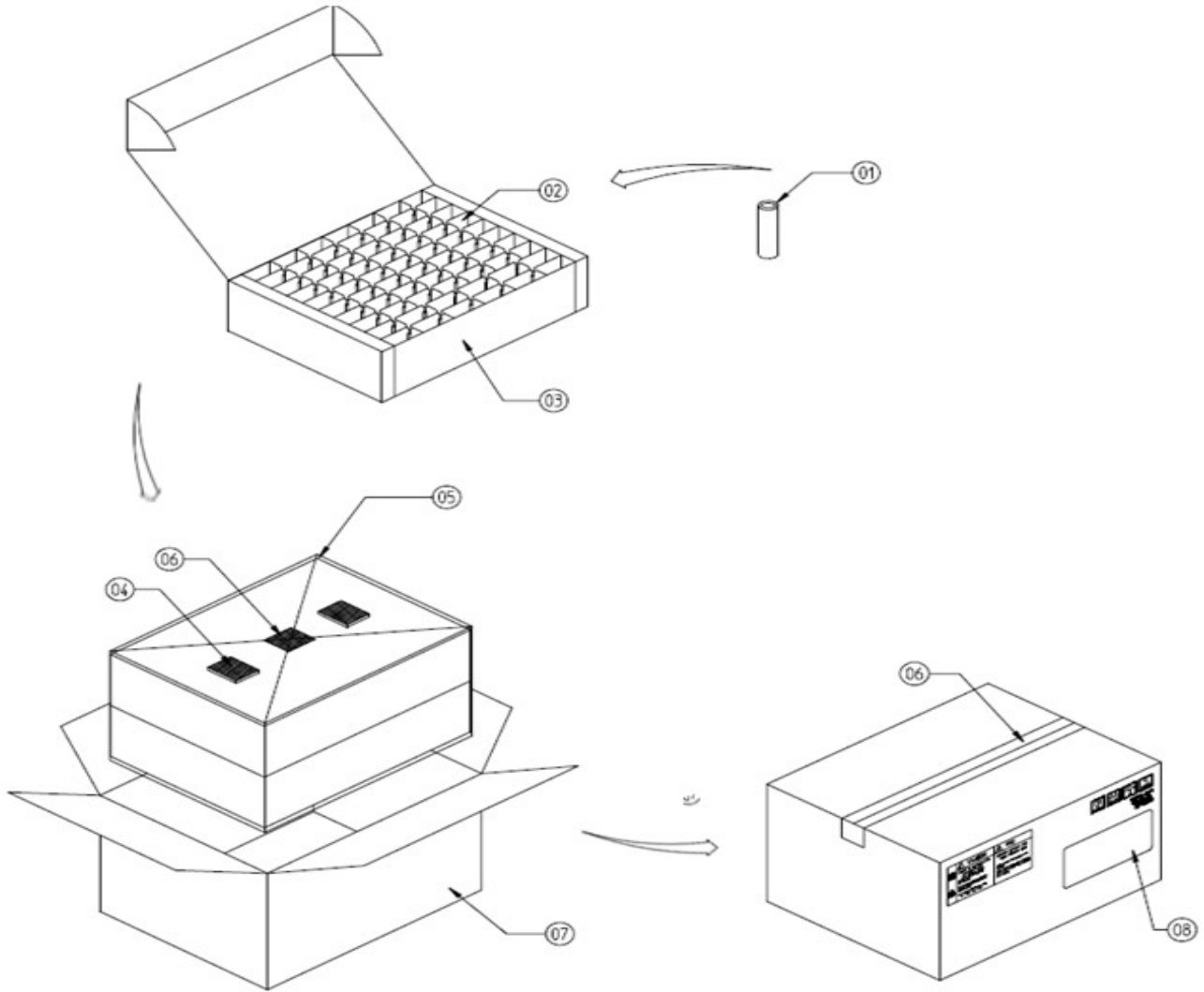
11.2 Other

Any matters that specifications does not have, should be conferred with between the both parties.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

12. Packaging

See Fig.2, Package Drawing



NO	PART NAME	MATERIAL	MATERIAL DIM	Q'TY	TREATMENT
01	INR18650(Ref. Model List)	BARE CELL	#18, H65	200	NONE
02	PACKING GUIDE	MANILA	L192×W191×H67	200	NONE
03	PACKING CASE IN	SW-1(B FLUTE)	L192×W192×H68	2	NONE
04	SILICAGEL	SI	L50×W50.3G	2	NONE
05	PE BAG(LARGE)	PE	L500×W450×T0.028	1	NONE
06	TAPE	PE(OPP)	W50×T0.05	1	NONE
07	PACKING CASE OUT	DW-1(BA FLUTE)	L225×W214×H164	1	NONE
08	LABEL	ART PAPER	L52×W100	1	NONE

Fig 2. Package Drawing

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

Proper Use and Handling of Lithium Ion Cells

See before using lithium-ion cell

Supplied by

Samsung SDI Co., Ltd.

1. General

This document has been prepared to describe the appropriate cautions and prohibitions, which the customer should take or employ when the customer uses and handles the lithium ion cell to be manufactured and supplied by Samsung SDI Co., Ltd., in order to obtain optimum performance and safety.

2. Charging

2.1. Charging current

Charging current should be less than maximum charge current specified in the product specification.

2.2. Charging voltage

Charging should be done by voltage less than that specified in the product specification.

2.3. Charging time

Continuous charging under appropriate voltage does not cause any loss of characteristics. However, the charge timer is recommended to be installed from a safety consideration, which shuts off further charging at time specified in the product specification.

2.4. Charging temperature

The cell should be charged within a range of specified temperatures in the product specification.

2.5. Reverse charging

The cell should be connected, confirming that its poles are correctly aligned. Inverse charging should be strictly prohibited. If the cell is connected improperly, it may be damaged.

3. Discharging

3.1. Discharging

3.1.1. The cell should be discharged at less than maximum discharge current specified in the product specification.

3.2. Discharging temperature

3.2.1. The cell should be discharged within a range of temperatures specified in the product specification.

3.2.2. Otherwise, it may cause loss of characteristics.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

3.3. Over-discharging

- 3.3.1. The system should be equipped with a device to prevent further discharging exceeding discharging cut-off voltage specified in the product specification.(over-discharging)
- 3.3.2. Over-discharging may cause loss of performance, characteristics, of battery function.
- 3.3.3. Over-discharging may occur by self-discharge if the battery is left for a very long time without any use.
- 3.3.4. The charger should be equipped with a device to detect cell voltage and to determine recharging procedures.

4. Storage

4.1. Storage conditions

- 4.1.1. The cell should be stored within a range of temperatures specified in the product specification.
- 4.1.2. Otherwise, it may cause loss of characteristics, leakage and/or rust.

4.2. Long-term storage

- 4.2.1. The cell should be used within a short period after charging because long-term storage may cause loss of capacity by self-discharging.
- 4.2.2. If long-term storage is necessary, the cell should be stored at lower voltage within a range specified in the product specification, because storage at higher voltage may cause loss of characteristics.

5. Cycle life

5.1. Cycle life performance

- 5.1.1. The cell can be charged/discharged repeatedly up to times specified in the produce specification with a certain level of capacity also specified in the product specification.
- 5.1.2. Cycle life may be determined by conditions of charging, discharging, operating temperature and/or storage.

6. Design of System

6.1. Connection between the cell and the battery

- 6.1.1. The cell should not be soldered directly with leads. Namely, the cell should be welded with leads on its terminal and then be soldered with wire or leads to soldered lead.
- 6.1.2. Otherwise, it may cause damage of component, such as separator and insulator, by heat generation.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

6.2 Positioning the battery in the System

6.2.1. The battery should be positioned as possible as far from heat sources and high temperature components.

6.2.2. Otherwise, it may cause loss of characteristics.

6.3. Mechanical shock protection of the battery

6.3.1. The battery should be equipped with appropriate shock absorbers in order to minimize shock.

6.3.2. Otherwise, it may cause shape distortion, leakage, heat generation and/or rupture.

6.4. Short-circuit protection of the cell

6.4.1. The cell is equipped with an insulating sleeve to protect short-circuit which may occur during transportation, battery assembly and /or system operation.

6.4.2. If the cell sleeve is damaged by some causes such as outside impact, it may cause short-circuit with some wiring inside the battery.

6.5. Connection between the battery and charger/system

6.5.1. The battery should be designed to be connected only to the specified charger and system.

6.5.2. A reverse connection of the battery, even in the specified system, should be avoided by employing special battery design such as a special terminals.

7. Battery Pack Assembly

7.1. Prohibition of usage of damaged cell

7.1.1. The cell should be inspected visually before battery assembly.

7.1.2. The cell should not be used if sleeve-damage, can-distortion and/or electrolyte-smell is detected.

7.2. Transportation

7.2.1. If the cell is necessary to transport to order place, such as the battery manufacturer, careful precautions should be taken to avoid damage of cell.

8. Others

8.1. Disassembly

8.1.1. The cell should not be dismantled from the battery pack.

8.1.2. Internal short-circuit caused by disassembly may lead to heat generation and/or venting.

8.1.3. When the electrolyte is coming in contact with the skin or eyes, wash immediately with fresh water and seek medical advice.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

8.2. Short-circuiting

8.2.1. Short-circuit results in very high current which leads to heat generation.

8.2.2. An appropriate circuitry should be employed to protect accidental short-circuiting.

8.3. Incineration

8.3.1 Incinerating and disposing of the cell in fire are strictly prohibited, because it may cause rupture.

8.4. Immersion

8.4.1 Soaking the cell in water is strictly prohibited, because it may cause melt of components to damaged to functions.

8.5. Mixing use

8.5.1. Different types of cell, or same types but different manufacturer's cell may lead to cell rupture or damage to system due to the different characteristics of cell.

8.6. Battery disposal

8.6.1. Although the cell contains no environmentally hazardous component, such as lead or cadmium. the battery should be disposed according to the local regulations when it is disposed.

8.6.2. The cell should be disposed with a discharged state to avoid heat generation by an inadvertent short-circuit.

8.7. Caution - The Battery used in this device may present a risk of fire or chemical burn if mistreated. Do not disassemble, heat above 100°C or incinerate. Replace battery with Samsung SDI battery only. Use of another battery may present a risk of fire or explosion. Dispose of used battery promptly. Keep away from children. Do not disassemble and do not dispose of in fire.

8.8. Warning – Attached

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

▣ Pack Design Guideline (For electrical design)

Item		Portable IT	Power-Tool	Medical	E-Bike	E-Scooter	EV/LEV	ESS/UPS
<input type="checkbox"/>	Standard charging voltage (4.20V cell)	4.20V	4.20V	4.10V	4.10V	4.10V	4.10V	4.00V (4.05V)
<input type="checkbox"/>	Standard charging voltage (4.35V cell)	4.35V	4.35V	4.20V	4.20V	4.20V	4.20V	4.00V (4.05V)
<input type="checkbox"/>	Charging method	CC-CV	CC-CV	CC-CV	CC-CV	CC-CV	CC-CV	CC-CV
<input type="checkbox"/>	Full-charging cut-off current*	0.05C	0.05C	0.025C	0.025C	0.025C	0.025C	0.025C (Continuous)
<input type="checkbox"/>	Voltage of Re-charging (4.20V cell)	4.10V	4.10V	4.05V	4.05V	4.05V	4.05V	4.00V (4.05V)
<input type="checkbox"/>	Voltage of Re-charging (4.35V cell)	4.25V	4.25V	4.10V	4.10V	4.10V	4.10V	4.00V (4.05V)
LCO	<input type="checkbox"/> Min. voltage of terminate discharging	3.00V	2.50V	3.00V	3.00V	3.00V	3.00V	3.00V
LMO	<input type="checkbox"/> Min. voltage of over-discharging protection	2.50V	2.00V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V
NCA	<input type="checkbox"/> Min. voltage of terminate discharging	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V
NCM	<input type="checkbox"/> Min. voltage of over-discharging protection	2.30V	2.00V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V	2.50V
<input type="checkbox"/>	BMS Shut Down Voltage**	2.00V	2.00V	2.00V	2.00V	2.00V	2.00V	2.00V
<input type="checkbox"/>	Max. consumption current of BMS after shut down	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell	10 [□] /Cell
<input type="checkbox"/>	Do not charge***	↓ 1.00V	↓ 1.00V	↓ 1.00V	↓ 1.00V	↓ 1.00V	↓ 1.00V	↓ 1.00V
<input type="checkbox"/>	Pre-charging voltage range****	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V	1.0V ~ 3.0V
<input type="checkbox"/>	Current range of Pre-charging	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C	0.1C ~ 0.5C

Remark:

* Current of cell which full-charging shall be terminated.

** Voltage condition of BMS which shall be shut down.

*** Under 1.0V voltage, do not charge the cell.

**** Voltage range of cell which shall be charged by Pre-charging.

If a customer's battery pack cannot meet the requirements above, SDI cannot take responsibility for a quality issue about a battery cell.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

☐ Pack Design Guideline (For mechanical design)

Item	Portable IT	Power-Tool	Medical	E-Bike	E-Scooter	EV/LEV	ESS/UPS
<input type="checkbox"/> Need partitions(separator) between BMS and a Cell	○	○	○	○	○	□	□
<input type="checkbox"/> Need to check if the pack is designed to be able to avoid thermal runaway (1KWh†)					○	□	□
<input type="checkbox"/> Need to analyze the battery pack's thermal distribution and its effect on the pack's life cycle					○	□	□
<input type="checkbox"/> Need to use a non-flammable (VO level) case	○	○	○	○	○	○	○
<input type="checkbox"/> Need to apply improved material (Steel) to the case						□	□
<input type="checkbox"/> Need to analyze the battery pack's structure, system, installation status and use environment						□	□

If a customer's battery pack cannot meet the requirements above, SDI cannot take responsibility for a quality issue about a battery cell.

Tentative

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

Handling precaution and prohibitions of lithium ion rechargeable cells and batteries

Inaccurate handling of lithium ion and lithium ion polymer rechargeable battery may cause leakage, heat, smoke, an explosion, or fire.

This could cause deterioration of performance or failure. Please be sure to follow instructions carefully.

1.1. Storage

Store the battery at low temperature (below 20°C is recommended), low humidity, no dust and no corrosive gas atmosphere.

1.2. Safety precaution and prohibitions

To assure product safety, describe the following precautions in the instruction manual of the application.

[Danger!]

■ Electrical misuse

Use dedicated charger.

Use or charge the battery only in the dedicated application.

Don't charge the battery by an electric outlet directly or a cigarette lighter charger.

Don't charge the battery reversely.

■ Environmental misuse

Don't leave the battery near the fire or a heated source.

Don't throw the battery into the fire.

Don't leave, charge or use the battery in a car or similar place where inside of temperature may be over 60°C.

Don't immerse, throw, wet the battery in water / seawater.

■ others

Don't fold the battery cased with laminated film such as pouch and Polymer.

Don't store the battery in a pocket or a bag together with metallic objects such as keys, necklaces, hairpins, coins, or screws.

Don't short circuit (+) and (-) terminals with metallic object intentionally.

Don't pierce the battery with a sharp object such as a needle, screw drivers.

Don't heat partial area of the battery with heated objects such as soldering iron.

Don't hit with heavy objects such as a hammer, weight.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

Don't step on the battery and throw or drop the battery on the hard floor to avoid mechanical shock.

Don't disassemble the battery or modify the battery design including electric circuit.

Don't solder on the battery directly.

Don't use seriously scared or deformed battery.

Don't put the battery into a microwave oven, dryer ,or high-pressure container.

Don't use or assemble the battery with other makers' batteries, different types and/or models of batteries such as dry batteries, nickel-metal hydride batteries, or nickel-cadmium batteries.

Don't use or assemble old and new batteries together.

[Warning!]

Stop charging the battery if charging isn't completed within the specified time.

Stop using the battery if the battery becomes abnormally hot, order, discoloration, deformation, or abnormal conditions is detected during use, charge, or storage.

Keep away from fire immediately when leakage or foul odors are detected. If liquid leaks onto your skin or cloths, wash well with fresh water immediately.

If liquid leaking from the battery gets into your eyes, don't rub your eyes and wash them with clean water and go to see a doctor immediately.

If the terminals of the battery become dirty, wipe with a dry cloth before using the battery.

The battery can be used within the following temperature ranges. Don't exceed these ranges.

Charge temperature ranges : 0°C ~ 45°C

Discharge Temperature ranges : -10°C ~ 60°C

Store the battery at temperature below 60°C

Cover terminals with proper insulating tape before disposal.

[Caution!]

■ Electrical misusage

Battery must be charge with constant current-constant voltage (CC/CV).

Charge current must be controlled by specified value in Cell specification.

Cut-off Voltage of charging must be 4.20V

Charger must stop charging battery by detecting either charging time or current specified in Cell's specification.

Discharge current must be controlled by specified value in Cell's specification.

Cut-off Voltage of discharging must be over **2.65V**.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

■ others

Keep the battery away from babies and children to avoid any accidents such as swallow.

If younger children use the battery, their guardians should explain the proper handling method and precaution before using.

Before using the battery, be sure to read the user's manual and precaution of it's handling.

Before using charger, be sure to read the user's manual of the charger.

Before installing and removing the battery from application, be sure to read user's manual of the application.

Replace the battery when using time of battery becomes much shorter than usual.

Cover terminals with insulating tape before proper disposal.

If the battery is needed to be stored for an long period, battery should be removed from the application and stored in a place where humidity and temperature are low.

While the battery is charged, used and stored, keep it away from object materials with static electric chargers.

Safety handling procedure for the transporter

■ Quarantine

Packages that are crushed, punctured or torn open to reveal contents should not be transported.

Such packages should be isolated until the shipper has been consulted, provided instructions and, if appropriate, arranged to have the product inspected and repacked.

■ Spilled Product

In the event that damage to packaging results in the release of cells or batteries, the spilled products should be promptly collected and segregated and the shipper should be contacted for instructions.

Design of positioning the battery pack in application and charger

To prevent the deterioration of the battery performance caused by heat, battery shall be positioned away from the area where heat is generated in the application and the charger.

Spec. No.	INR18650-35E	Version No.	Ver. 1.1
-----------	--------------	-------------	----------

Design of the battery pack

Be sure adopting proper safe device such as PTC specified type or model in Cell Specification. If you intend to adopt different safety device which is not specified in Cell Specification, please contact Samsung SDI to investigate any potential safety problem.

Be sure designing 2nd protective devices such as PTC & PCM at the same time to protect Cell just in case one protective device is fault.

Please contact following offices when you need any help including safety concerns.

Samsung SDI emergency contact information

- **Samsung SDI Headquarter.**
 428-5, Gongsae-dong, Kiheung-gu, Yongin, Kyunggi-do, Korea
 Tel: +82-31-8006-3100, Fax : +82-31-210-7887
- **Samsung SDI Cheonan Factory.**
 508, Sungung-Dong, Cheonan, Chungchongnam-Do, Korea
 Tel: +82-41-560-3114, Fax : +82-41-550-3399
- **Samsung SDI America Subsidiary**
 3655 North First St. San Jose CA 95134
 Tel: +1-408-544-4541, Fax : +1-949-260-2221
- **Samsung SDI Taiwan Office.**
 9F-1,399 Ruey Kuang Road, Neihu, Taipei Taiwan
 Tel: +886-2-2656-8300, Fax : +886-2-2656-8329
- **Samsung SDI Malaysia factory.**
 Lot 635 & 660, Kawasan Perindustrian, Tuanku Jaafar, 71450
 Sungai Gadut, Negeri Sembilan Darul Khusus, Malaysia
 Tel: (+60)6-677-6160, 6153



User Guide

12V~0.6A Auto Buck-Boost DC-DC Converter

This small form factor auto step-up/step-down DC-DC converter can deliver up to 0.6A with efficiency of greater than 75%. This type of DC/DC converter allowing the electrical output potential (voltage) at its output to be greater than, less than, or equal to that at its input voltage. Ideal for USB power bank or battery operated projects requiring a higher or lower regulated output power supply. The applications include LED drivers, Solar battery chargers, robotic car and regulated variable power supply. This converter operated in buck-boost topology, i.e. step down or step-up converter in same board.

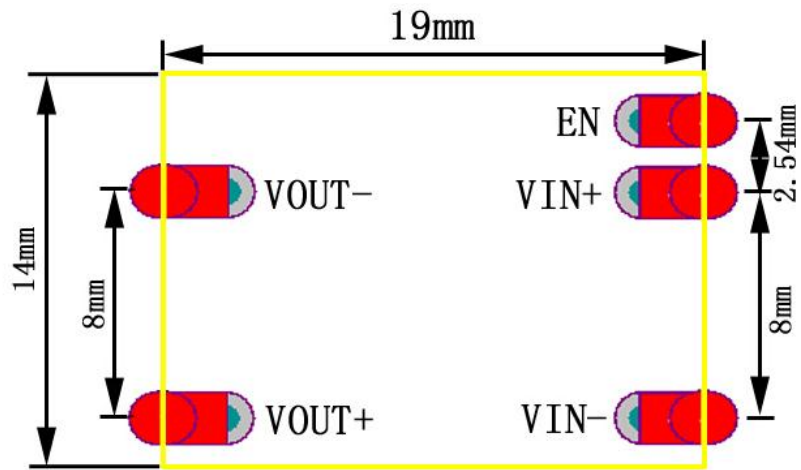


SKU: [PSU-1014](#)

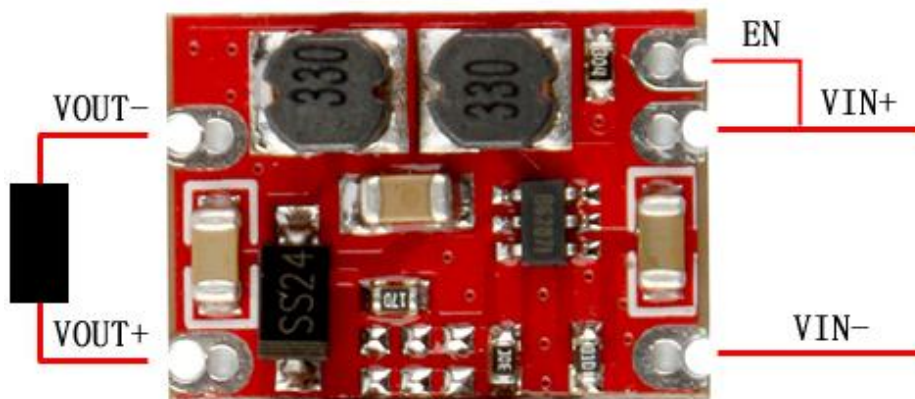
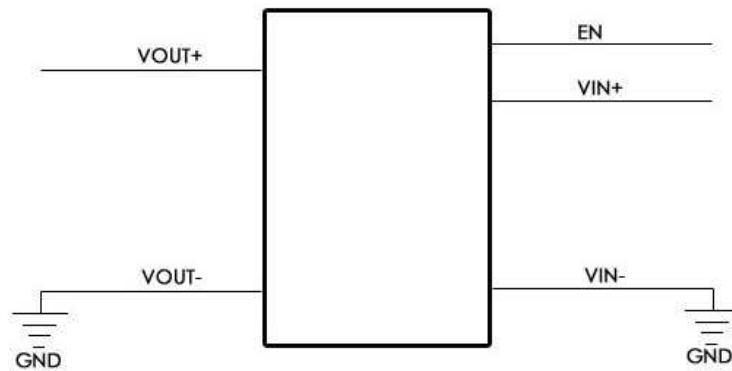
Brief Specification:

- Input voltage: 3Vdc ~ 15Vdc.
- Output Voltage: 12V.
- Output Current: 0.6A.
- No-load Current: 200uA typical.
- Conversion efficiency: 75%.
- Ripple and Noise: <50mVp-p.
- Small Form Factor for space critical application.
- Size LxWxH: (19x14x4) mm.

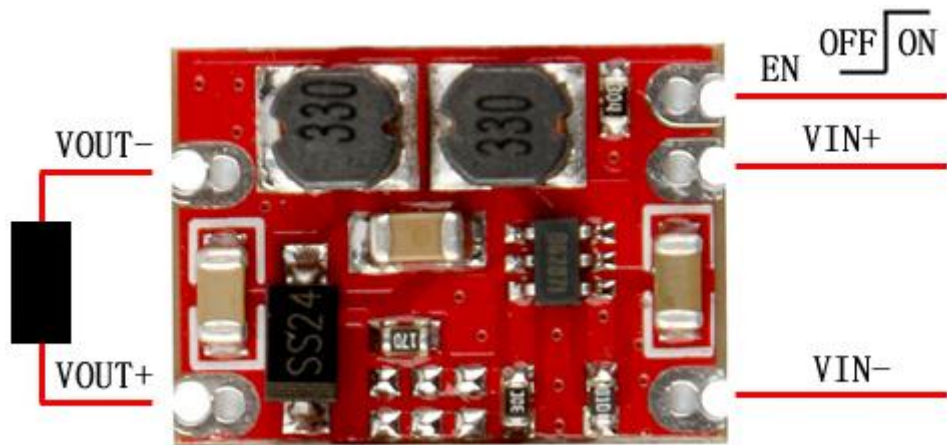
Mechanical Dimension:



Schematics:



'En' pin connected to Vin+: Output Enable



External Control for Output On-Off with Logic Level 2V~15V

Electrical Characteristics:

Paramater Name	Paramater Detail
Chip	Original
Input Voltage	3V~15V
Output Voltage	3.3V
Output Current	0.6A
Conversion efficiency	75%
Output Ripple	<50mV
Output Accuracy	+0.1V
Working Temperature	-20~85 Celsius
Relative Humidity	20-90%
Size	19*14*4mm(L*W*H)
PCB thickness	1.2mm
PCB Layers	2 layers
Current Control	With Cut Off
Cooling Method	Cooling Nature
Installation Method	SMD or 2.54mm Pin
Production Process	Reflow
Isolated	No
Design aging standards	720 hours without trouble
Production factory aging standards	48 hours
Service life	35000 hours without trouble
Factory inspection standards 3 times	All (Factory/Aging/out of library Test
Fixed switching frequency	1200KHz



Handsontec.com

We have the parts for your ideas

HandsOn Technology provides a multimedia and interactive platform for everyone interested in electronics. From beginner to diehard, from student to lecturer. Information, education, inspiration and entertainment. Analog and digital, practical and theoretical; software and hardware.



open source
hardware

HandsOn Technology support Open Source Hardware (OSHW) Development Platform.

Learn : Design : Share

www.handsontec.com

The Face behind our product quality...

In a world of constant change and continuous technological development, a new or replacement product is never far away – and they all need to be tested.

Many vendors simply import and sell without checks and this cannot be the ultimate interests of anyone, particularly the customer. Every part sell on Handsotec is fully tested. So when buying from Handsontec products range, you can be confident you're getting outstanding quality and value.

We keep adding the new parts so that you can get rolling on your next project.



www.handsontec.com

[Breakout Boards & Modules](#)



[Connectors](#)



www.handsontec.com

[Electro-Mechanical Parts](#)



www.handsontec.com

[Engineering Material](#)



www.handsontec.com

[Mechanical Hardware](#)



[Electronics Components](#)

P



www.handsontec.com

[Power Supply](#)



[Arduino Board & Shield](#)

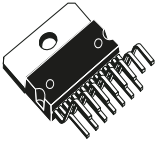
Tools & Accessory



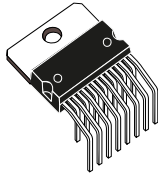
www.handsontec.com

[Tools & Accessory](#)

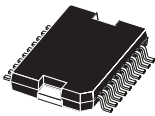
Dual full-bridge driver



Multiwatt15 V



Multiwatt15 H



PowerSO-20

Features

- Operating supply voltage up to 46 V.
- Total dc current up to 4 A.
- Low saturation voltage.
- Overtemperature protection.
- Logical "0" input voltage up to 1.5 V (high noise immunity).

Applications

- Dual brush DC motors
- Stepper motors

Description

The [L298](#) is an integrated monolithic circuit in a 15-lead multiwatt and PowerSO-20 packages. It is a high-voltage, high-current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors.

Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the connection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

Product summary

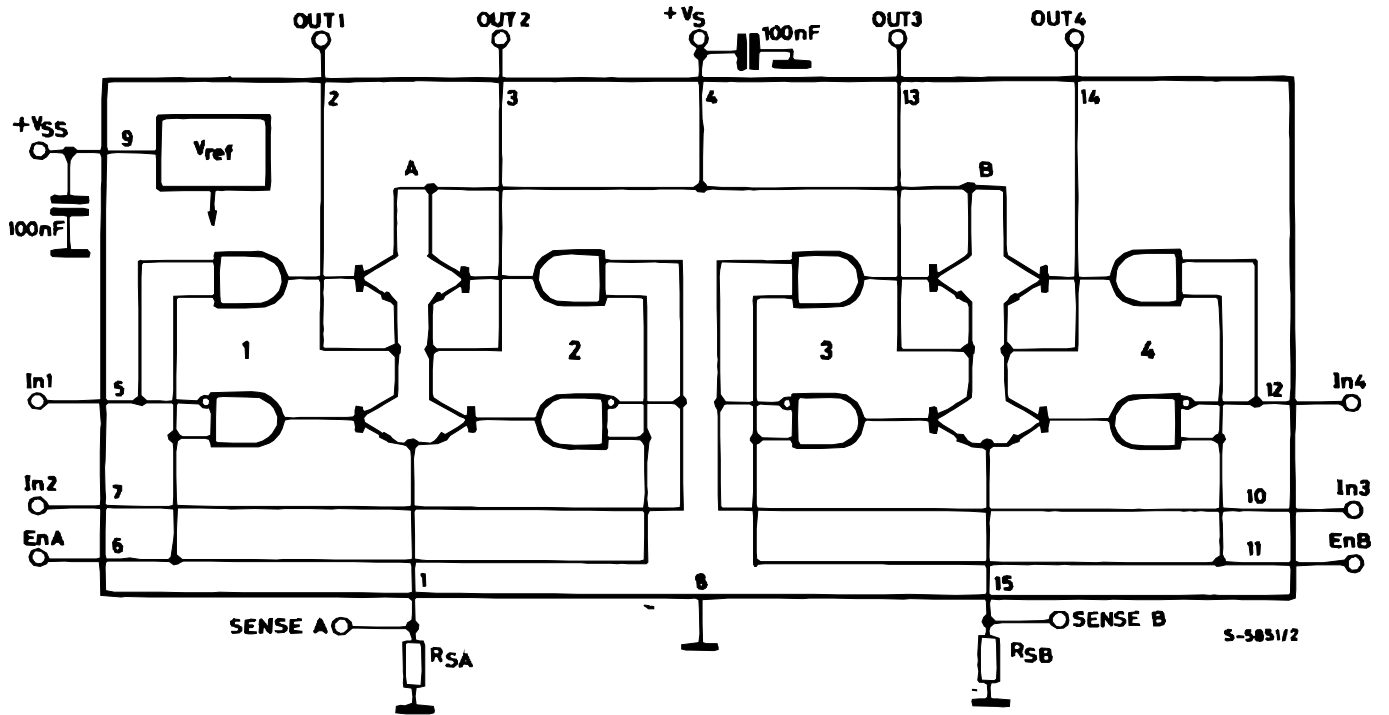
[L298](#)

Product label



1 Block diagram

Figure 1. Block diagram



2 Absolute maximum ratings

Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. These are stress ratings only and functional operation of the device at these conditions is not implied. Operating outside maximum recommended conditions for extended periods of time may impact product reliability and result in device failures.

Table 1. Absolute maximum ratings

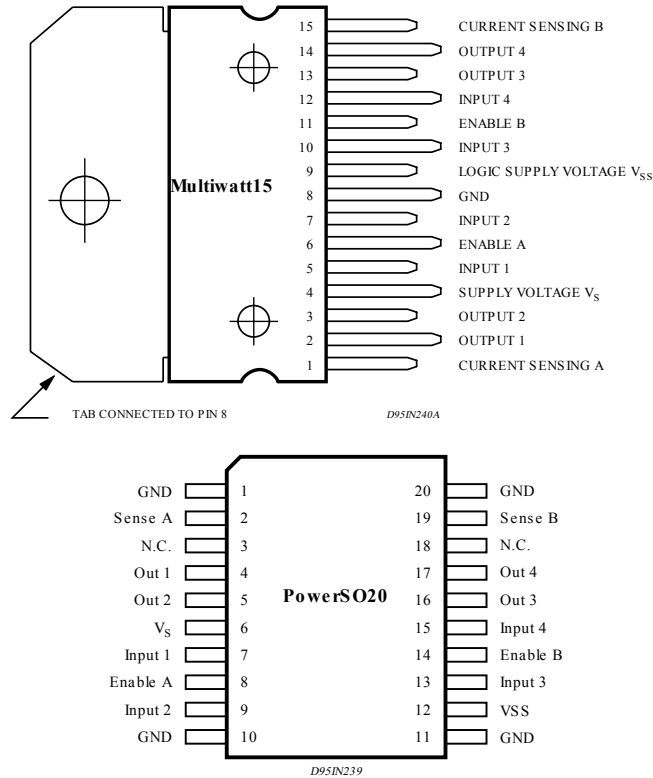
Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power supply	50	V
V_{SS}	Logic supply voltage	7	V
V_I, V_{en}	Input and enable voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak output current (each channel):		
	• Non repetitive (t = 100 ms)	3	A
	• repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10$ ms)	2.5	A
	• DC operation	2	A
V_{sens}	Sensing voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total power dissipation ($t_{case} = 75$ °C)	25	W
T_{op}	Junction operating temperature	-25 to 130	°C
T_{stg}, T_j	Storage and junction temperature	-40 to 150	°C

Table 2. Thermal data

Symbol	Parameter		Power SO20	Multiwatt 15	Unit
$R_{th\ j-case}$	Thermal resistance junction-case	Max.	–	3	°C/W
$R_{th\ j-amb}$	Thermal resistance junction-ambient	Max.	13 ⁽¹⁾	35	°C/W

1. Mounted on aluminum substrate

3 Pin description

Figure 2. Pin configuration

Table 3. Pin function

MW.15	Power SO	Name	Function
1, 15	2, 19	Sense A, Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2, 3	4, 5	Out 1, Out 2	Outputs of the bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V_S	Supply voltage for the power output stages. Anon-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5, 7	7, 9	Input 1, Input 2	TTL compatible inputs of the bridge A.
6, 11	8, 14	Enable A, Enable B	TTL compatible enable input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1, 10, 11, 20	GND	Ground.
9	12	VSS	Supply voltage for the logic blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10, 12	13, 15	Input 3, Input 4	TTL compatible inputs of the bridge B.
13, 14	16, 17	Out 3, Out 4	Outputs of the bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
–	3, 18	N.C.	Not connected

4 Electrical characteristics

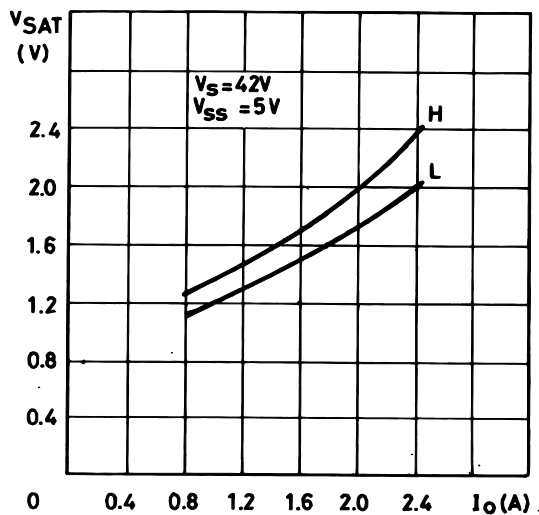
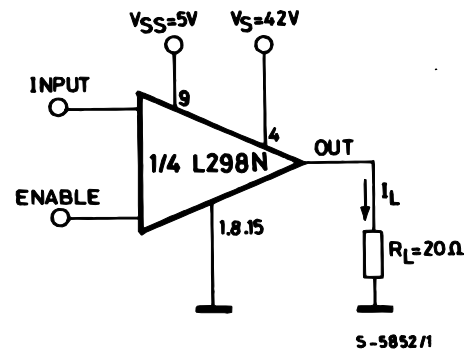
Table 4. Electrical characteristics

 ($V_S = 42\text{ V}$; $V_{SS} = 5\text{ V}$, $T_j = 25\text{ °C}$; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_S	Supply voltage (pin 4)	Operative condition	$V_{IH} + 2.5$		46	V
V_{SS}	Logic supply voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I_S	Quiescent supply current (pin 4)	$V_{en} = H$; $V_i = L$; $I_L = 0$		13	22	mA
		$V_{en} = H$; $V_i = H$; $I_L = 0$		50	70	mA
		$V_{en} = L$; $V_i = X$			4	mA
I_{SS}	Quiescent current from V_{SS} (pin 9)	$V_{en} = H$; $V_i = L$; $I_L = 0$		24	36	mA
		$V_{en} = H$; $V_i = H$; $I_L = 0$		7	12	mA
		$V_{en} = L$; $V_i = X$			6	m
V_{iL}	Input low voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V_{iH}	Input high voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V_{SS}	V
I_{iL}	Low voltage input current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_i = L$			-10	μA
I_{iH}	High voltage input current (pins 5, 7, 10, 12)	$V_i = H \leq V_{SS} - 0.6\text{V}$		30	100	μA
V_{enL}	Enable low voltage (pins 6, 11)		-0.3		1.5	V
V_{enH}	Enable high voltage (pins 6, 11)		2.3		V_{SS}	V
I_{enL}	Low voltage enable current (pins 6, 11)	$V_{en} = L$			-10	μA
I_{enH}	High voltage enable current (pins 6, 11)	$V_{en} = H \leq V_{SS} - 0.6\text{V}$		30	100	μA
$V_{CEsat(H)}$	Source saturation voltage	$I_L = 1\text{A}$	0.95	1.35	1.7	V
		$I_L = 2\text{A}$		2	2.7	V
$V_{CEsat(L)}$	Sink saturation voltage	$I_L = 1\text{A}^{(1)}$	0.85	1.2	1.6	V
		$I_L = 2\text{A}^{(1)}$		1.7	2.3	V
V_{CEsat}	Total drop	$I_L = 1\text{A}^{(1)}$	1.80		3.2	V
		$I_L = 2\text{A}^{(1)}$			4.9	
V_{sens}	Sensing voltage (pins 1, 15)		-1 ⁽²⁾		2	V
$T_1(V_i)$	Source current turn-off delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L^{(3); (5)}$		1.5		μs
$T_2(V_i)$	Source current fall time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L^{(3); (5)}$		0.2		μs
$T_3(V_i)$	Source current turn-on delay	$0.5 V_i$ to $0.1 I_L^{(3); (5)}$		2		μs
$T_4(V_i)$	Source current rise time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L^{(3); (5)}$		0.7		μs
$T_5(V_i)$	Sink current turn-off delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L^{(4); (5)}$		0.7		μs
$T_6(V_i)$	Sink current fall time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L^{(4); (5)}$		0.25		μs
$T_7(V_i)$	Sink current turn-on delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L^{(4); (5)}$		1.6		μs
$T_8(V_i)$	Sink current rise time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L^{(4); (5)}$		0.2		μs
$f_C(V_i)$	Commutation frequency	$I_L = 2\text{A}$		25	40	KHz
$T_1(V_{en})$	Source current turn-off delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L^{(3); (5)}$		3		μs
$T_2(V_{en})$	Source current fall time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L^{(3); (5)}$		1		μs

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$T_3(V_{en})$	Source current turn-on delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (3); (5)		0.3		μs
$T_4(V_{en})$	Source current rise time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (5)		0.4		μs
$T_5(V_{en})$	Sink current turn-off delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (4); (5)		2.2		μs
$T_6(V_{en})$	Sink current fall time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (4); (5)		0.35		μs
$T_7(V_{en})$	Sink current turn-on delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (4); (5)		0.25		μs
$T_8(V_{en})$	Sink current rise time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (4); (5)		0.1		μs

1. "Sense A" and "Sense B" pins connected to GND.
2. Sensing voltage can be $-1 V$ for $t \leq 50 \mu sec$; in steady state $V_{sens\ min} \geq -0.5 V$.
3. See Figure 4.
4. See Figure 6.
5. The load must be a pure resistor.

Figure 3. Typical saturation voltage vs. output

Figure 4. Switching times test circuits


Note: For INPUT switching, set EN = H
For ENABLE switching, set IN = H

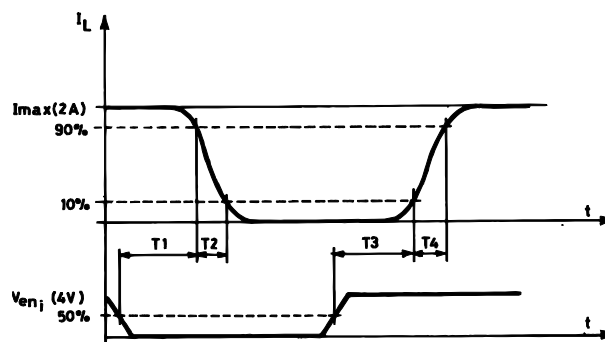
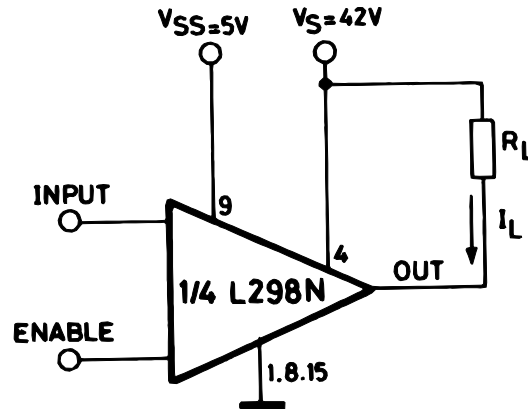
Figure 5. Source current delay times vs. input or enable switching


Figure 6. Switching times test circuits



Note: For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = L

Figure 7. Sink current delay times vs. input 0 V enable switching

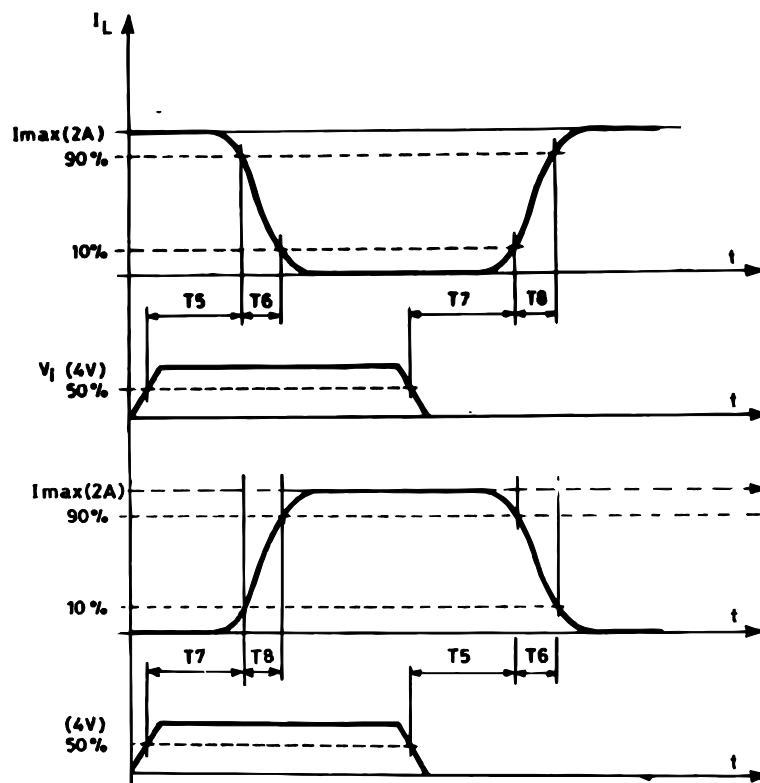


Figure 8. Bidirectional dc motor control

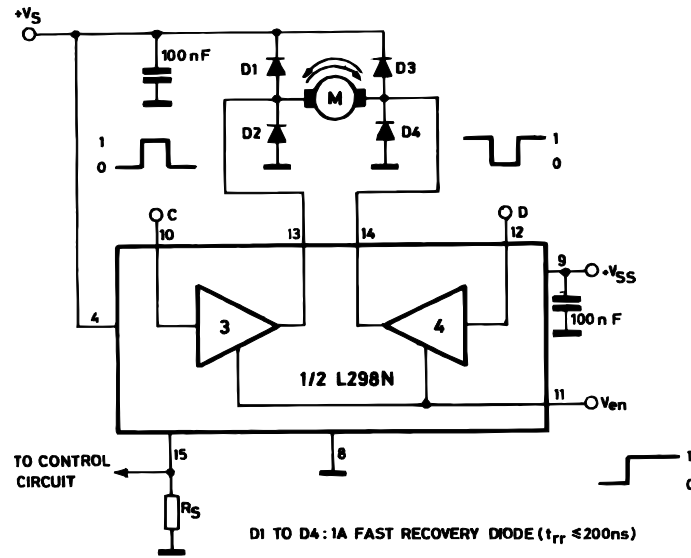
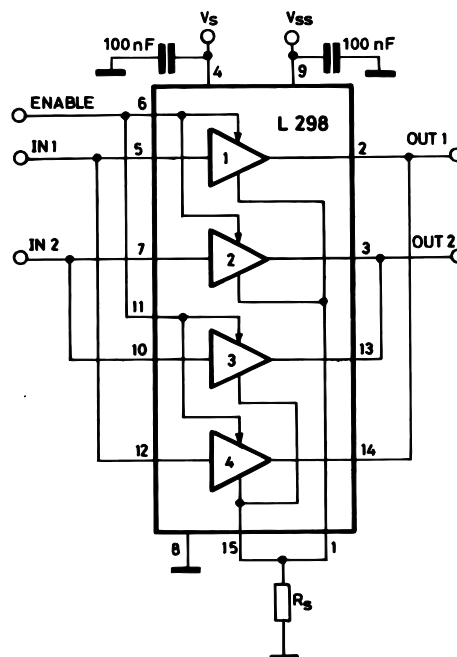


Table 5. Values of bidirectional dc motor control

Inputs		Function
$V_{en} = H$	C = H; D = L	Forward
	C = L; D = H	Reverse
	C = D	Fast motor stop
$V_{en} = L$	C = X; D = X	Free running motor stop

Note: L = Low, H = High, X = Do not care

Figure 9. For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3



5 Application information

(Refer to the [Section 1 Block diagram](#))

5.1 Power output stage

The L298 integrates two power output stages (A ; B).

The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differenzial mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output : an external resistor (R_{SA} ; R_{SB}) allows to detect the intensity of this current.

5.1.1 Input stage

Each bridge is driven by means of four gates, managed by following inputs:

- In1, In2 and EnA
- In3, In4 and EnB

The In inputs set the bridge state when The En input is high; a low state of the En input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

5.2 Suggestions

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, is required between both V_S and V_{SS} to ground, as near as possible to GND pin. When the bulk capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be placed near the L298.

The sense resistor, low inductance, must be grounded near the negative pole of V_S that must be near the GND pin of the IC.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Before to Turn-ON the supply voltage and before to Turn it OFF, the enable inputs must be driven to the low state.

5.3 Applications

[Figure 8](#) shows a bidirectional DC motor control schematic diagram for which only one bridge is needed.

The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ($t_{rr} \leq 200$ ns) that must be chosen of a V_F as low as possible at the worst case of the load current.

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped; Schottky diodes would be preferred.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 A must never be exceeded.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 A, a paralleled configuration can be chosen (See [Figure 9](#)).

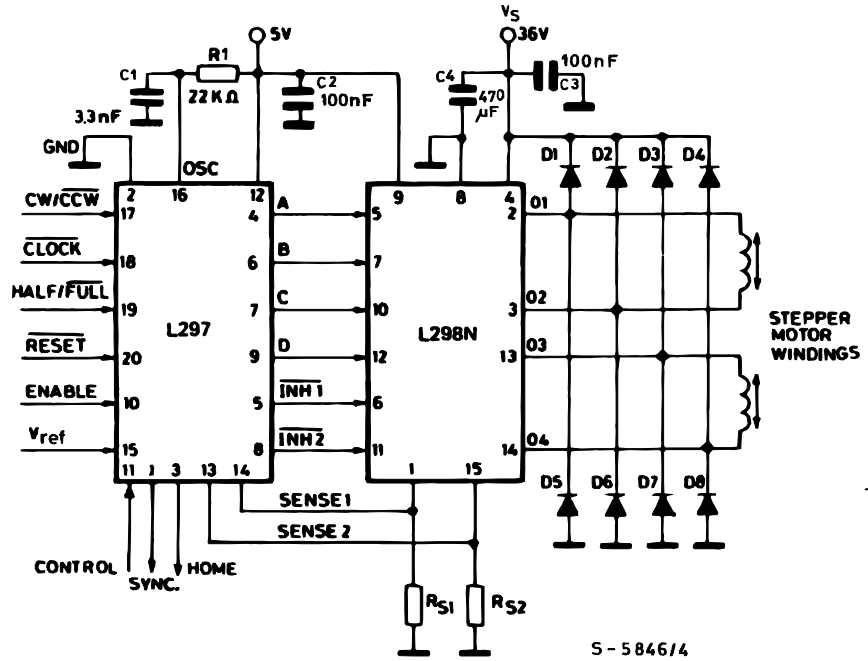
This solution can drive up to 3 A in dc operation and until 3.5 A of a repetitive peak current.

On [Figure 10](#) it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated, in this example, by the IC L297.

[Figure 11](#) shows an example of P.C.B. designed for the application of [Figure 10](#).

[Figure 12](#) shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the IC L6506.

Figure 10. Two phase bipolar stepper motor circuit



Note: $R_{S1} = R_{S2} = 0.5 \Omega$.

Figure 11. Suggested printed circuit board layout for the circuit of fig. 10 (1:1 scale)

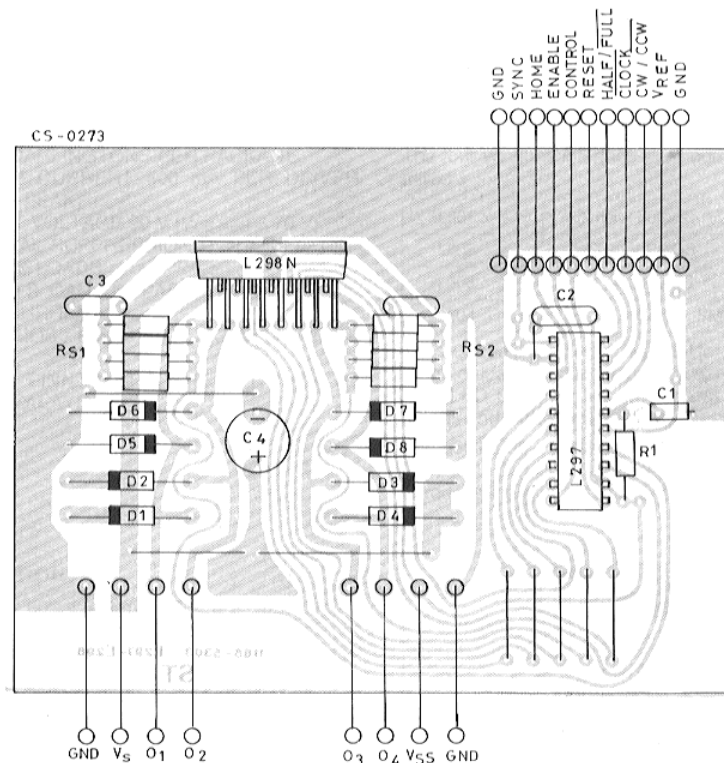
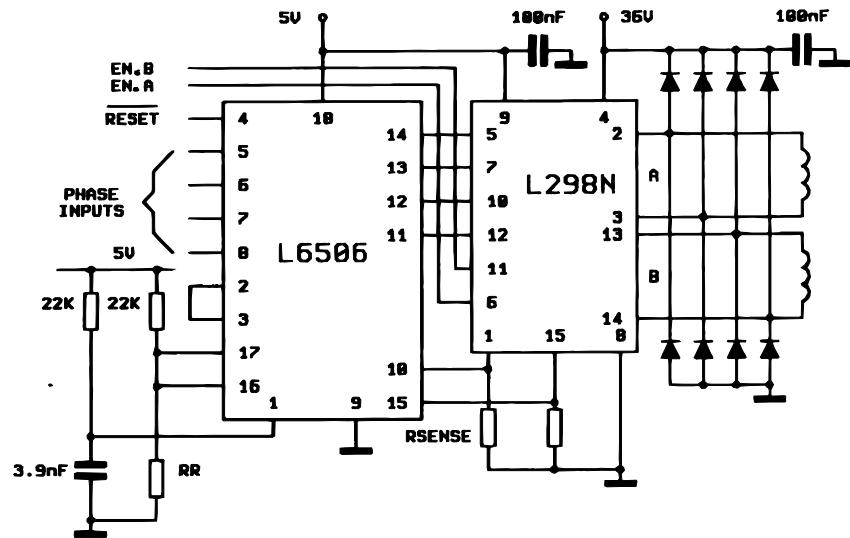


Figure 12. Two phase bipolar stepper motor control circuit by using the current controller L6506.



R_R and R_{sense} depend from the load current

6 Package information

In order to meet environmental requirements, ST offers these devices in different grades of **ECOPACK** packages, depending on their level of environmental compliance. ECOPACK specifications, grade definitions and product status are available at: www.st.com. ECOPACK is an ST trademark.

6.1 Outline and mechanical data

Figure 13. Multiwatt15L V

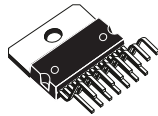


Figure 14. Outline - Multiwatt15L V

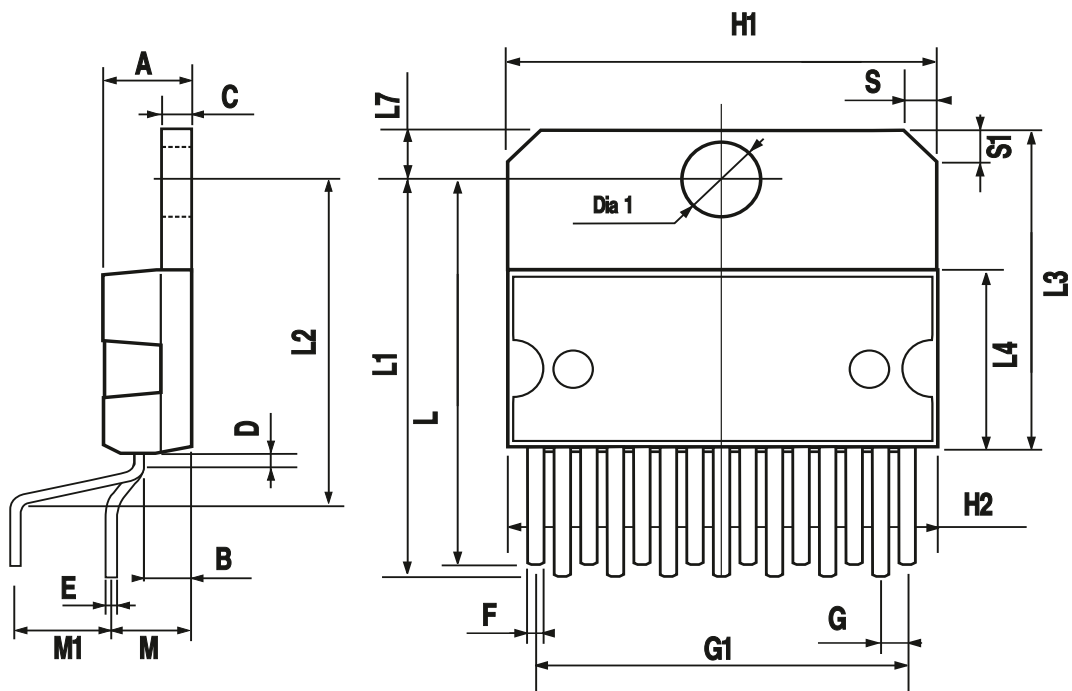


Table 6. Mechanical data Multiwatt15L V

Dim.	mm			inch		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
D		1			0.039	
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.02	1.27	1.52	0.040	0.050	0.060
G1	17.53	17.78	18.03	0.690	0.700	0.710
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L	21.9	22.2	22.5	0.862	0.874	0.886
L1	21.7	22.1	22.5	0.854	0.870	0.886
L2	17.65		18.1	0.695		0.713
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
M	4.25	4.55	4.85	0.167	0.179	0.191
M1	4.63	5.08	5.53	0.182	0.200	0.218
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

Figure 15. Multiwatt15 H

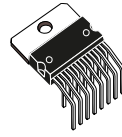


Figure 16. Outline - Multiwatt15L H

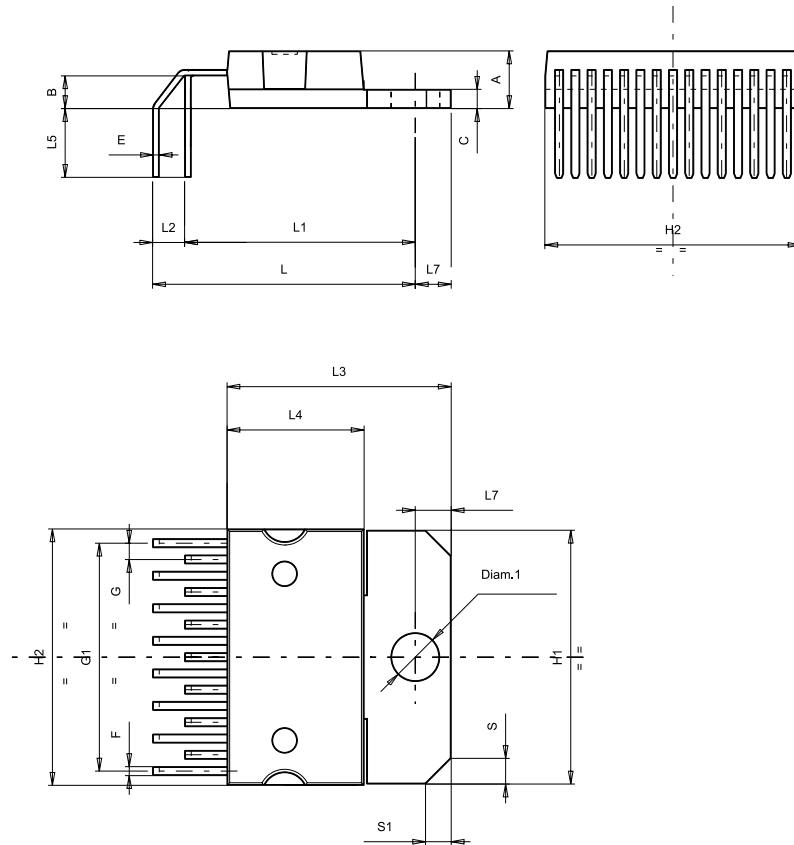


Table 7. Mechanical data Multiwatt15L H

Dim.	mm			inch		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.14	1.27	1.4	0.045	0.050	0.055
G1	17.57	17.78	17.91	0.692	0.700	0.705
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L		20.5			0.807	
L1		18			0.709	
L2		2.5			0.098	
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L5		5.55			0.208	
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

Table 8. Mechanical data PowerSO-20

Dim.	mm			inch		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			3.6			0.142
a1	0.1		0.3	0.004		0.012
a2			3.3			0.130
a3	0		0.1	0.000		0.004
b	0.4		0.53	0.016		0.021
c	0.23		0.32	0.009		0.013
D ⁽¹⁾	15.8		16	0.622		0.630
D1	9.4		9.8	0.370		0.386
E	13.9		14.5	0.547		0.570
e		1.27			0.050	
e3		11.43			0.450	
E1 ⁽¹⁾	10.9		11.1	0.429		0.437
E2			2.9			0.114
E3	5.8		6.2	0.228		0.244
G	0		0.1	0.000		0.004
H	15.5		15.9	0.610		0.626
h			1.1			0.043
L	0.8		1.1	0.031		0.043
N	10° (max.)					
S	8° (max.)					
T		10			0.394	

1. Do not include mold flash or protrusions.

- Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").

- Critical dimensions: "E", "G" and "a3"

7 Ordering information

Table 9. Order codes

Order code	Package	Packaging
L298N	Multiwatt15L V	Tube
L298HN	Multiwatt15L H	Tube
L298P	PowerSO-20	Tube
L298P013TR	PowerSO-20	Tape and reel

Revision history

Table 10. Document revision history

Date	Version	Changes
06-Oct-2023	5	Changed outline and mechanical data; see package H, Figure 16 .

Contents

1	Block diagram	2
2	Absolute maximum ratings	3
3	Pin description	4
4	Electrical characteristics	5
5	Application information	9
5.1	Power output stage	9
5.1.1	Input stage	9
5.2	Suggestions	9
5.3	Applications	9
6	Package information	12
6.1	Outline and mechanical data	12
7	Ordering information	18
	Revision history	19
	List of tables	21
	List of figures	22

List of tables

Table 1.	Absolute maximum ratings	3
Table 2.	Thermal data	3
Table 3.	Pin function	4
Table 4.	Electrical characteristics	5
Table 5.	Values of bidirectional dc motor control	8
Table 6.	Mechanical data Multiwatt15L V	13
Table 7.	Mechanical data Multiwatt15L H	15
Table 8.	Mechanical data PowerSO-20	17
Table 9.	Order codes	18
Table 10.	Document revision history	19

List of figures

Figure 1.	Block diagram	2
Figure 2.	Pin configuration	4
Figure 3.	Typical saturation voltage vs. output	6
Figure 4.	Switching times test circuits	6
Figure 5.	Source current delay times vs. input or enable switching	6
Figure 6.	Switching times test circuits	7
Figure 7.	Sink current delay times vs. input 0 V enable switching	7
Figure 8.	Bidirectional dc motor control	8
Figure 9.	For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.	8
Figure 10.	Two phase bipolar stepper motor circuit	10
Figure 11.	Suggested printed circuit board layout for the circuit of fig. 10 (1:1 scale)	10
Figure 12.	Two phase bipolar stepper motor control circuit by using the current controller L6506.	11
Figure 13.	Multiwatt15L V	12
Figure 14.	Outline - Multiwatt15L V	12
Figure 15.	Multiwatt15 H	14
Figure 16.	Outline - Multiwatt15L H	14
Figure 17.	PowerSO-20	16
Figure 18.	Outline - PowerSO-20	16

IMPORTANT NOTICE – READ CAREFULLY

STMicroelectronics NV and its subsidiaries (“ST”) reserve the right to make changes, corrections, enhancements, modifications, and improvements to ST products and/or to this document at any time without notice. Purchasers should obtain the latest relevant information on ST products before placing orders. ST products are sold pursuant to ST’s terms and conditions of sale in place at the time of order acknowledgment.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection, and use of ST products and ST assumes no liability for application assistance or the design of purchasers’ products.

No license, express or implied, to any intellectual property right is granted by ST herein.

Resale of ST products with provisions different from the information set forth herein shall void any warranty granted by ST for such product.

ST and the ST logo are trademarks of ST. For additional information about ST trademarks, refer to www.st.com/trademarks. All other product or service names are the property of their respective owners.

Information in this document supersedes and replaces information previously supplied in any prior versions of this document.

© 2023 STMicroelectronics – All rights reserved



G12-N20 Geared Mini DC Motor

This is a DC Mini Metal Gear Motor, ideal for making robots. Light weight, high torque and various RPM. Fine craftsmanship, durable, not easy to wear. With excellent stall characteristics, can climb hills easily. You can also easily mount a wheel on the motor's output shaft. Widely used on boat, model car, robotic, home appliances and linear motion control.



SKU: [EMH1176](#)

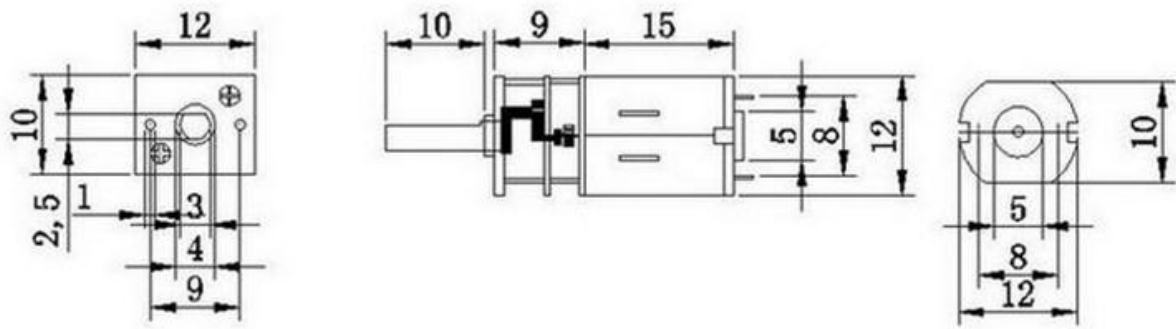
Brief Data:

- Model: GA12-N20.
- Medium Power MP: 0.5W Max.
- Rated Voltage: 6~12V.
- Revolving Speed: Refer to Table 1.
- Torque: Refer to Table 1.
- Rated Current: 0.04A.
- Stall Current: 0.67A.
- Total Length: 34mm.
- Gear Material: Full Metal.
- Gearbox Size: 15 x 12 x 10mm (LxWxH).
- Shaft Size: Ø3 x 10mm (D*L). D-Type Shaft.
- Net Weight: 10g.

Stalling this gear motor could cause gear damage!

Mechanical Dimension:

Unit: mm



Size (Unit: mm)

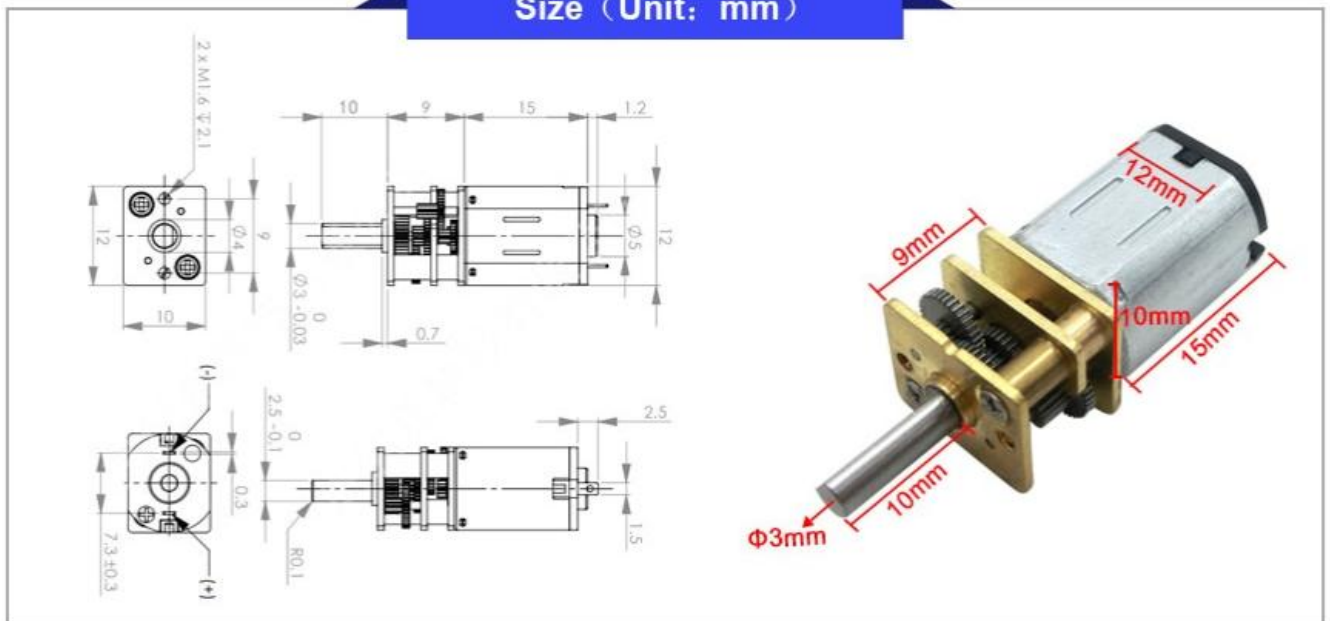
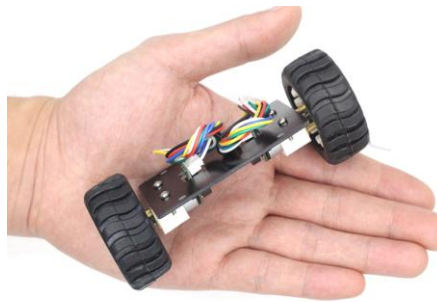


Table-1:

Model	No Load Speed RPM	Torque Max Kg.mm	Stalled Torque Kg.mm	SKU
GA12-N20-100	6V@100 12V@200	3.4	17	EMH1176
GA12-N20-200	6V@200 12V@400	1.9	9.4	EMH1189
GA12-N20-450	6V@450 12V@900	1.2	5.4	EMH1190

Application Examples:



Related Products:

- [42mm Rubber Wheels](#)
- [GA12-N20 Motor Mounting Bracket](#)
- [68mm High Grip Rubber Wheel for Robotics Car](#)

Application Note: Useful Motor/Torque Equations

Force (Newtons)

$$F = m \times a$$

m = mass (kg)

a = acceleration (m/s²)

Motor Torque (Newton-meters)

$$T = F \times d$$

F = force (Newtons)

d = moment arm (meters)

Power (Watts)

$$P = I \times V$$

I = current (amps)

V = voltage (volts)

$$P = T \times \omega$$

T = torque (Newton-meters)

ω = angular velocity (radian/second)

Unit Conversions

Length (1 in = 0.0254 m)

Velocity (1 RPM = 0.105 rad/sec)

Torque (1 in-lb = 0.112985 N-m)

Power (1 HP = 745.7 W)

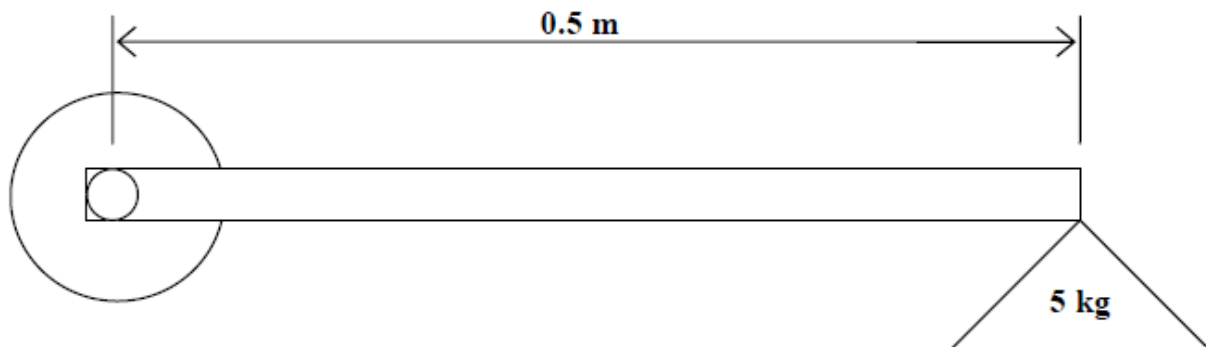
Example 1

Determine if the following motor can be used to lift a 5-kg load using a 0.5-m lever arm.

Merkle-Korff Gearmotor specifications

Stall Torque = 40 in-lb

Stall Current = 3.5 amps



Solution

Convert Stall Torque from in-lb to N-m

$$1 \text{ in-lb} = 0.112985 \text{ N-m}$$

$$40 \text{ in-lb} = 40 \times 0.112985 \text{ N-m} = 4.5194 \text{ N-m}$$

Calculate the Force required to lift the 5-kg load

$$F = m \times a = 5 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 49.05 \text{ N}$$

Calculate the Torque required to lift the Force with the lever arm

$$T = F \times d = 49.05 \text{ N} \times 0.5 \text{ m} = 24.525 \text{ N-m}$$

We cannot perform the lift with this set-up, because the stall torque is smaller than the torque required for the lift. We must either shorten the length of the lever arm, or we must choose another motor with a higher stall torque to perform this operation.

Example 2

Using the same motor as in Example 1 with a 12-V power supply:

- a) Calculate the power used by the motor to rotate a 5-kg load at 50 RPM using a 3-inch lever arm.
- b) Calculate the current draw from the battery to perform this operation.

Solution

Convert inches to meters:

$$1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$$

$$3 \text{ in} = 0.0762 \text{ m}$$

Calculate the Force required to lift the 5-kg load:

$$F = m \times a = 5 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 49.05 \text{ N}$$

Calculate the Torque required for this operation:

$$T = F \times d = 49.05 \text{ N} \times 0.0762 \text{ m} = 3.738 \text{ N-m}$$

Note- This torque is lower than the motor's stall torque, so this operation is possible using the specified motor, mass, and lever arm

Convert RPM to radians/second:

$$1 \text{ RPM} \times 2\pi \text{ rad/rev} \times 1 \text{ min}/60 \text{ sec} = 0.105 \text{ rad/sec}$$

$$\omega = 50 \text{ rev/min} \times 0.105 \text{ rad/sec/RPM} = 5.25 \text{ rad/sec}$$

Calculate the Power required for this operation:

$$P = T \times \omega = 3.738 \text{ N-m} \times 5.25 \text{ rad/sec} = 19.622 \text{ W}$$

Calculate the Current draw from the battery (use the supply voltage in this calculation):

$$I = P/V = 19.622 \text{ W}/12 \text{ V} = 1.635 \text{ Amps}$$

Note- This current is smaller than the maximum allowable current draw of the motor.

Example 3

Determine the motor torque necessary to power the robot drive wheels.

Solution

The following approach is merely one way to solve this problem. Several exist.

Assume the robot will be powered by two powered drive wheels and supported by two freely rotating caster wheels. Robot weight is denoted by W and for this simple example we'll assume the weight is distributed evenly over all 4 wheels, as shown in Figure 1 below.

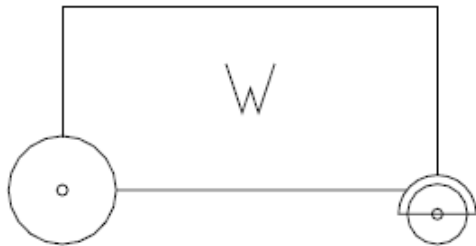


Figure 1

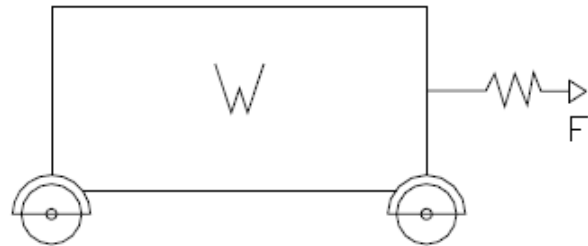


Figure 2

Thinking logically about the problem, we could model the robot as having 4 of the identical caster wheels (Figure 2) and the force required to propel the robot is simply the force needed to start the robot moving (this could be measured empirically with a force scale). The problem is we haven't yet built the robot so testing it in this manner is not an option. We need to calculate the force (and hence motor torque) required to move the robot **before** we build anything.

Looking closer at the caster wheel we can see the actual friction that must be overcome to put the robot in motion. F_w is the friction force between the wheel and the floor and F_a is the friction force between the wheel and the axle. T_w and T_a are the respective torques between the wheel and floor and the wheel and axle.

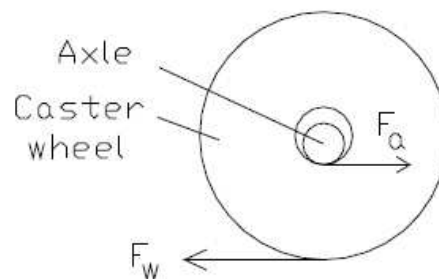


Figure 3

$$F_a = W/2 * \mu_a$$

$$T_a = F_a * R_a$$

$$F_w = W/2 * \mu_w$$

$$T_w = F_w * R_w$$

T_w is the *maximum* torque the wheel can transmit to the ground before it slips.

Our goal is to find a realistic range for T_m , the motor torque.

As calculated above, T_w would be the *maximum* amount of torque the motor could transfer to the ground before the wheel begins to slip (ie T_m , max).

Typically, we desire $\mu_w > \mu_a$, so the wheel does not slip/slide across the floor, but rather rolls. We can easily look up the μ_a value for the axle/wheel materials in contact. Knowing μ_a and the weight of the vehicle, F_a can be computed. This is the *minimum* amount of force we would have to provide at the wheel/axle interface to overcome the friction between the two. To relate the computed axle force F_a to the *minimum* amount of

wheel torque required to move the robot, we would use the “virtual radius” of the wheel/axle combination, which is computed as follows:

$$R_v = R_w - R_a$$

This is the fictitious radius about which F_a would act to rotate the wheel about the tangent point in contact with the ground at any instant, as shown in Figure 4 below.

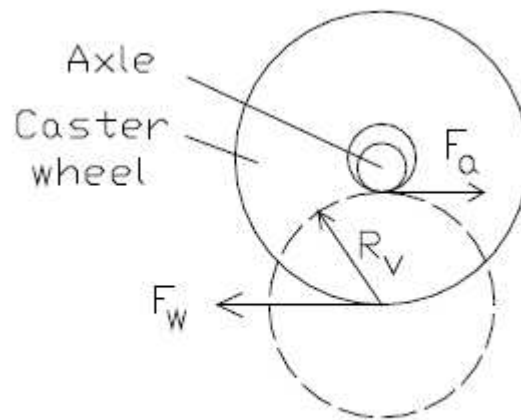


Figure 4

Therefore our equation for the *minimum* amount of torque the motor must transfer to the ground before the wheel begins to roll (thus causing the robot to move) would be:

$$T_m (\min) = F_a * R_v = F_a * (R_w - R_a)$$

In summation, $T_m, \min \leq T_m \leq T_m, \max$ or alternatively, $F_a * (R_w - R_a) \leq T_m \leq F_w * R_w$

Motors, Fans and Accessories Selection

40x40x10 mm DC Brushless Cooling Fan

Ultra quiet powerful brushless DC fan, quiet sleeve-bearing design. Specialized design, professional made, stable performance. Operating Temperature: -10 C to +60C. Long Life Expectancy.



EMH-1071 **GDT4010S12B** **RM 6.50**

GA12-N20 Geared Mini DC Motor

This is a DC Mini Metal Gear Motor, ideal for making robots. Light weight, high torque and low RPM. Fine craftsmanship, durable, not easy to wear. Widely used on boat, model car, robotic, home appliances, linear motion control.



EMH-1176 **GA12-N20** **RM 18.50**

30x30x10 mm DC Brushless Cooling Fan

Ultra quiet powerful brushless DC fan, quiet sleeve-bearing design. Specialized design, professional made, stable performance. Operating Temperature: -10 C to +60C. Long Life Expectancy.



EMH-1070 **GDT3010S12B** **RM 7.50**

Nema23 Bipolar/Unipolar Stepper Motor 1.0A

A stepper motor to satisfy all your 3D-Printer, robotics, Linear Motion projects needs! This 6-wire uni-polar/bipolar stepper motor has 1.8° per step for smooth motion and a nice holding torque.



EMH-1179 **23HS2610** **RM 110.00**

1.2A Nema 17 Stepper Motor

A stepper motor to satisfy all your 3D-Printer, robotics, Linear Motion projects needs! This 4-wire bipolar stepper has 1.8° per step for smooth motion and a nice holding torque.



EMH-1016 **42HS40-1204D** **RM 44.50**

1.7A Nema 17 Stepper Motor

A stepper motor to satisfy all your 3D-Printer, robotics, Linear Motion projects needs! This 4-wire bipolar stepper has 1.8° per step for smooth motion and a nice holding torque.



EMH-1181 **17HS-4401SD** **RM 47.00**

SG90 Tower Pro Gear Micro Servo Motor

Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction). Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box.



EMH-1140 **TPSG90S** **RM 7.40**

Nema-17 Planetary Geared Stepper Motor

This high precision NEMA17 Stepper motor has an integrated Planetary Gearbox with 1:5.18 gear ratio, the resolution can reach 0.35°step angle.



EMH-1173 **42BYGP40P** **RM 185.00**



Handsontec.com

We have the parts for your ideas

HandsOn Technology provides a multimedia and interactive platform for everyone interested in electronics. From beginner to diehard, from student to lecturer. Information, education, inspiration and entertainment. Analog and digital, practical and theoretical; software and hardware.



open source
hardware

HandsOn Technology support Open Source Hardware (OSHW) Development Platform.

Learn : Design : Share

www.handsontec.com



The Face behind our product quality...

In a world of constant change and continuous technological development, a new or replacement product is never far away – and they all need to be tested.

Many vendors simply import and sell without checks and this cannot be the ultimate interests of anyone, particularly the customer. Every part sell on Handsontec is fully tested. So when buying from Handsontec products range, you can be confident you're getting outstanding quality and value.

We keep adding the new parts so that you can get rolling on your next project.



www.handsontec.com

[Breakout Boards & Modules](#)



[Connectors](#)



www.handsontec.com

[Electro-Mechanical Parts](#)



www.handsontec.com

[Engineering Material](#)



www.handsontec.com

[Mechanical Hardware](#)



[Electronics Components](#)

P



www.handsontec.com

[Power Supply](#)



[Arduino Board & Shield](#)

[Tools & Accessory](#)



www.handsontec.com

[Tools & Accessory](#)

Future Technology Devices International Ltd.

FT232R USB UART IC Datasheet



The FT232R is a USB to serial UART interface with the following advanced features:

- Single chip USB to asynchronous serial data transfer interface.
- Entire USB protocol handled on the chip. No USB specific firmware programming required.
- Fully integrated 1024 bit EEPROM storing device descriptors and CBUS I/O configuration.
- Fully integrated USB termination resistors.
- Fully integrated clock generation with no external crystal required plus optional clock output selection enabling a glue-less interface to external MCU or FPGA.
- Data transfer rates from 300 baud to 3 Mbaud (RS422, RS485, RS232) at TTL levels.
- 128 byte receive buffer and 256 byte transmit buffer utilising buffer smoothing technology to allow for high data throughput.
- FTDI's royalty-free Virtual Com Port (VCP) and Direct (D2XX) drivers eliminate the requirement for USB driver development in most cases.
- Unique USB FTDIChip-ID™ feature.
- Configurable CBUS I/O pins.
- Transmit and receive LED drive signals.
- UART interface support for 7 or 8 data bits, 1 or 2 stop bits and odd / even / mark / space / no parity
- FIFO receives and transmits buffers for high data throughput.
- Synchronous and asynchronous bit bang interface options with RD# and WR# strobes.
- Device supplied pre-programmed with unique USB serial number.
- Supports bus powered, self-powered and high-power bus powered USB configurations.
- Integrated +3.3V level converter for USB I/O.
- Integrated level converter on UART and CBUS for interfacing to between +1.8V and +5V logic.
- True 5V/3.3V/2.8V/1.8V CMOS drive output and TTL input.
- Configurable I/O pin output drive strength.
- Integrated power-on-reset circuit.
- Fully integrated AVCC supply filtering - no external filtering required.
- UART signal inversion option.
- +3.3V (using external oscillator) to +5.25V (internal oscillator) Single Supply Operation.
- Low operating and USB suspend current.
- Low USB bandwidth consumption.
- UHCI/OHCI/EHCI host controller compatible.
- USB 2.0 Full Speed compatible.
- -40°C to 85°C extended operating temperature range.
- Available in compact Pb-free 28 Pin SSOP and QFN-32 packages (both RoHS compliant).

Neither the whole nor any part of the information contained in, or the product described in this manual, may be adapted or reproduced in any material or electronic form without the prior written consent of the copyright holder. This product and its documentation are supplied on an as-is basis and no warranty as to their suitability for any particular purpose is either made or implied. Future Technology Devices International Ltd will not accept any claim for damages howsoever arising as a result of use or failure of this product. Your statutory rights are not affected. This product or any variant of it is not intended for use in any medical appliance, device or system in which the failure of the product might reasonably be expected to result in personal injury. This document provides preliminary information that may be subject to change without notice. No freedom to use patents or other intellectual property rights is implied by the publication of this document. Future Technology Devices International Ltd, Unit 1, 2 Seaward Place, Centurion Business Park, Glasgow G41 1HH United Kingdom. Scotland Registered Company Number: SC136640

1 Typical Applications

- USB to RS232/RS422/RS485 Converters
- Upgrading Legacy Peripherals to USB
- Cellular and Cordless Phone USB data transfer cables and interfaces
- Interfacing MCU/PLD/FPGA based designs to USB
- USB Audio and Low Bandwidth Video data transfer
- PDA to USB data transfer
- USB Smart Card Readers
- USB Instrumentation
- USB Industrial Control
- USB MP3 Player Interface
- USB FLASH Card Reader and Writers
- Set Top Box PC - USB interface
- USB Digital Camera Interface
- USB Hardware Modems
- USB Wireless Modems
- USB Bar Code Readers
- USB Software and Hardware Encryption Dongles

1.1 Driver Support

Royalty free VIRTUAL COM PORT (VCP) DRIVERS for...

- Windows 10 32,64-bit
- Windows 8/8.1 32,64-bit
- Windows 7 32,64-bit
- Windows Vista and Vista 64-bit
- Windows XP and XP 64-bit
- Windows 98, 98SE, ME, 2000, Server 2003, XP, Server 2008 and server 2012 R2
- Windows XP Embedded
- Windows CE 4.2, 5.0 and 6.0
- Mac OS 8/9, OS-X
- Linux 2.4 and greater

Royalty free D2XX *Direct* Drivers (USB Drivers + DLL S/W Interface)

- Windows 10 32,64-bit
- Windows 8/8.1 32,64-bit
- Windows 7 32,64-bit
- Windows Vista and Vista 64-bit
- Windows XP and XP 64-bit
- Windows 98, 98SE, ME, 2000, Server 2003, XP, Server 2008 and server 2012 R2
- Windows XP Embedded
- Windows CE 4.2, 5.0 and 6.0
- Linux 2.4 and greater
- Android(J2xx)

The drivers listed above are all available to download for free from FTDI website (www.ftdichip.com). Various 3rd party drivers are also available for other operating systems - see FTDI website (www.ftdichip.com) for details.

For driver installation, please refer to <http://www.ftdichip.com/Documents/InstallGuides.htm>

1.2 Part Numbers

Part Number	Package
FT232RQ-xxxx	32 Pin QFN
FT232RL-xxxx	28 Pin SSOP

Note: Packing codes for xxxx is:

- Reel: Taped and Reel, (SSOP is 2,000pcs per reel, QFN is 6,000pcs per reel).
- Tube: Tube packing, 47pcs per tube (SSOP only)
- Tray: Tray packing, 490pcs per tray (QFN only)

For example: FT232RQ-Reel is 6,000pcs taped and reel packing

1.3 USB Compliant

The FT232R is fully compliant with the USB 2.0 specification and has been given the USB-IF Test-ID (TID) 40680004 (Rev B) and 40770018 (Rev C).



2 FT232R Block Diagram

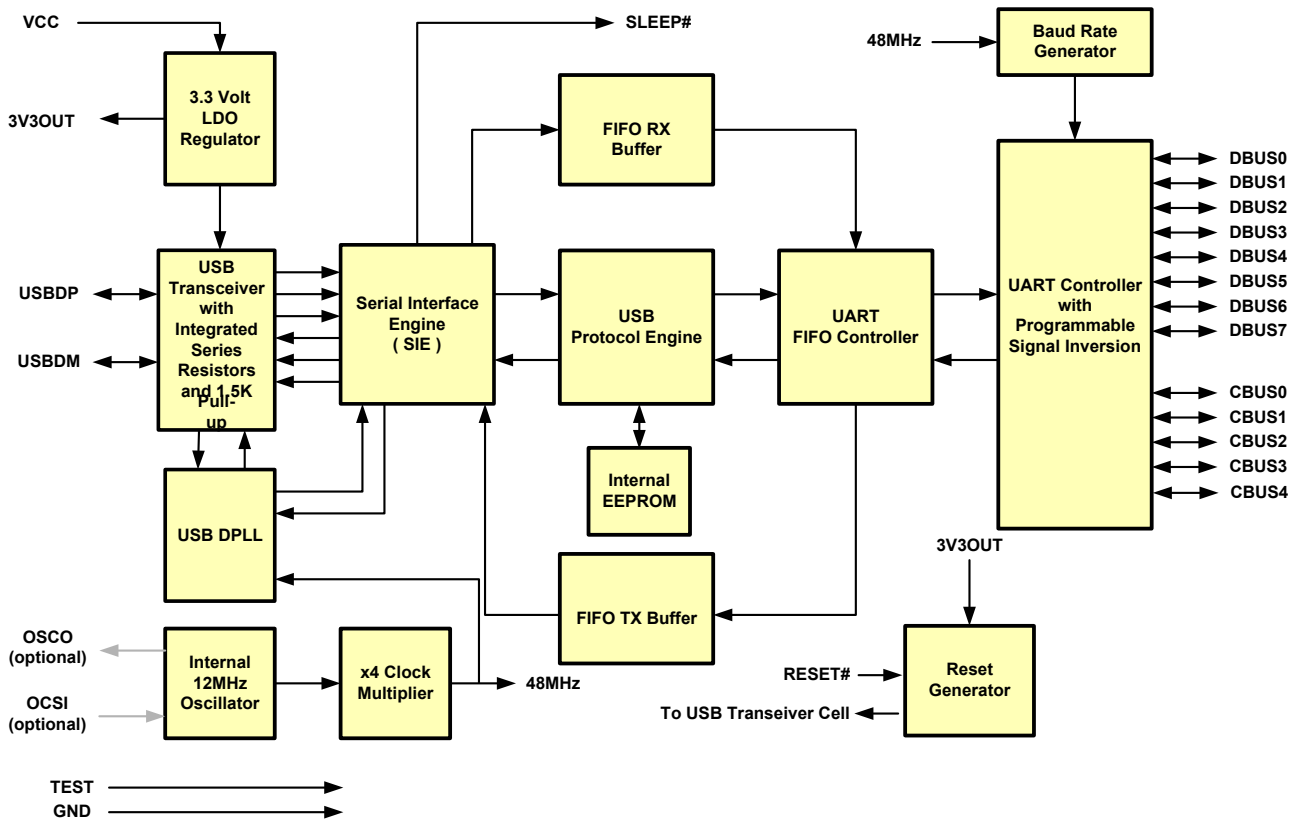


Figure 2.1 FT232R Block Diagram

For a description of each function please refer to Section 4.

Table of Contents

1	Typical Applications.....	2
1.1	Driver Support	2
1.2	Part Numbers.....	3
1.3	USB Compliant	3
2	FT232R Block Diagram	4
3	Device Pin Out and Signal Description.....	7
3.1	28-LD SSOP Package.....	7
3.2	SSOP Package Pin Out Description.....	7
3.3	QFN-32 Package	9
3.4	QFN-32 Package Signal Description	9
3.5	CBUS Signal Options	11
4	Function Description	12
4.1	Key Features.....	12
4.2	Functional Block Descriptions	13
5	Devices Characteristics and Ratings	15
5.1	Absolute Maximum Ratings.....	15
5.2	DC Characteristics.....	15
5.3	EEPROM Reliability Characteristics	17
5.4	Internal Clock Characteristics.....	17
5.5	Thermal Characteristics	18
6	USB Power Configurations.....	19
6.1	USB Bus Powered Configuration	19
6.2	Self Powered Configuration	20
6.3	USB Bus Powered with Power Switching Configuration	21
6.4	USB Bus Powered with Selectable External Logic Supply	22
7	Application Examples	24
7.1	USB to RS232 Converter	24
7.2	USB to RS485 Converter	25
7.3	USB to RS422 Converter	26
7.4	USB to MCU UART Interface	27

7.5	LED Interface	28
7.6	Using the External Oscillator	29
8	Internal EEPROM Configuration	30
9	Package Parameters	31
9.1	SSOP-28 Package Dimensions	31
9.2	QFN-32 Package Dimensions	32
9.3	Solder Reflow Profile	33
10	Alternative Parts	34
11	Contact Information	35
Appendix A – References		36
Document References		36
Acronyms and Abbreviations.....		36
Appendix B – List of Figures and Tables		37
List of Figures		37
List of Tables.....		37
Appendix C – Revision History		39

3 Device Pin Out and Signal Description

3.1 28-LD SSOP Package

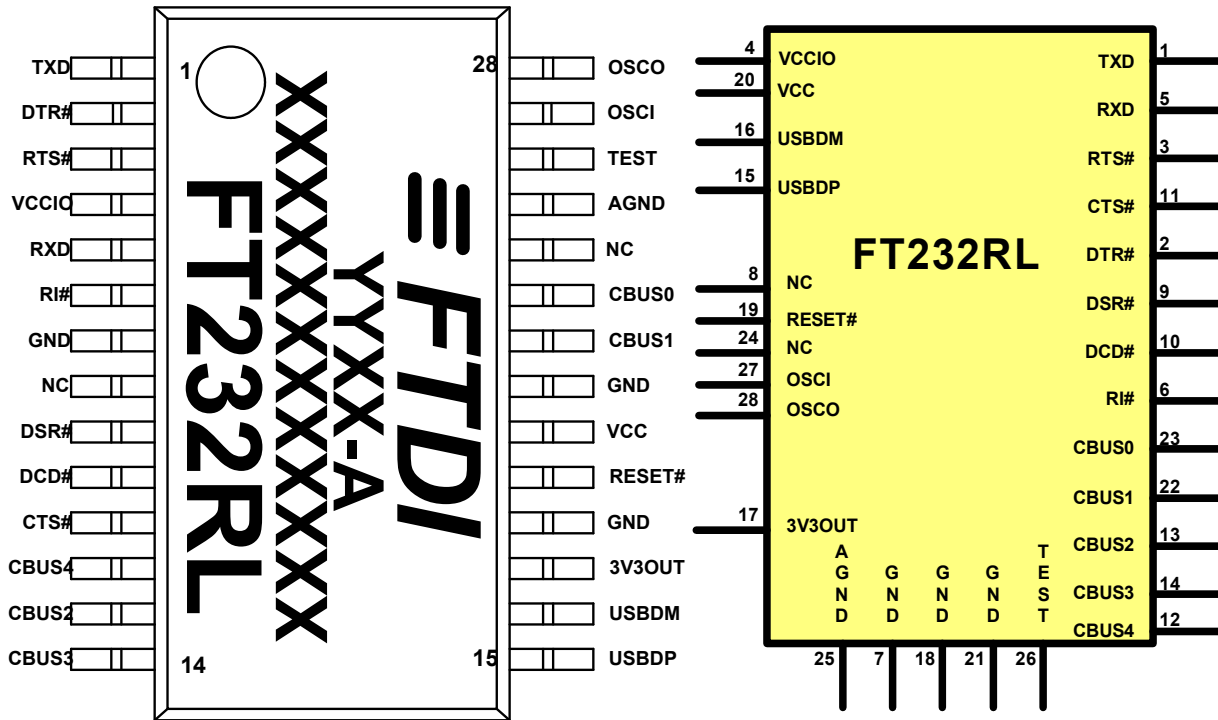


Figure 3.1 SSOP Package Pin Out and Schematic Symbol

3.2 SSOP Package Pin Out Description

Note: The convention used throughout this document for active low signals is the signal name followed by #

Pin No.	Name	Type	Description
15	USBDP	I/O	USB Data Signal Plus, incorporating internal series resistor and 1.5kΩ pull up resistor to 3.3V.
16	USBDM	I/O	USB Data Signal Minus, incorporating internal series resistor.

Table 3.1 USB Interface Group

Pin No.	Name	Type	Description
4	VCCIO	PWR	+1.8V to +5.25V supply to the UART Interface and CBUS group pins (1...3, 5, 6, 9...14, 22, 23). In USB bus powered designs connect this pin to 3V3OUT pin to drive out at +3.3V levels, or connect to VCC to drive out at 5V CMOS level. This pin can also be supplied with an external +1.8V to +2.8V supply in order to drive outputs at lower levels. It should be noted that in this case this supply should originate from the same source as the supply to VCC. This means that in bus powered designs a regulator which is supplied by the +5V on the USB bus should be used.
7, 18, 21	GND	PWR	Device ground supply pins
17	3V3OUT	Output	+3.3V output from integrated LDO regulator. This pin should be decoupled to ground using a 100nF capacitor. The main use of this pin is to provide the internal +3.3V supply to the USB transceiver cell and the internal 1.5kΩ pull up resistor on USBDM. Up to 50mA can be drawn from

Pin No.	Name	Type	Description
			this pin to power external logic if required. This pin can also be used to supply the VCCIO pin.
20	VCC	PWR	+3.3V to +5.25V supply to the device core. (see Note 1)
25	AGND	PWR	Device analogue ground supply for internal clock multiplier

Table 3.2 Power and Ground Group

Pin No.	Name	Type	Description
8, 24	NC	NC	No internal connection
19	RESET#	Input	Active low reset pin. This can be used by an external device to reset the FT232R. If not required can be left unconnected, or pulled up to VCC.
26	TEST	Input	Puts the device into IC test mode. Must be tied to GND for normal operation, otherwise the device will appear to fail.
27	OSCI	Input	Input 12MHz Oscillator Cell. Optional – Can be left unconnected for normal operation. (see Note 2)
28	OSCO	Output	Output from 12MHz Oscillator Cell. Optional – Can be left unconnected for normal operation if internal Oscillator is used. (see Note 2)

Table 3.3 Miscellaneous Signal Group

Pin No.	Name	Type	Description
1	TXD	Output	Transmit Asynchronous Data Output.
2	DTR#	Output	Data Terminal Ready Control Output / Handshake Signal.
3	RTS#	Output	Request to Send Control Output / Handshake Signal.
5	RXD	Input	Receiving Asynchronous Data Input.
6	RI#	Input	Ring Indicator Control Input. When remote wake up is enabled in the internal EEPROM taking RI# low (20ms active low pulse) can be used to resume the PC USB host controller from suspend.
9	DSR#	Input	Data Set Ready Control Input / Handshake Signal.
10	DCD#	Input	Data Carrier Detect Control Input.
11	CTS#	Input	Clear To Send Control Input / Handshake Signal.
12	CBUS4	I/O	Configurable CBUS output only Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is SLEEP#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
13	CBUS2	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is TXDEN. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
14	CBUS3	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is PWREN#. See CBUS Signal Options, Table 3.9. PWREN# should be used with a 10kΩ resistor pull up.
22	CBUS1	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is RXLED#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
23	CBUS0	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is TXLED#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.

Table 3.4 UART Interface and CUSB Group (see note 3)
Notes:

1. The minimum operating voltage VCC must be +4.0V (could use VBUS=+5V) when using the internal clock generator. Operation at +3.3V is possible using an external crystal oscillator.
2. For details on how to use an external crystal, ceramic resonator, or oscillator with the FT232R, please refer Section 7.6
3. When used in Input Mode, the input pins are pulled to VCCIO via internal 200kΩ resistors. These pins can be programmed to gently pull low during USB suspend (PWREN# = "1") by setting an option in the internal EEPROM.

3.3 QFN-32 Package

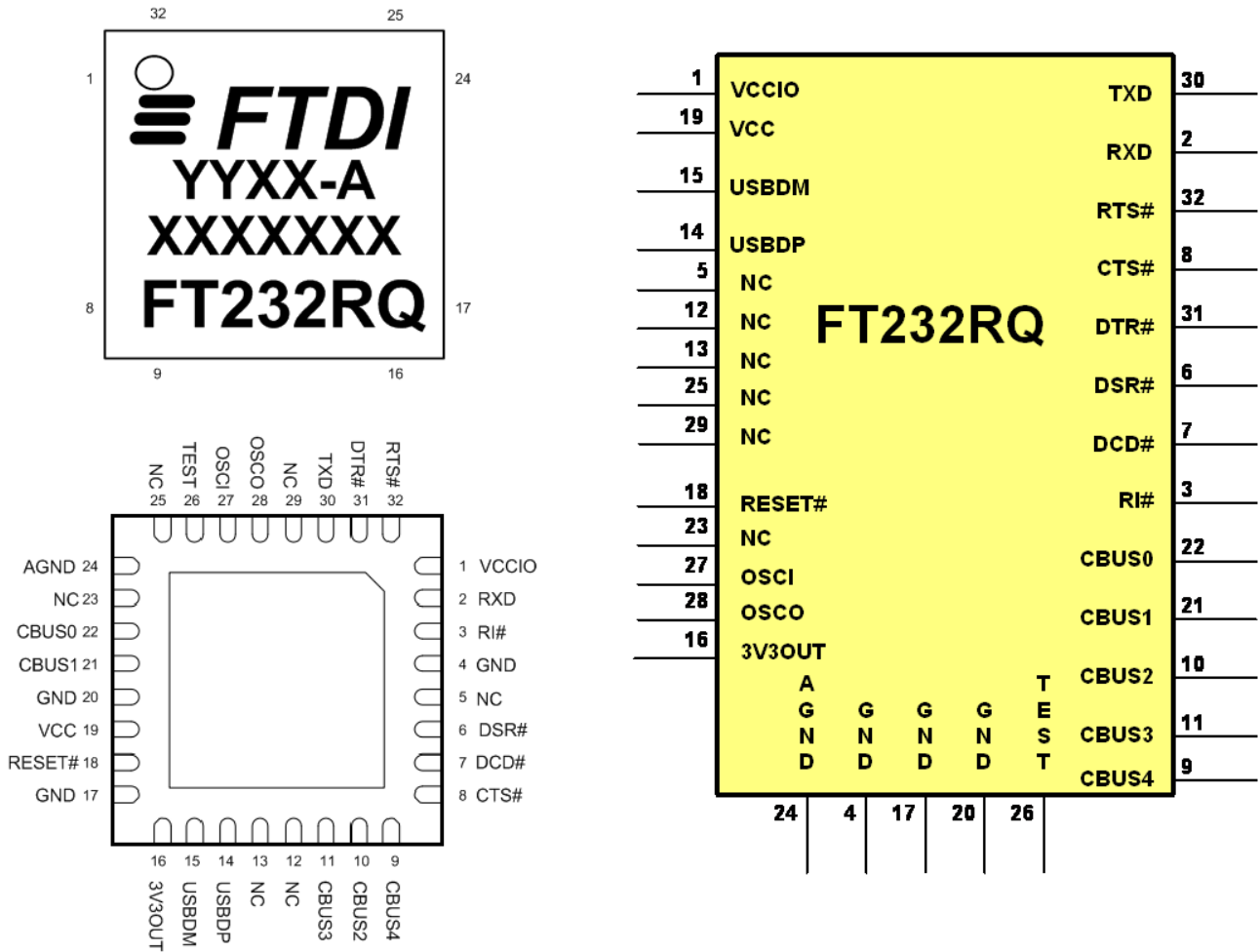


Figure 3.2 QFN-32 Package Pin Out and schematic symbol

3.4 QFN-32 Package Signal Description

Pin No.	Name	Type	Description
14	USBDP	I/O	USB Data Signal Plus, incorporating internal series resistor and 1.5kΩ pull up resistor to +3.3V.
15	USBDM	I/O	USB Data Signal Minus, incorporating internal series resistor.

Table 3.5 USB Interface Group

Pin No.	Name	Type	Description
1	VCCIO	PWR	+1.8V to +5.25V supply for the UART Interface and CBUS group pins (2,3,6,7,8,9,10,11,21,22,30,31,32). In USB bus powered designs connect this pin to 3V3OUT to drive out at +3.3V levels, or connect to VCC to drive out at +5V CMOS level. This pin can also be supplied with an external +1.8V to +2.8V supply in order to drive out at lower levels. It should be noted that in this case this supply should originate from the same source as the supply to VCC. This means that in bus powered designs a regulator which is supplied by the +5V on the USB bus should be used.
4, 17, 20	GND	PWR	Device ground supply pins.
16	3V3OUT	Output	+3.3V output from integrated LDO regulator. This pin should be decoupled

Pin No.	Name	Type	Description
			to ground using a 100nF capacitor. The purpose of this output is to provide the internal +3.3V supply to the USB transceiver cell and the internal 1.5kΩ pull up resistor on USBDP. Up to 50mA can be drawn from this pin to power external logic if required. This pin can also be used to supply the VCCIO pin.
19	VCC	PWR	+3.3V to +5.25V supply to the device core. (See Note 1).
24	AGND	PWR	Device analogue ground supply for internal clock multiplier.

Table 3.6 Power and Ground Group

Pin No.	Name	Type	Description
5, 12, 13, 23, 25, 29	NC	NC	No internal connection. Do not connect.
18	RESET#	Input	Active low reset. Can be used by an external device to reset the FT232R. If not required can be left unconnected, or pulled up to VCC.
26	TEST	Input	Puts the device into IC test mode. Must be tied to GND for normal operation, otherwise the device will appear to fail.
27	OSCI	Input	Input 12MHz Oscillator Cell. Optional – Can be left unconnected for normal operation. (See Note 2).
28	OSCO	Output	Output from 12MHZ Oscillator Cell. Optional – Can be left unconnected for normal operation if internal Oscillator is used. (See Note 2).

Table 3.7 Miscellaneous Signal Group

Pin No.	Name	Type	Description
30	TXD	Output	Transmit Asynchronous Data Output.
31	DTR#	Output	Data Terminal Ready Control Output / Handshake Signal.
32	RTS#	Output	Request to Send Control Output / Handshake Signal.
2	RXD	Input	Receiving Asynchronous Data Input.
3	RI#	Input	Ring Indicator Control Input. When remote wake up is enabled in the internal EEPROM taking RI# low (20ms active low pulse) can be used to resume the PC USB host controller from suspend.
6	DSR#	Input	Data Set Ready Control Input / Handshake Signal.
7	DCD#	Input	Data Carrier Detect Control Input.
8	CTS#	Input	Clear To Send Control Input / Handshake Signal.
9	CBUS4	I/O	Configurable CBUS output only Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is SLEEP#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
10	CBUS2	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is TXDEN. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
11	CBUS3	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is PWREN#. See CBUS Signal Options, Table 3.9. PWREN# should be used with a 10kΩ resistor pull up.
21	CBUS1	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is RXLED#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.
22	CBUS0	I/O	Configurable CBUS I/O Pin. Function of this pin is configured in the device internal EEPROM. Factory default configuration is TXLED#. See CBUS Signal Options, Table 3.9.

Table 3.8 UART Interface and CBUS Group (see note 3)
Notes:

1. The minimum operating voltage VCC must be +4.0V (could use VBUS=+5V) when using the internal clock generator. Operation at +3.3V is possible using an external crystal oscillator.
2. For details on how to use an external crystal, ceramic resonator, or oscillator with the FT232R, please refer to Section 7.6.

- When used in Input Mode, the input pins are pulled to VCCIO via internal 200kΩ resistors. These pins can be programmed to gently pull low during USB suspend (PWREN# = "1") by setting an option in the internal EEPROM.

3.5 CBUS Signal Options

The following options can be configured on the CBUS I/O pins. CBUS signal options are common to both package versions of the FT232R. These options can be configured in the internal EEPROM using the software utility [FT_PROG](#), which can be downloaded from the FTDI Utilities (www.ftdichip.com). The default configuration is described in Section 8.

CBUS Signal Option	Available On CBUS Pin	Description
TXDEN	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	Enable transmit data for RS485
PWREN#	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	Output is low after the device has been configured by USB, then high during USB suspending mode. This output can be used to control power to external logic P-Channel logic level MOSFET switch. Enable the interface pull-down option when using the PWREN# in this way.*
TXLED#	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	Transmit data LED drive: Data from USB Host to FT232R. Pulses low when transmitting data via USB. See Section 7.5 for more details.
RXLED#	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	Receive data LED drive: Data from FT232R to USB Host. Pulses low when receiving data via USB. See Section 7.5 for more details.
TX&RXLED#	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	LED drive – pulses low when transmitting or receiving data via USB. See Section 7.5 for more details.
SLEEP#	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	Goes low during USB suspend mode. Typically used to power down an external TTL to RS232 level converter IC in USB to RS232 converter designs.
CLK48	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	48MHz ±0.7% Clock output. **
CLK24	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	24 MHz Clock output. **
CLK12	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	12 MHz Clock output. **
CLK6	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3, CBUS4	6 MHz ±0.7% Clock output. **
CBitBangI/O	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3	CBUS bit bang mode option. Allows up to 4 of the CBUS pins to be used as general purpose I/O. Configured individually for CBUS0, CBUS1, CBUS2 and CBUS3 in the internal EEPROM. A separate application note, AN232R-01, available from FTDI website (www.ftdichip.com) describes in more detail how to use CBUS bit bang mode.
BitBangWRn	CBUS0, CBUS1	Synchronous and asynchronous bit bang mode WR# strobe output.
BitBangRDn	CBUS0, CBUS1, CBUS2, CBUS3	Synchronous and asynchronous bit bang mode RD# strobe output.

Table 3.9 CBUS Configuration Control

* PWREN# must be used with a 10kΩ resistor pull up.

**When in USB suspend mode the outputs clocks are also suspended.

4 Function Description

The FT232R is a USB to serial UART interface device which simplifies USB to serial designs and reduces external component count by fully integrating an external EEPROM, USB termination resistors and an integrated clock circuit which requires no external crystal, into the device. It has been designed to operate efficiently with a USB host controller by using as little as possible of the total USB bandwidth available.

4.1 Key Features

Functional Integration. Fully integrated EEPROM, USB termination resistors, clock generation, AVCC filtering, POR and LDO regulator.

Configurable CBUS I/O Pin Options. The fully integrated EEPROM allows configuration of the Control Bus (CBUS) functionality, signal inversion and drive strength selection. There are 5 configurable CBUS I/O pins. These configurable options are -

1. **TXDEN** - transmit enable for RS485 designs.
2. **PWREN#** - Power control for high power, bus powered designs.
3. **TXLED#** - for pulsing an LED upon transmission of data.
4. **RXLED#** - for pulsing an LED upon receiving data.
5. **TX&RXLED#** - which will pulse an LED upon transmission OR reception of data.
6. **SLEEP#** - indicates that the device going into USB suspend mode.
7. **CLK48 / CLK24 / CLK12 / CLK6** - 48MHz, 24MHz, 12MHz, and 6MHz clock output signal options.
8. **BitBangWRn / BitBangRDn** - Synchronous and asynchronous bit bang mode WR# / RD# strobe outputs

The CBUS pins can also be individually configured as GPIO pins, similar to asynchronous bit bang mode. It is possible to use this mode while the UART interface is being used, thus providing up to 4 general purpose I/O pins which are available during normal operation. An application note, AN232R-01, available from FTDI website (www.ftdichip.com) describes this feature.

The CBUS lines can be configured with any one of these output options by setting bits in the internal EEPROM. The device is supplied with the most commonly used pin definitions pre-programmed - see Section 8 for details.

Asynchronous Bit Bang Mode with RD# and WR# Strokes. The FT232R supports FTDI's previous chip generation bit-bang mode. In bit-bang mode, the eight UART lines can be switched from the regular interface mode to an 8-bit general purpose I/O port. Data packets can be sent to the device and they will be sequentially sent to the interface at a rate controlled by an internal timer (equivalent to the baud rate pre-scaler). With the FT232R device this mode has been enhanced by outputting the internal RD# and WR# strobes signals which can be used to allow external logic to be clocked by accesses to the bit-bang I/O bus. This option will be described more fully in a separate application note available from FTDI website (www.ftdichip.com).

Synchronous Bit Bang Mode. The FT232R supports synchronous bit bang mode. This mode differs from asynchronous bit bang mode in that the interface pins are only read when the device is written to. This makes it easier for the controlling program to measure the response to an output stimulus as the data returned is synchronous to the output data. An application note, AN232R-01, available from FTDI website (www.ftdichip.com) describes this feature.

FTDICHIP-ID™. The FT232R also includes the new FTDICHIP-ID™ security dongle feature. This FTDICHIP-ID™ feature allows a unique number to be burnt into each device during manufacture. This number cannot be reprogrammed. This number is only readable over USB and forms a basis of a security dongle which can be used to protect any customer application software being copied. This allows the possibility of using the FT232R in a dongle for software licensing. Further to this, a renewable license scheme can be implemented based on the FTDICHIP-ID™ number when encrypted with other information. This encrypted number can be stored in the user area of the FT232R internal EEPROM, and can be decrypted, then compared with the protected FTDICHIP-ID™ to verify that a license is valid. Web based

applications can be used to maintain product licensing this way. An application note, AN232R-02, available from FTDI website (www.ftdichip.com) describes this feature.

The FT232R is capable of operating at a voltage supply between +3.3V and +5V with a nominal operational mode current of 15mA and a nominal USB suspend mode current of 70µA. This allows greater margin for peripheral designs to meet the USB suspend mode current limit of 2.5mA. An integrated level converter within the UART interface allows the FT232R to interface to UART logic running at +1.8V, 2.5V, +3.3V or +5V.

4.2 Functional Block Descriptions

The following paragraphs detail each function within the FT232R. Please refer to the block diagram shown in **Figure 2.1**.

Internal EEPROM. The internal EEPROM in the FT232R is used to store USB Vendor ID (VID), Product ID (PID), device serial number, product description string and various other USB configuration descriptors. The internal EEPROM is also used to configure the CBUS pin functions. The FT232R is supplied with the internal EEPROM pre-programmed as described in Section 8. A user area of the internal EEPROM is available to system designers to allow storing additional data. The internal EEPROM descriptors can be programmed in circuit, over USB without any additional voltage requirement. It can be programmed using the FTDI utility software called [FT_PROG](#), which can be downloaded from FTDI Utilities on the FTDI website (www.ftdichip.com).

+3.3V LDO Regulator. The +3.3V LDO regulator generates the +3.3V reference voltage for driving the USB transceiver cell output buffers. It requires an external decoupling capacitor to be attached to the 3V3OUT regulator output pin. It also provides +3.3V power to the 1.5kΩ internal pull up resistor on USBDP. The main function of the LDO is to power the USB Transceiver and the Reset Generator Cells rather than to power external logic. However, it can be used to supply external circuitry requiring a +3.3V nominal supply with a maximum current of 50mA.

USB Transceiver. The USB Transceiver Cell provides the USB 1.1 / USB 2.0 full-speed physical interface to the USB cable. The output drivers provide +3.3V level slew rate control signalling, whilst a differential input receiver and two single ended input receivers provide USB data in, Single-Ended-0 (SE0) and USB reset detection conditions respectfully. This function also incorporates the internal USB series termination resistors on the USB data lines and a 1.5kΩ pull up resistor on USBDP.

USB DPLL. The USB DPLL cell locks on to the incoming NRZI USB data and generates recovered clock and data signals for the Serial Interface Engine (SIE) block.

Internal 12MHz Oscillator - The Internal 12MHz Oscillator cell generates a 12MHz reference clock. This provides an input to the x4 Clock Multiplier function. The 12MHz Oscillator is also used as the reference clock for the SIE, USB Protocol Engine and UART FIFO controller blocks.

Clock Multiplier / Divider. The Clock Multiplier / Divider takes the 12MHz input from the Internal Oscillator function and generates the 48MHz, 24MHz, 12MHz and 6MHz reference clock signals. The 48Mz clock reference is used by the USB DPLL and the Baud Rate Generator blocks.

Serial Interface Engine (SIE). The Serial Interface Engine (SIE) block performs the parallel to serial and serial to parallel conversion of the USB data. In accordance with the USB 2.0 specification, it performs bit stuffing/un-stuffing and CRC5/CRC16 generation. It also checks the CRC on the USB data stream.

USB Protocol Engine. The USB Protocol Engine manages the data stream from the device USB control endpoint. It handles the low level USB protocol requests generated by the USB host controller and the commands for controlling the functional parameters of the UART in accordance with the USB 2.0 specification chapter 9.

FIFO RX Buffer (128 bytes). Data sent from the USB host controller to the UART via the USB data OUT endpoint is stored in the FIFO RX (receive) buffer. Data is removed from the buffer to the UART transmit register under control of the UART FIFO controller. (Rx relative to the USB interface).

FIFO TX Buffer (256 bytes). Data from the UART receive register is stored in the TX buffer. The USB host controller removes data from the FIFO TX Buffer by sending a USB request for data from the device data IN endpoint. (Tx relative to the USB interface).

UART FIFO Controller. The UART FIFO controller handles the transfer of data between the FIFO RX and TX buffers and the UART transmit and receive registers.

UART Controller with Programmable Signal Inversion and High Drive. Together with the UART FIFO Controller the UART Controller handles the transfer of data between the FIFO RX and FIFO TX buffers and the UART transmit and receive registers. It performs asynchronous 7 or 8 bit parallel to serial and serial to parallel conversion of the data on the RS232 (or RS422 or RS485) interface.

Control signals supported by UART mode include RTS, CTS, DSR, DTR, DCD and RI. The UART Controller also provides a transmitter enable control signal pin option (TXDEN) to assist with interfacing to RS485 transceivers. RTS/CTS, DSR/DTR and XON / XOFF handshaking options are also supported. Handshaking is handled in hardware to ensure fast response times. The UART interface also supports the RS232 BREAK setting and detection conditions.

Additionally, the UART signals can each be individually inverted and have a configurable high drive strength capability. Both these features are configurable in the EEPROM.

Baud Rate Generator - The Baud Rate Generator provides a 16x clock input to the UART Controller from the 48MHz reference clock. It consists of a 14 bit pre-scaler and 3 register bits which provide fine tuning of the baud rate (used to divide by a number plus a fraction or "sub-integer"). This determines the baud rate of the UART, which is programmable from 183 baud to 3 Mbaud.

The FT232R supports all standard baud rates and non-standard baud rates from 183 Baud up to 3 Mbaud. Achievable non-standard baud rates are calculated as follows -

$$\text{Baud Rate} = 3000000 / (n + x)$$

Where 'n' can be any integer between 2 and 16,384 (= 2^{14}) and 'x' can be a sub-integer of the value 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, or 0.875. When $n = 1$, $x = 0$, i.e. baud rate divisors with values between 1 and 2 are not possible.

This gives achievable baud rates in the range 183.1 baud to 3,000,000 baud. When a non-standard baud rate is required simply pass the required baud rate value to the driver as normal, and the FTDI driver will calculate the required divisor, and set the baud rate. See FTDI application note AN232B-05 on the FTDI website (www.ftdichip.com) for more details.

RESET Generator - The integrated Reset Generator Cell provides a reliable power-on reset to the device internal circuitry at power up. The RESET# input pin allows an external device to reset the FT232R. RESET# can be tied to VCC or left unconnected if not being used.

5 Devices Characteristics and Ratings

5.1 Absolute Maximum Ratings

The absolute maximum ratings for the FT232R devices are as follows. These are in accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134). Exceeding these may cause permanent damage to the device.

Parameter	Value	Units
Storage Temperature	-65 to 150	°C
Floor Life (Out of Bag) At Factory Ambient (30°C / 60% Relative Humidity)	168 (IPC/JEDEC J-STD-033A MSL Level 3 Compliant)*	Hours
Ambient Temperature (Power Applied)	-40 to 85	°C
MTTF FT232RL	11162037	hours
MTTF FT232RQ	4464815	hours
VCC Supply Voltage	-0.5 to +6.00	V
DC Input Voltage – USBDP and USBDM	-0.5 to +3.8	V
DC Input Voltage – High Impedance Bidirectional	-0.5 to + (VCC +0.5)	V
DC Input Voltage – All Other Inputs	-0.5 to + (VCC +0.5)	V
DC Output Current – Outputs	24	mA
DC Output Current – Low Impedance Bidirectional	24	mA
Power Dissipation (VCC = 5.25V)	500	mW

Table 5.1 Absolute Maximum Ratings

* If devices are stored out of the packaging beyond this time limit the devices should be baked before use. The devices should be ramped up to a temperature of +125°C and baked for up to 17 hours.

5.2 DC Characteristics

DC Characteristics (Ambient Temperature = -40°C to +85°C)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
VCC1	VCC Operating Supply Voltage	4.0	---	5.25	V	Using Internal Oscillator
VCC1	VCC Operating Supply Voltage	3.3	---	5.25	V	Using External Crystal
VCC2	VCCIO Operating Supply Voltage	1.8	---	5.25	V	
Icc1	Operating Supply Current	---	15	---	mA	Normal Operation
Icc2	Operating Supply Current	50	70	100	µA	USB Suspend
3V3	3.3v regulator output	3.0	3.3	3.6	V	

Table 5.2 Operating Voltage and Current

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	3.2	4.1	4.9	V	I source = 2mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.6	V	I sink = 2mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.3 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +5.0V, Standard Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	2.2	2.7	3.2	V	I source = 1mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.5	V	I sink = 2mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.4 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +3.3V, Standard Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	2.1	2.6	2.8	V	I source = 1mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.5	V	I sink = 2mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.5 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +2.8V, Standard Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	1.32	1.62	1.8	V	I source = 0.2mA
Vol	Output Voltage Low	0.06	0.1	0.18	V	I sink = 0.5mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.6 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +1.8V, Standard Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	3.2	4.1	4.9	V	I source = 6mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.6	V	I sink = 6mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.7 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +5.0V, High Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	2.2	2.8	3.2	V	I source = 3mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.6	V	I sink = 8mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.8 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +3.3V, High Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	2.1	2.6	2.8	V	I source = 3mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.6	V	I sink = 8mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.9 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +2.8V, High Drive Level)

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	1.35	1.67	1.8	V	I source = 0.4mA
Vol	Output Voltage Low	0.12	0.18	0.35	V	I sink = 3mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	**
VHys	Input Switching Hysteresis	20	25	30	mV	**

Table 5.10 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +1.8V, High Drive Level)

** Only input pins have an internal 200KΩ pull-up resistor to VCCIO

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Vin	Input Switching Threshold	1.3	1.6	1.9	V	
VHys	Input Switching Hysteresis	50	55	60	mV	

Table 5.11 RESET# and TEST Pin Characteristics

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
UVoh	I/O Pins Static Output (High)	2.8		3.6	V	RI = 1.5kΩ to 3V3OUT (D+) RI = 15kΩ to GND (D-)
UVol	I/O Pins Static Output (Low)	0		0.3	V	RI = 1.5kΩ to 3V3OUT (D+) RI = 15kΩ to GND (D-)
UVse	Single Ended Rx Threshold	0.8		2.0	V	
UCom	Differential Common Mode	0.8		2.5	V	
UVDif	Differential Input Sensitivity	0.2			V	
UDrvZ	Driver Output Impedance	26	29	44	Ohms	See Note 1

Table 5.12 USB I/O Pin (USBDP, USBDM) Characteristics

5.3 EEPROM Reliability Characteristics

The internal 1024 Bit EEPROM has the following reliability characteristics:

Parameter	Value	Units
Data Retention	10	Years
Write	10,000	Cycles
Read	Unlimited	Cycles

Table 5.13 EEPROM Characteristics

5.4 Internal Clock Characteristics

The internal Clock Oscillator has the following characteristics:

Parameter	Value			Unit
	Minimum	Typical	Maximum	
Frequency of Operation (see Note 1)	11.98	12.00	12.02	MHz
Clock Period	83.19	83.33	83.47	ns
Duty Cycle	45	50	55	%

Table 5.14 Internal Clock Characteristics

Note: Equivalent to +/-1667ppm

Parameter	Description	Minimum	Typical	Maximum	Units	Conditions
Voh	Output Voltage High	2.1	2.8	3.2	V	I source = 3mA
Vol	Output Voltage Low	0.3	0.4	0.6	V	I sink = 8mA
Vin	Input Switching Threshold	1.0	1.2	1.5	V	

Table 5.15 OSCI, OSCO Pin Characteristics – see Note 1

Note: When supplied, the FT232R is configured to use its internal clock oscillator. These characteristics only apply when an external oscillator or crystal is used.

5.5 Thermal Characteristics

The FT232RL package has the following thermal characteristics:

Parameter	Value	Units	Conditions
Theta JA (θ_{JA})	55.82	°C/W	Still air
Theta JC (θ_{JC})	24.04	°C/W	

Table 5.16 FT232RL Thermal Characteristics

The FT232RQ package has the following thermal characteristics:

Parameter	Value	Units	Conditions
Theta JA (θ_{JA})	31.49	°C/W	Still air, center pad soldered to PCB, 9 vias to another plane
Theta JA (θ_{JA})	62.31	°C/W	Still air, center pad unsoldered
Theta JC (θ_{JC})		°C/W	

Table 5.17 FT232RQ Thermal Characteristics

6 USB Power Configurations

The following sections illustrate possible USB power configurations for the FT232R. The illustrations have omitted pin numbers for ease of understanding since the pins differ between the FT232RL and FT232RQ package options.

All USB power configurations illustrated apply to both package options for the FT232R device. Please refer to Section 3 for the package option pin-out and signal descriptions.

6.1 USB Bus Powered Configuration

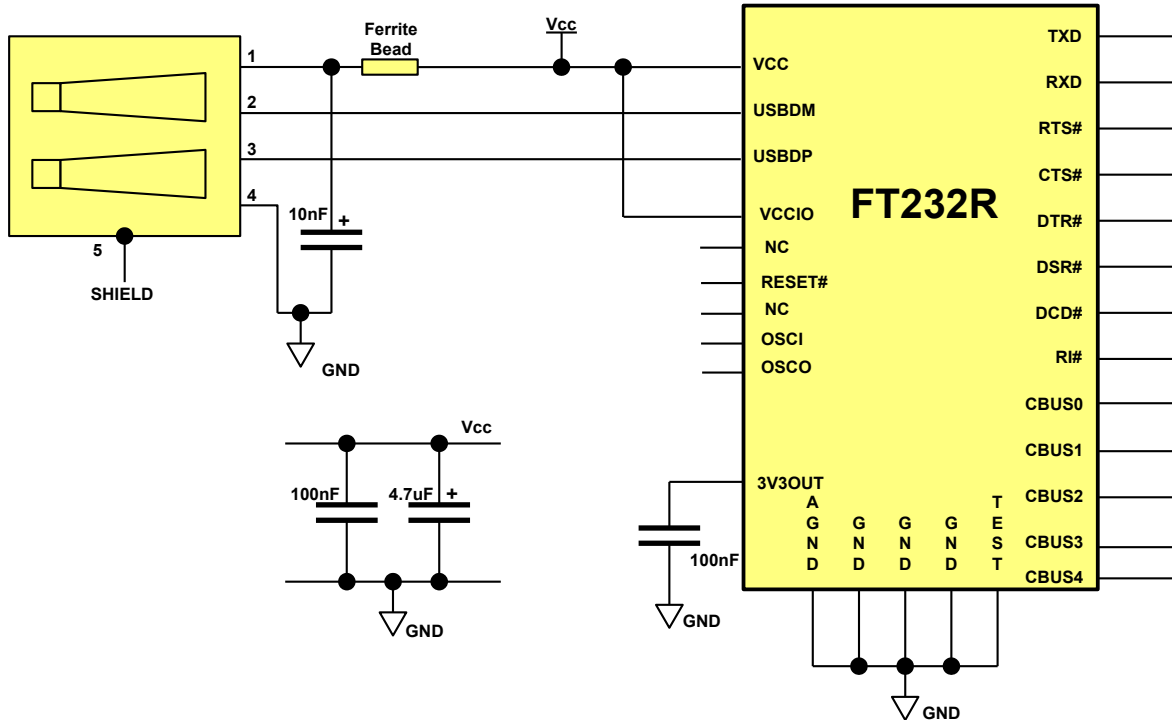


Figure 6.1 Bus Powered Configuration

Figure 6.1 Illustrates the FT232R in a typical USB bus powered design configuration. A USB bus powered device gets its power from the USB bus. Basic rules for USB bus power devices are as follows –

- i) On plug-in to USB, the device should draw no more current than 100mA.
- ii) In USB Suspend mode the device should draw no more than 2.5mA.
- iii) A bus powered high power USB device (one that draws more than 100mA) should use one of the CBUS pins configured as PWREN# and use it to keep the current below 100mA on plug-in and 2.5mA on USB suspend.
- iv) A device that consumes more than 100mA cannot be plugged into a USB bus powered hub.
- v) No device can draw more than 500mA from the USB bus.

The power descriptors in the internal EEPROM of the FT232R should be programmed to match the current drawn by the device.

A ferrite bead is connected in series with the USB power supply to reduce EMI noise from the FT232R and associated circuitry being radiated down the USB cable to the USB host. The value of the Ferrite Bead depends on the total current drawn by the application. A suitable range of Ferrite Beads is available from Steward (www.steward.com), for example Steward Part # MI0805K400R-10.

Note: If using PWREN# (available using the CBUS) the pin should be pulled to VCCIO using a 10kΩ resistor.

6.2 Self Powered Configuration

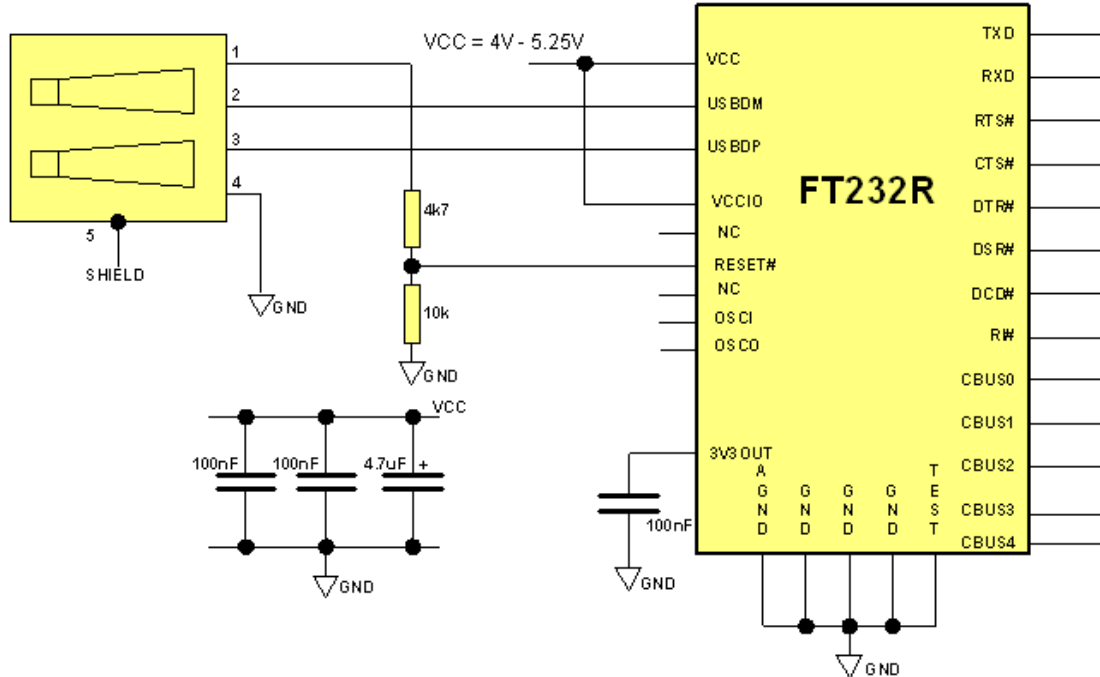


Figure 6.2 Self-Powered Configuration

Figure 6.2 illustrates the FT232R in a typical USB self-powered configuration. A USB self-powered device gets its power from its own power supply, VCC, and does not draw current from the USB bus. The basic rules for USB self-powered devices are as follows –

- i) A self-powered device should not force current down the USB bus when the USB host or hub controller is powered down.
- ii) A self-powered device can use as much current as it needs during normal operation and USB suspend as it has its own power supply.
- iii) A self-powered device can be used with any USB host, a bus powered USB hub or a self-powered USB hub.

The power descriptor in the internal EEPROM of the FT232R should be programmed to a value of zero (self-powered).

In order to comply with the first requirement above, the USB bus power (pin 1) is used to control the RESET# pin of the FT232R device. When the USB host or hub is powered up an internal 1.5kΩ resistor on USBDP is pulled up to +3.3V (generated using the 4K7 and 10k resistor network), thus identifying the device as a full speed device to the USB host or hub. When the USB host or hub is powered off, RESET# will be low and the FT232R is held in reset. Since RESET# is low, the internal 1.5kΩ resistor is not pulled up to any power supply (hub or host is powered down), so no current flows down USBDP via the 1.5kΩ pull-up resistor. Failure to do this may cause some USB host or hub controllers to power up erratically.

Figure 6.2 illustrates a self-powered design which has a +4V to +5.25V supply.

Note:

1. When the FT232R is in reset, the UART interface I/O pins are tri-stated. Input pins have internal 200kΩ pull-up resistors to VCCIO, so they will gently pull high unless driven by some external logic.
2. When using internal FT232R oscillator the VCC supply voltage range must be +4.0V to 5.25V.
3. When using external oscillator the VCC supply voltage range must be +3.3V to 5.25V
Any design which interfaces to +3.3 V or +1.8V would be having a +3.3V or +1.8V supply to VCCIO.

6.3 USB Bus Powered with Power Switching Configuration

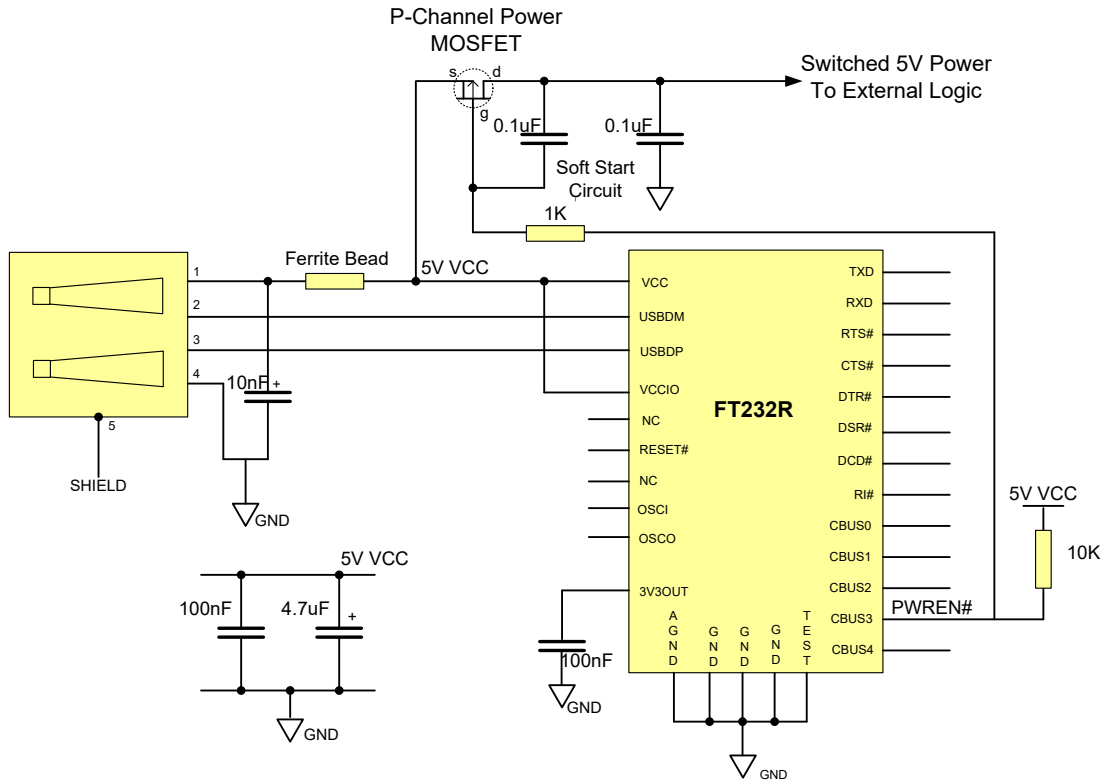


Figure 6.3 Bus Powered with Power Switching Configuration

A requirement of USB bus powered applications, is when in USB suspend mode, the application draws a total current of less than 2.5mA. This requirement includes external logic. Some external logic has the ability to power itself down into a low current state by monitoring the PWREN# signal. For external logic that cannot power itself down in this way, the FT232R provides a simple but effective method of turning off power during the USB suspend mode.

Figure 6.3 shows an example of using a discrete P-Channel MOSFET to control the power to external logic. A suitable device to do this is an International Rectifier (www.irf.com) IRLML6402, or equivalent. It is recommended that a “soft start” circuit consisting of a 1kΩ series resistor and a 0.1μF capacitor is used to limit the current surge when the MOSFET turns on. Without the soft start circuit it is possible that the transient power surge, caused when the MOSFET switches on, will reset the FT232R or the USB host/hub controller. The soft start circuit example shown in Figure 6.3 powers up with a slew rate of approximately 12.5V/ms. Thus supply voltage to external logic transitions from GND to +5V in approximately 400 microseconds.

As an alternative to the MOSFET, a dedicated power switch IC with inbuilt “soft-start” can be used. A suitable power switch IC for such an application is the Micrel (www.micrel.com) MIC2025-2BM or equivalent.

With power switching controlled designs the following should be noted:

- i) The external logic to which the power is being switched should have its own reset circuitry to automatically reset the logic when power is re-applied when moving out of suspend mode.
- ii) Set the Pull-down on Suspend option in the internal FT232R EEPROM.
- iii) One of the CBUS Pins should be configured as PWREN# in the internal FT232R EEPROM, and used to switch the power supply to the external circuitry. This should be pulled high through a 10 kΩ resistor.

- iv) For USB high-power bus powered applications (one that consumes greater than 100mA, and up to 500mA of current from the USB bus), the power consumption of the application must be set in the Max Power field in the internal FT232R EEPROM. A high-power bus powered application uses the descriptor in the internal FT232R EEPROM to inform the system of its power requirements.
- v) PWREN# gets its VCC from VCCIO. For designs using 3V3 logic, ensure VCCIO is not powered down using the external logic. In this case use the +3V3OUT.

6.4 USB Bus Powered with Selectable External Logic Supply

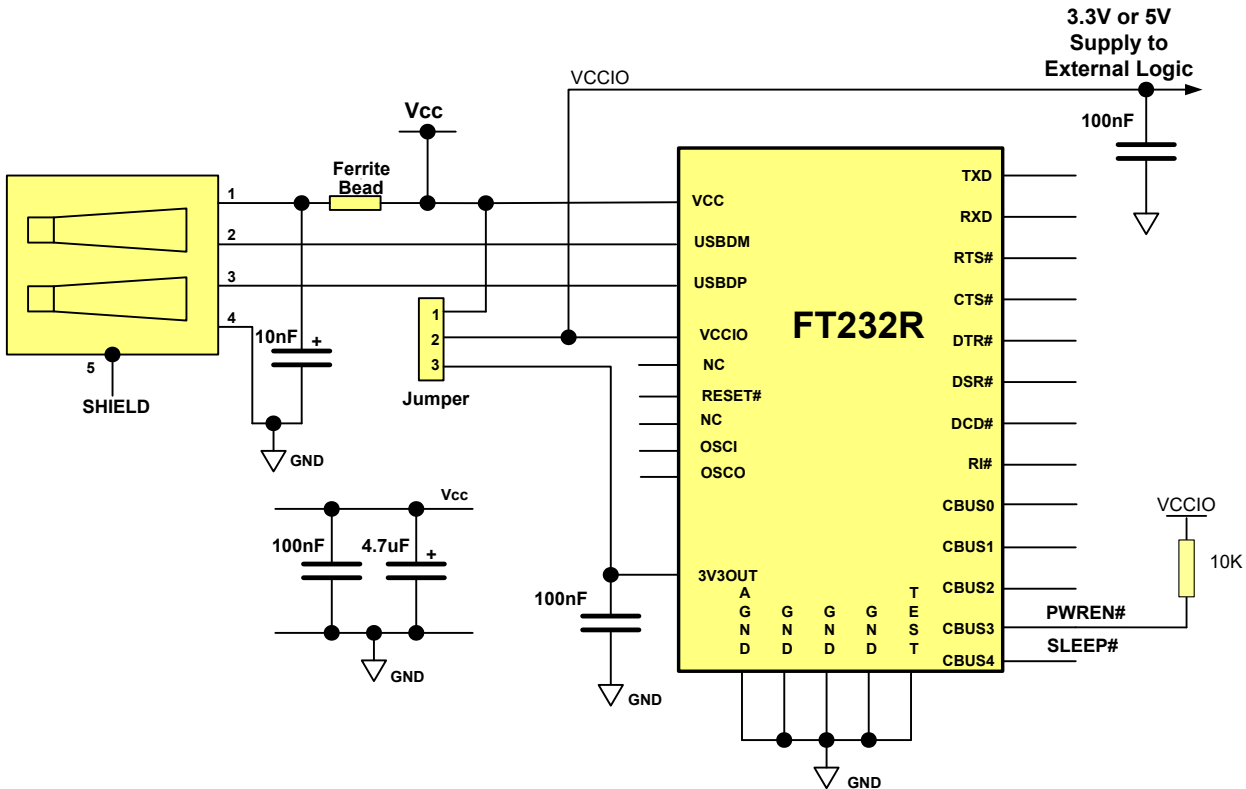


Figure 6.4 USB Bus Powered with +3.3V or +5V External Logic Power Supply

Figure 6.4 illustrates a USB bus power application with selectable external logic supply. The external logic can be selected between +3.3V and +5V using the jumper switch. This jumper is used to allow the FT232R to be interfaced with a +3.3V or +5V logic devices. The VCCIO pin is either supplied with +5V from the USB bus (jumper pins 1 and 2 connected), or from the +3.3V output from the FT232R 3V3OUT pin (jumper pins 2 and 3 connected). The supply to VCCIO is also used to supply external logic.

With bus powered applications, the following should be noted:

- i) To comply with the 2.5mA current supply limit during USB suspend mode, PWREN# or SLEEP# signals should be used to power down external logic in this mode. If this is not possible, use the configuration shown in Section 6.3.
- ii) The maximum current sourced from the USB bus during normal operation should not exceed 100mA, otherwise a bus powered design with power switching (Section 6.3) should be used.

Another possible configuration could use a discrete low dropout (LDO) regulator which is supplied by the 5V on the USB bus to supply between +1.8V and +2.8V to the VCCIO pin and to the external logic. In this case VCC would be supplied with the +5V from the USB bus and the VCCIO would be supplied from the output of the LDO regulator. This results in the FT232R I/O pins driving out at between +1.8V and +2.8V logic levels.

For a USB bus powered application, it is important to consider the following when selecting the regulator:

- i) The regulator must be capable of sustaining its output voltage with an input voltage of +4.35V. A Low Drop Out (LDO) regulator should be selected.
- ii) The quiescent current of the regulator must be low enough to meet the total current requirement of $\leq 2.5\text{mA}$ during USB suspend mode.

A suitable series of LDO regulators that meets these requirements is the MicroChip/Telecom (www.microchip.com) TC55 series of devices. These devices can supply up to 250mA current and have a quiescent current of under 1 μA .

7 Application Examples

The following sections illustrate possible applications of the FT232R. The illustrations have omitted pin numbers for ease of understanding since the pins differ between the FT232RL and FT232RQ package options.

7.1 USB to RS232 Converter

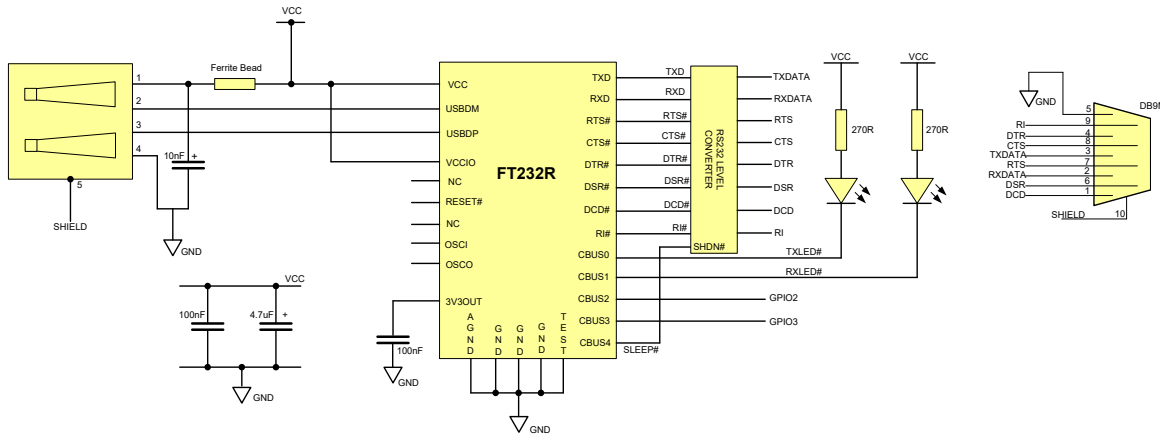


Figure 7.1 Application Example showing USB to RS232 Converter

An example of using the FT232R as a USB to RS232 converter is illustrated in Figure 7.1. In this application, a TTL to RS232 Level Converter IC is used on the serial UART interface of the FT232R to convert the TTL levels of the FT232R to RS232 levels. This level shift can be done using the popular "213" series of TTL to RS232 level converters. These "213" devices typically have 4 transmitters and 5 receivers in a 28-LD SSOP package and feature an in-built voltage converter to convert the +5V (nominal) VCC to the +/- 9 volts required by RS232. A useful feature of these devices is the SHDN# pin which can be used to power down the device to a low quiescent current during USB suspend mode.

A suitable level shifting device is the Sipex SP213EHCA which is capable of RS232 communication at up to 500k baud. If a lower baud rate is acceptable, then several pin compatible alternatives are available such as the Sipex SP213ECA, the Maxim MAX213CAI and the Analogue Devices ADM213E, which are all suitable for communication at up to 115.2k baud. If a higher baud rate is required, the Maxim MAX3245CAI device is capable of RS232 communication rates up to 1Mbaud. Note that the MAX3245 is not pin compatible with the 213 series devices and that the SHDN pin on the MAX device is active high and should be connect to PWREN# pin instead of SLEEP# pin.

In example shown, the CBUS0 and CBUS1 have been configured as TXLED# and RXLED# and are being used to drive two LEDs.

7.2 USB to RS485 Converter

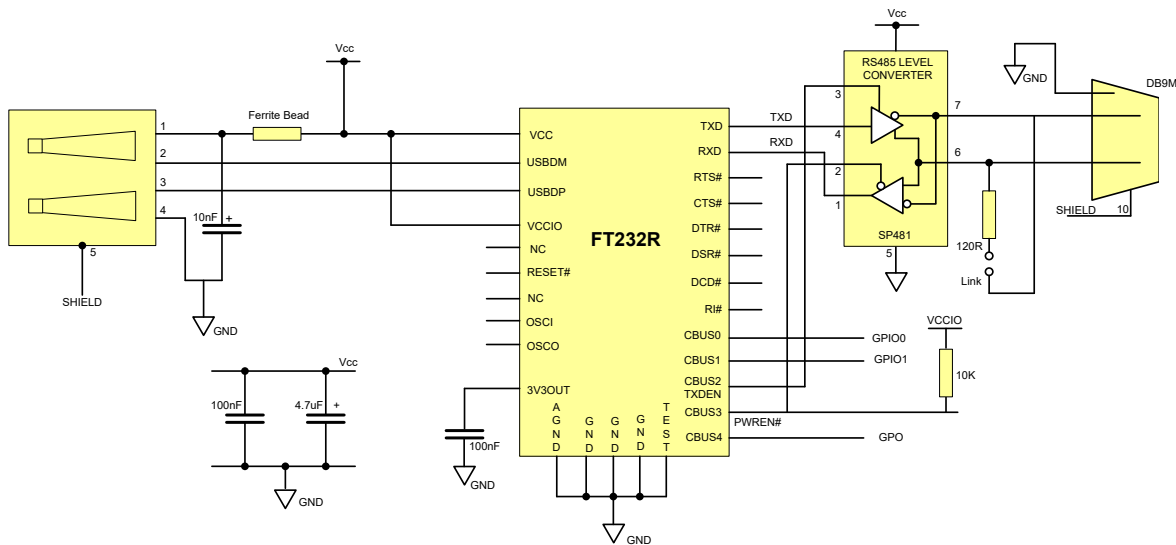


Figure 7.2 Application Example Showing USB to RS485 Converter

An example of using the FT232R as a USB to RS485 converter is shown in Figure 7.2. In this application, a TTL to RS485 level converter IC is used on the serial UART interface of the FT232R to convert the TTL levels of the FT232R to RS485 levels.

This example uses the Sipex SP481 device. Equivalent devices are available from Maxim and Analogue Devices. The SP481 is a RS485 device in a compact 8 pin SOP package. It has separate enables on both the transmitter and receiver. With RS485, the transmitter is only enabled when a character is being transmitted from the UART. The TXDEN signal CBUS pin option on the FT232R is provided for exactly this purpose and so the transmitter enable is wired to CBUS2 which has been configured as TXDEN. Similarly, CBUS3 has been configured as PWREN#. This signal is used to control the SP481's receiver enable. The receiver enable is active low, so it is wired to the PWREN# pin to disable the receiver when in USB suspend mode. CBUS2 = TXDEN and CBUS3 = PWREN# are the default device configurations of the FT232R pins.

RS485 is a multi-drop network; so many devices can communicate with each other over a two wire cable interface. The RS485 cable requires to be terminated at each end of the cable. A link (which provides the 120Ω termination) allows the cable to be terminated if the SP481 is physically positioned at either end of the cable.

In this example the data transmitted by the FT232R is also present on the receive path of the SP481. This is a common feature of RS485 and requires the application software to remove the transmitted data from the received data stream. With the FT232R it is possible to do this entirely in hardware by modifying the example shown in Figure 7.2 by logically OR'ing the FT232R TXDEN and the SP481 receiver output and connecting the output of the OR gate to the RXD of the FT232R.

Note that the TXDEN is activated 1 bit period before the start bit. TXDEN is deactivated at the same time as the stop bit. This is not configurable.

7.4 USB to MCU UART Interface

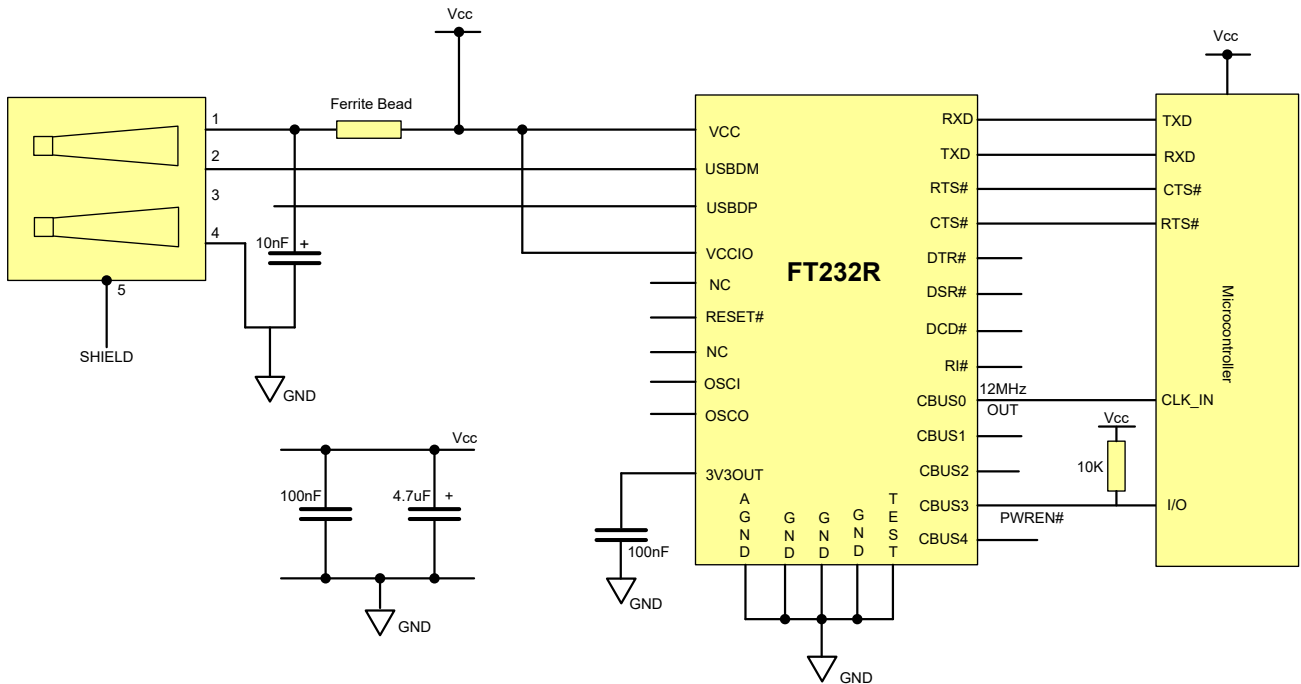


Figure 7.4 USB to MCU UART Interface

An example of using the FT232R as a USB to Microcontroller (MCU) UART interface is shown in Figure 7.4. In this application the FT232R uses TXD and RXD for transmission and reception of data, and RTS# / CTS# signals for hardware handshaking. Also in this example CBUS0 has been configured as a 12MHz output to clock the MCU.

Optionally, RI# could be connected to another I/O pin on the MCU and used to wake up the USB host controller from suspend mode. If the MCU is handling power management functions, then a CBUS pin can be configured as PWREN# and would also be connected to an I/O pin of the MCU.

7.5 LED Interface

Any of the CBUS I/O pins can be configured to drive an LED. The FT232R has 3 configuration options for driving LEDs from the CBUS. These are TXLED#, RXLED#, and TX&RXLED#. Refer to Section 3.5 for configuration options.

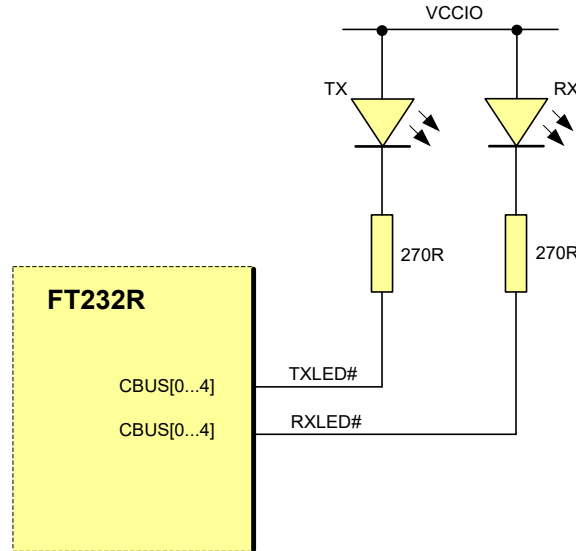


Figure 7.5 Dual LED Configuration

An example of using the FT232R to drive LEDs is shown in Figure 7.5. In this application one of the CBUS pins is used to indicate transmission of data (TXLED#) and another is used to indicate receiving data (RXLED#). When data is being transmitted or received the respective pins will drive from tristate to low in order to provide indication on the LEDs of data transfer. A digital one-shot is used so that even a small percentage of data transfer is visible to the end user.

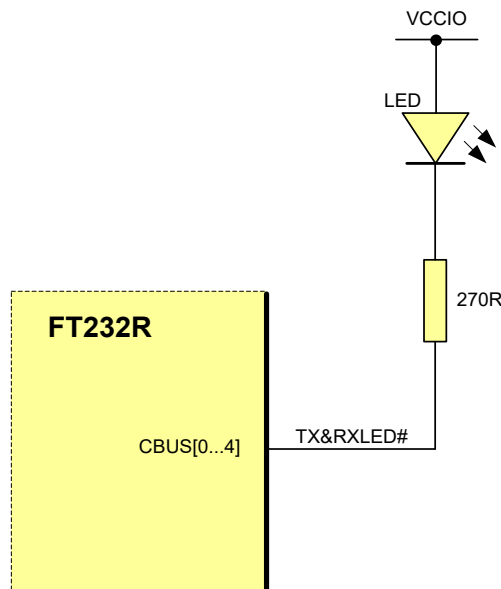


Figure 7.6 Single LED Configuration

Another example of using the FT232R to drive LEDs is shown in Figure 7.6. In this example one of the CBUS pins is used to indicate when data is being transmitted or received by the device (TX&RXLED). In this configuration the FT232R will drive only a single LED.

7.6 Using the External Oscillator

The FT232R defaults to operating using its own internal oscillator. This requires that the device is powered with $VCC(\min)=+4.0V$. This supply voltage can be taken from the USB VBUS. Applications which require using an external oscillator, $VCC=+3.3V$, must do so in the following order:

1. When device powered for the very first time, it must have $VCC > +4.0V$. This supply is available from the USB VBUS supply = +5.0V.
2. The EEPROM must then be programmed to enable external oscillator. This EEPROM modification cannot be done using the FTDI programming utility, [FT_PROG](#). The EEPROM can only be re-configured from a custom application. Please refer to the following applications note on how to do this:

[AN_100 Using The FT232 245R With External Osc](#)

3. The FT232R can then be powered from $VCC=+3.3V$ and an external oscillator. This can be done using a link to switch the VCC supply.

The FT232R will fail to operate when the internal oscillator has been disabled, but no external oscillator has been connected.

8 Internal EEPROM Configuration

Following a power-on reset or a USB reset the FT232R will scan its internal EEPROM and read the USB configuration descriptors stored there. The default factory programmed values of the internal EEPROM are shown in Table 8.1.

Parameter	Value	Notes
USB Vendor ID (VID)	0403h	FTDI default VID (hex)
USB Product ID (PID)	6001h	FTDI default PID (hex)
Serial Number Enabled?	Yes	
Serial Number	See Note	A unique serial number is generated and programmed into the EEPROM during device final test.
Pull down I/O Pins in USB Suspend	Disabled	Enabling this option will make the device pull down on the UART interface lines when in USB suspend mode (PWREN# is high).
Manufacturer Name	FTDI	
Product Description	FT232R USB UART	
Max Bus Power Current	90mA	
Power Source	Bus Powered	
Device Type	FT232R	
USB Version	0200	Returns USB 2.0 device description to the host. Note: The device is a USB 2.0 Full Speed device (12Mb/s) as opposed to a USB 2.0 High Speed device (480Mb/s).
Remote Wake Up	Enabled	Taking RI# low will wake up the USB host controller from suspend in approximately 20 ms.
High Current I/Os	Disabled	Enables the high drive level on the UART and CBUS I/O pins.
Load VCP Driver	Enabled	Makes the device load the VCP driver interface for the device.
CBUS0	TXLED#	Default configuration of CBUS0 – Transmit LED drive.
CBUS1	RXLED#	Default configuration of CBUS1 – Receive LED drive.
CBUS2	TXDEN	Default configuration of CBUS2 – Transmit data enable for RS485
CBUS3	PWREN#	Default configuration of CBUS3 – Power enable. Low after USB enumeration, high during USB suspend mode.
CBUS4	SLEEP#	Default configuration of CBUS4 – Low during USB suspend mode.
Invert TXD	Disabled	Signal on this pin becomes TXD# if enable.
Invert RXD	Disabled	Signal on this pin becomes RXD# if enable.
Invert RTS#	Disabled	Signal on this pin becomes RTS if enable.
Invert CTS#	Disabled	Signal on this pin becomes CTS if enable.
Invert DTR#	Disabled	Signal on this pin becomes DTR if enable.
Invert DSR#	Disabled	Signal on this pin becomes DSR if enable.
Invert DCD#	Disabled	Signal on this pin becomes DCD if enable.
Invert RI#	Disabled	Signal on this pin becomes RI if enable.

Table 8.1 Default Internal EEPROM Configuration

The internal EEPROM in the FT232R can be programmed over USB using the FTDI utility program [FT_PROG](#). FT_PROG can be downloaded from FTDI Utilities on the FTDI website (www.ftdichip.com). Version 2.8a or later is required for the FT232R chip. Users who do not have their own USB Vendor ID but who would like to use a unique Product ID in their design can apply to FTDI for a free block of unique PIDs. Contact FTDI support for this service.

9 Package Parameters

The FT232R is available in two different packages. The FT232RL is the SSOP-28 option and the FT232RQ is the QFN-32 package option. The solder reflow profile for both packages is described in Section 9.3.

9.1 SSOP-28 Package Dimensions

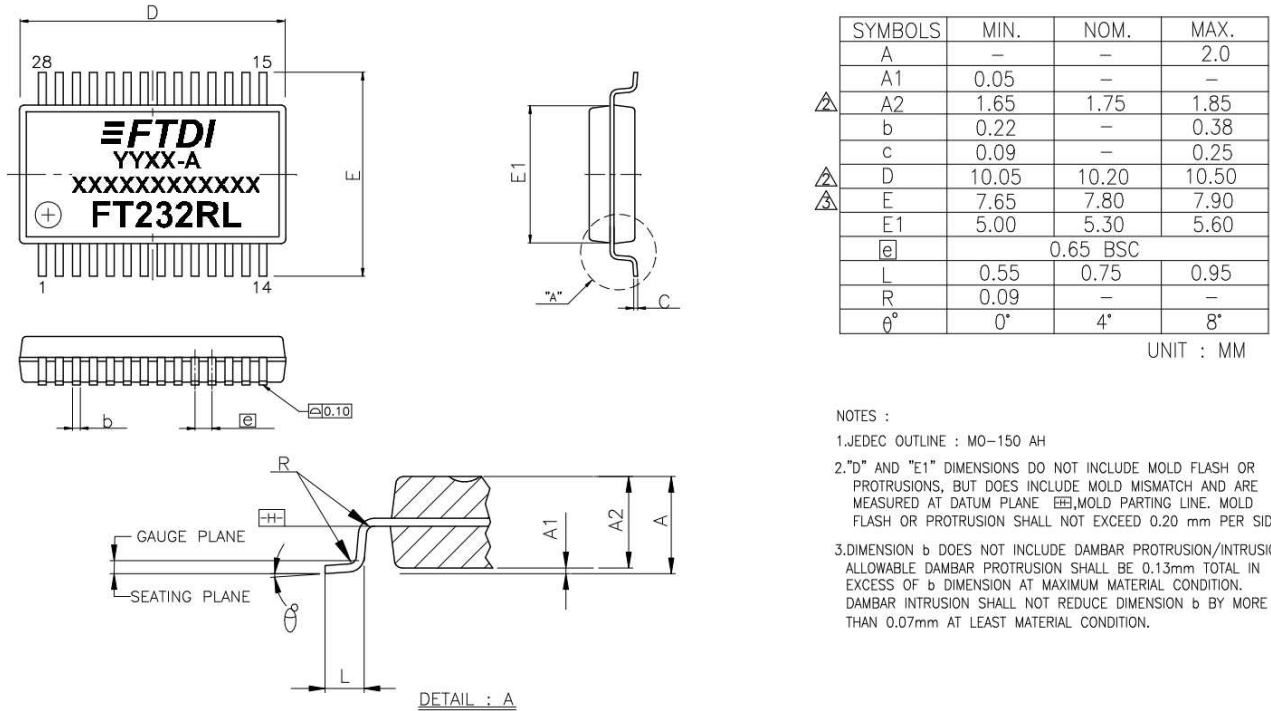


Figure 9.1 SSOP-28 Package Dimensions

The FT232RL is supplied in a RoHS compliant 28 pin SSOP package. The package is lead (Pb) free and uses a 'green' compound. The package is fully compliant with European Union directive 2002/95/EC.

This package is nominally 5.30mm x 10.20mm body (7.80mm x 10.20mm including pins). The pins are on a 0.65 mm pitch. The above mechanical drawing shows the SSOP-28 package.

All dimensions are in millimetres.

The date code format is **YYXX-A** where XX = 2 digit week number, YY = 2 digit year number, A = single letter corresponding to the revision of the device (e.g. A or B or C).

The code **XXXXXXXXXXXX** is the manufacturing LOT code. This only applies to devices manufactured after April 2009.

9.2 QFN-32 Package Dimensions

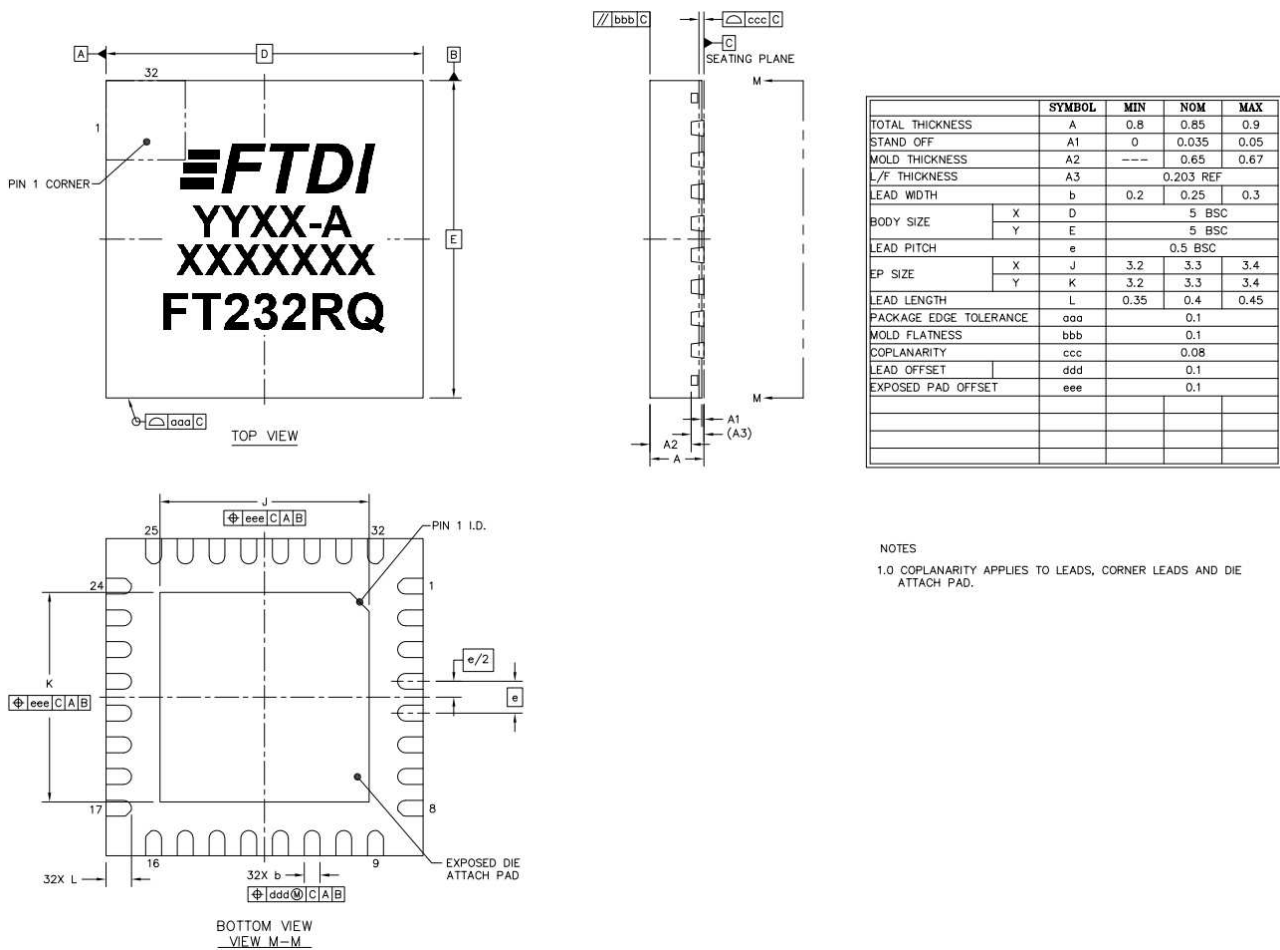


Figure 9.2 QFN-32 Package Dimensions

The FT232RQ is supplied in a RoHS compliant leadless QFN-32 package. The package is lead (Pb) free, and uses a 'green' compound. The package is fully compliant with European Union directive 2002/95/EC.

This package is nominally 5.00mm x 5.00mm. The solder pads are on a 0.50mm pitch. The above mechanical drawing shows the QFN-32 package. All dimensions are in millimetres.

The centre pad on the base of the FT232RQ is not internally connected, and can be left unconnected, or connected to ground (recommended).

The date code format is **YYXX-A** where XX = 2 digit week number, YY = 2 digit year number, A = single letter corresponding to the revision of the device (e.g. A or B or C).

The code **XXXXXXXX** is the manufacturing LOT code. This only applies to devices manufactured after April 2009.

9.3 Solder Reflow Profile

The FT232R is supplied in Pb free 28 LD SSOP and QFN-32 packages. The recommended solder reflow profile for both package options is shown in Figure 9.3.

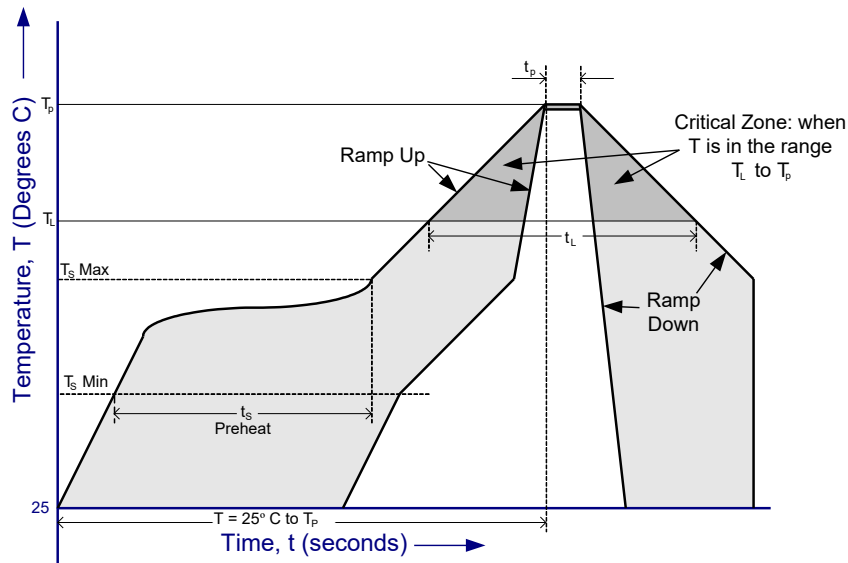


Figure 9.3 FT232R Solder Reflow Profile

The recommended values for the solder reflow profile are detailed in Table 9.1. Values are shown for both a completely Pb free solder process (i.e. the FT232R is used with Pb free solder), and for a non-Pb free solder process (i.e. the FT232R is used with non-Pb free solder).

Profile Feature	Pb Free Solder Process	Non-Pb Free Solder Process
Average Ramp Up Rate (Ts to Tp)	3°C / second Max.	3°C / Second Max.
Preheat - Temperature Min (Ts Min.) - Temperature Max (Ts Max.) - Time (ts Min to ts Max)	150°C 200°C 60 to 120 seconds	100°C 150°C 60 to 120 seconds
Time Maintained Above Critical Temperature Tl: - Temperature (Tl) - Time (tl)	217°C 60 to 150 seconds	183°C 60 to 150 seconds
Peak Temperature (Tp)	260°C	240°C
Time within 5°C of actual Peak Temperature (tp)	20 to 40 seconds	20 to 40 seconds
Ramp Down Rate	6°C / second Max.	6°C / second Max.
Time for T= 25°C to Peak Temperature, Tp	8 minutes Max.	6 minutes Max.

Table 9.1 Reflow Profile Parameter Values

10 Alternative Parts

The following lists of parts are not all direct drop in replacements but offer similar features as an alternative to the FT232R. The [FT-X](#) series is the latest device family offering reduced power and pin count with additional features such as battery charge detection, while the Hi-Speed solution offers faster interfacing.

	FT232R	FT234XD	FT230X	FT231X	FT232H
Description	Single channel USB to UART with full modem control lines	Single channel USB to Basic UART	Single channel USB to Basic UART	Single channel USB to UART with full modem control lines	Single channel USB to UART with full modem control lines
USB Speed	USB 2.0 full speed	USB 2.0 full speed	USB 2.0 full speed	USB 2.0 full speed	USB 2.0 hi-speed
UART Data Rates	3 MBaud	3 MBaud	3 MBaud	3 MBaud	12 MBaud
CBUS	5	1	4	4	10
MTP for storing descriptors	Internal	Internal	Internal	Internal	External
Package options	32 pin QFN 28 pin SSOP	12 pin DFN (3mm x 3mm)	16 pin QFN 16 pin SSOP	20 pin QFN 20 pin SSOP	48 pin QFN 48 pin LQFP
Datasheet	FT232R	FT234XD	FT230X	FT231X	FT232H

Table 10.1 FT232R alternative solutions

11 Contact Information

Head Office – Glasgow, UK

Future Technology Devices International Limited
Unit 1, 2 Seaward Place
Centurion Business Park
Glasgow, G41 1HH
United Kingdom
Tel: +44 (0) 141 429 2777
Fax: +44 (0) 141 429 2758

E-mail (Sales) sales1@ftdichip.com
E-mail (Support) support1@ftdichip.com
E-mail (General Enquiries) admin1@ftdichip.com
Web Shop URL <http://www.ftdichip.com>

Branch Office – Taipei, Taiwan

Future Technology Devices International Limited
(Taiwan)
2F, No 516, Sec. 1 NeiHu Road
Taipei 114
Taiwan, R.O.C.
Tel: +886 (0) 2 8797 1330
Fax: +886 (0) 2 8751 9737

E-mail (Sales) tw.sales1@ftdichip.com
E-mail (Support) tw.support1@ftdichip.com
E-mail (General Enquiries) tw.admin1@ftdichip.com

Web Site

<http://www.ftdichip.com>

Distributor and Sales Representatives

Please visit the Sales Network page of the [FTDI Web site](#) for the contact details of our distributor(s) and sales representative(s) in your country.

System and equipment manufacturers and designers are responsible to ensure that their systems, and any Future Technology Devices International Ltd (FTDI) devices incorporated in their systems, meet all applicable safety, regulatory and system-level performance requirements. All application-related information in this document (including application descriptions, suggested FTDI devices and other materials) is provided for reference only. While FTDI has taken care to assure it is accurate, this information is subject to customer confirmation, and FTDI disclaims all liability for system designs and for any applications assistance provided by FTDI. Use of FTDI devices in life support and/or safety applications is entirely at the user's risk, and the user agrees to defend, indemnify and hold harmless FTDI from any and all damages, claims, suits or expense resulting from such use. This document is subject to change without notice. No freedom to use patents or other intellectual property rights is implied by the publication of this document. Neither the whole nor any part of the information contained in, or the product described in this document, may be adapted or reproduced in any material or electronic form without the prior written consent of the copyright holder. Future Technology Devices International Ltd, Unit 1, 2 Seaward Place, Centurion Business Park, Glasgow G41 1HH, United Kingdom. Scotland Registered Company Number: SC136640

Branch Office – Tigard, Oregon, USA

Future Technology Devices International Limited (USA)
7130 SW Fir Loop
Tigard, OR 97223-8160
USA
Tel: +1 (503) 547 0988
Fax: +1 (503) 547 0987

E-Mail (Sales) us.sales@ftdichip.com
E-Mail (Support) us.support@ftdichip.com
E-Mail (General Enquiries) us.admin@ftdichip.com

Branch Office – Shanghai, China

Future Technology Devices International Limited
(China)
Room 1103, No. 666 West Huaihai Road,
Shanghai, 200052
China
Tel: +86 21 62351596
Fax: +86 21 62351595

E-Mail (Sales) cn.sales@ftdichip.com
E-Mail (Support) cn.support@ftdichip.com
E-Mail (General Enquiries) cn.admin1@ftdichip.com

Appendix A – References

Document References

[AN_232R-01 Bit Bang Mode Available for FT232R and FT245R](#)

[AN_107-Advanced Driver Options](#)

[AN232R-02 FTDIChip-ID for the FT232R and FT245R](#)

[AN_121- Accessing the EEPROM User Area of FTDI Devices](#)

[AN_120 Aliasing VCP Baud Rates](#)

[AN_100 – Using the FT232R/FT245R with an External Crystal or Oscillator](#)

[AN_126 – User Guide for FT232B/R Factory Test Utility](#)

[AN232B-05 Configuring FT232R, FT2232 and FT232B Baud Rates](#)

<http://www.ftdichip.com/Documents/InstallGuides.htm>

[FT_PROG](#)

Acronyms and Abbreviations

Terms	Description
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FPGA	Field Programmable Gate Array
LED	Light Emitting Diode
MCU	Micro Controller Unit
PLD	Programmable Logic Device
QFN	Quad Flat No-leads
RoHS	Restriction of Hazardous Substances Directive
SIE	Serial Interface Engine
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VCP	Virtual Communication Port

Appendix B – List of Figures and Tables

List of Figures

Figure 2.1 FT232R Block Diagram	4
Figure 3.1 SSOP Package Pin Out and Schematic Symbol.....	7
Figure 3.2 QFN-32 Package Pin Out and schematic symbol	9
Figure 6.1 Bus Powered Configuration	19
Figure 6.2 Self-Powered Configuration.....	20
Figure 6.3 Bus Powered with Power Switching Configuration	21
Figure 6.4 USB Bus Powered with +3.3V or +5V External Logic Power Supply	22
Figure 7.1 Application Example showing USB to RS232 Converter.....	24
Figure 7.2 Application Example Showing USB to RS485 Converter	25
Figure 7.3 USB to RS422 Converter Configuration.....	26
Figure 7.4 USB to MCU UART Interface	27
Figure 7.5 Dual LED Configuration	28
Figure 7.6 Single LED Configuration	28
Figure 9.1 SSOP-28 Package Dimensions	31
Figure 9.2 QFN-32 Package Dimensions.....	32
Figure 9.3 FT232R Solder Reflow Profile	33

List of Tables

Table 3.1 USB Interface Group	7
Table 3.2 Power and Ground Group.....	8
Table 3.3 Miscellaneous Signal Group.....	8
Table 3.4 UART Interface and CUSB Group (see note 3)	8
Table 3.5 USB Interface Group	9
Table 3.6 Power and Ground Group.....	10
Table 3.7 Miscellaneous Signal Group.....	10
Table 3.8 UART Interface and CBUS Group (see note 3)	10
Table 3.9 CBUS Configuration Control	11
Table 5.1 Absolute Maximum Ratings	15
Table 5.2 Operating Voltage and Current	15
Table 5.3 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +5.0V, Standard Drive Level)	15
Table 5.4 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +3.3V, Standard Drive Level)	16
Table 5.5 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +2.8V, Standard Drive Level)	16
Table 5.6 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +1.8V, Standard Drive Level)	16
Table 5.7 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +5.0V, High Drive Level).....	16
Table 5.8 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +3.3V, High Drive Level).....	16
Table 5.9 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +2.8V, High Drive Level).....	16
Table 5.10 UART and CBUS I/O Pin Characteristics (VCCIO = +1.8V, High Drive Level)	17

Table 5.11 RESET# and TEST Pin Characteristics	17
Table 5.12 USB I/O Pin (USBDP, USBDM) Characteristics	17
Table 5.13 EEPROM Characteristics	17
Table 5.14 Internal Clock Characteristics	17
Table 5.15 OSCI, OSCO Pin Characteristics – see Note 1	18
Table 5.16 FT232RL Thermal Characteristics	18
Table 5.17 FT232RQ Thermal Characteristics.....	18
Table 8.1 Default Internal EEPROM Configuration.....	30
Table 9.1 Reflow Profile Parameter Values	33
Table 10.1 FT232R alternative solutions	34

Appendix C – Revision History

Document Title: FT232R USB UART IC Datasheet
 Document Reference No.: FT_000053
 Clearance No.: FTDI# 38
 Product Page: <http://www.ftdichip.com/FTProducts.htm>
 Document Feedback: [Send Feedback](#)

Revision	Changes	Date
Version 0.90	Initial Release	August 2005
Version 0.96	Revised Pre-release datasheet	October 2005
Version 1.00	Full Datasheet Release	December 2005
Version 1.02	Minor revisions to datasheet	December 2005
Version 1.03	Manufacturer ID added to default EEPROM configuration; Buffer sizes added	January 2006
Version 1.04	QFN-32 Pad layout and solder paste diagrams added	January 2006
Version 2.00	Reformatted, updated package info, added notes for 3.3V operation; Part numbers, TID; added UART and CBUS characteristics for +1.8V; Corrected RESET#; Added MTTF data; Corrected the input switching threshold and input hysteresis values for VCCIO=5V	June 2008
Version 2.01	Corrected pin-out number in table3.2 for GND pin18. Improved graphics on some Figures. Add packing details. Changed USB suspend current spec from 500uA to 2.5mA Corrected Figure 9.2 QFN dimensions.	August 2008
Version 2.02	Corrected Tape and Reel quantities. Added comment "PWREN# should be used with a 10kΩ resistor pull up". Replaced TXDEN# with TXDEN since it is active high in various places. Added lot number to the device markings. Added 3V3 regulator output tolerance. Clarified VCC operation and added section headed "Using an external Oscillator" Updated company contact information.	April 2009
Version 2.03	Corrected the RX/TX buffer definitions to be relative to the USB interface	June 2009
Version 2.04	Additional dimensions added to QFN solder profile	June 2009

Revision	Changes	Date
Version 2.05	Modified package dimensions to 5.0 x 5.0 +/-0.075mm and Solder paste diagram to 2.50 x 2.50 +/-0.0375mm Added Windows 7 32, 64 bit driver support Added FT_PROG utility references Added Appendix A-references. Figure 2.1 updated. Updated USB-IF TID for Rev B	December 2009
Version 2.06	Updated section 6.2, Figure 6.2 and the note, Updated section 5.3, Table 5.13, EEPROM data retention time	May 2010
Version 2.07	Added USB Certification Logos	July 2010
Version 2.08	Updated USB-IF TID for Rev C	April 2011
Version 2.09	Corrected Rev C TID number	April 2011
Version 2.10	Table 3.9, added clock output frequency within $\pm 0.7\%$ Edited Table 3.9, TXLED# and TXLED# Description Added feedback links	March 2012
Version 2.11	Added thermal characteristics (Section 5.5) Added section 10 highlighting alternative solutions from FTDI	April 2015
Version 2.12	Updated the links under section A – References – Useful Application Notes Updated list of OS with supported drivers	August 2015
Version 2.13	Update Typo error in section heading 7.2 USB to RS485 Converter	2015-11-18
Version 2.14	Changes made to Bit bang WRn CBUS signal availability in Table 3.9.	2018-06-27
Version 2.15	Updated Fig.3.2 QFN-32 Package Pin Out and schematic symbol Updated Fig.9.1 SSOP-28 Package Dimensions Updated Fig.9.2 QFN-32 Package Dimensions Deleted QFN-32 Package Typical Pad Layout and QFN-32 Package Typical Solder Paste Diagram sections	2019-04-04
Version 2.16	Added note about revision letter in the package marking pages (Package Parameters section 9)	2020-05-21