



Sistema de administración de energía de un poste inteligente

Juan Gabriel Orozco Orozco

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Tutor
Ricardo Andrés Velásquez Vélez, PhD

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería
Ingeniería electrónica
Medellín
2023

Cita	(Orozco, J.G. 2023)
Referencia	Orozco. J.G. (2023). <i>Sistema de administración de energía de un poste inteligente</i> . Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Eduard Emiro Rodríguez Ramírez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	5
Introducción.....	6
Objetivos.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
Marco teórico.....	9
Postes inteligentes	9
Sensores y detección de eventos	11
Alimentación.....	14
Comunicación	18
FreeRTOS	20
Metodología.....	21
Presupuesto de potencia	21
Análisis de alternativas de diseño	23
Diseño final.....	25
Desarrollo Switch DC o selector de alimentación	26
Medición de voltaje.....	28
Sensores de corriente.....	29
Dimmer y lámpara LED	31
Reguladores de voltaje	32
Subsistema de control.....	33
Estructura del firmware	36
Tarea: Gestión de la iluminación	39
Tarea gestión de alimentación	41
Parámetros del poste.....	44
Resultados y análisis	45
Simulaciones.....	45
BOM y esquema eléctrico final	50
Rutas de las PCB.....	51
Pruebas del firmware.....	51
Documentación	54

Conclusiones.....	56
Referencias bibliográficas	57

Resumen

En el desarrollo de las ciudades inteligentes es de vital importancia recopilar información de los diferentes procesos de la ciudad por medio de sensores, es por esto por lo que el poste de alumbrado público juega un rol vital, debido a su presencia en toda la ciudad y un punto de acceso a la red eléctrica para alimentar equipos electrónicos. Por esto se plantea un nuevo tipo de poste que extienda el uso del tradicional, el llamado poste inteligente. Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de administración de energía para un poste inteligente. El desarrollo a nivel de hardware incluye dos tarjetas, una para el control del sistema y otra para el manejo de la potencia. Esta última cuenta con diferentes sensores que permiten compartir variables de consumo con la tarjeta de control para que esta pueda tomar decisiones para el manejo de la potencia y la iluminación del sistema. Por otro lado, se desarrolla el firmware o software, el cual se encuentra dividido en diferentes niveles de abstracción o capas y se ejecuta en la tarjeta principal. Por último, se muestran los avances y resultados.

Introducción

La creciente demanda energética debida al crecimiento de las ciudades y de la población, y el cambio climático hacen que sea necesario el desarrollo de sistemas que contribuyan al ahorro de energía o que hagan uso de energías renovables. Tal es el caso del alumbrado público ya que en promedio el 30% de la electricidad en una ciudad es usada por este [1], por lo que se trata de un sistema que tiene un amplio margen de mejora en términos de eficiencia y ahorro energético. El alumbrado público se mantiene encendido durante toda la noche, incluso en horas en donde apenas hay tráfico, por lo que una gran cantidad de energía es desperdiciada. Es por esto que se plantean soluciones para realizar una iluminación mucho más dinámica que contribuya al ahorro de energía. La iluminación inteligente apunta a la mejora del sistema del alumbrado permitiendo que este regule su brillo en función de la detección de vehículos o peatones en la vía. Para esto, se emplean diversos sensores y un controlador que toma las decisiones adecuadas para el control del sistema. Si bien la iluminación inteligente mejora en gran medida la eficiencia del sistema, se puede maximizar el ahorro de energía mediante el uso de energías renovables, por lo que es necesario un sistema que pueda gestionar diferentes tipos de alimentación de forma constante para los diferentes tipos de sensores, módulos de comunicación y demás equipos con los que cuenta el poste inteligente. Teniendo en cuenta el contexto anterior se propone en el trabajo de grado el desarrollo de un sistema de administración de energía para un poste inteligente. Este sistema se encarga de gestionar la iluminación y conmutar los diferentes tipos de alimentación para alimentar la lámpara y los demás sistemas de computación en el borde, ya que este trabajo se realiza en el marco del proyecto de investigación "Administración inteligente de problemas de seguridad ciudadana a través de modelos y

herramientas generadas a partir de plataformas para territorios inteligentes apoyadas por estrategias de participación ciudadana en la ciudad de Medellín” del grupo SISTEMIC. Para este fin se realizará el diseño del hardware y el firmware que permitan este tipo de funcionalidades y cumplan con los requerimientos del proyecto de investigación.

Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar el hardware y el software de un sistema de administración de energía en el contexto de un poste de alumbrado público inteligente con panel solar y batería, para reducir el consumo de la red eléctrica y maximizar el uso de energía solar.

Objetivos específicos:

- Diseñar la arquitectura del sistema de administración de energía de una lámpara inteligente de tal forma que permita combinar las fuentes de energía para suministrar potencia a la carga
- Seleccionar componentes electrónicos y diseñar los subsistemas del sistema de administración de energía incluidos los PCBs
- Desarrollar el software de control para la administración de energía
- Implementar y evaluar el rendimiento del sistema por medio de un prototipo

Marco teórico

Postes inteligentes

El concepto de poste inteligente es fundamental en el modelo de ciudad inteligente, ya que se encuentran a través de toda la ciudad y proveen un punto de conexión a la red eléctrica, por lo que se pueden instalar sensores, equipos y sistemas que extiendan la funcionalidad del poste; es por esto por lo que el rol que los postes desempeñan en la ciudad puede ser extendido. La propuesta presentada en [2] presenta de manera concreta el concepto de poste inteligente, entre sus funciones extra está la de monitoreo del clima, medición de la lluvia, cámara de vigilancia e iluminación especial en caso de eventos temáticos como festivales. En dicho artículo también se menciona que los postes pueden proveerse de manejo de servicios de emergencia tales como botones de pánico o speaker para comunicar a los ciudadanos cuando ocurre una eventualidad que pone en peligro su seguridad. Artículos como [3] y [4] cuentan con un botón de pánico que puede ser accionado por los transeúntes en caso de que surja una emergencia, de inmediato se envía una notificación a las autoridades para que se enteren de la ubicación y puedan proceder de manera oportuna. En [5] se presenta una propuesta similar, en la cual se presenta un botón de emergencia que realiza una llamada a la policía y envía la imagen de la cámara de vigilancia más cerca vía streaming a las autoridades; para cumplir este propósito hace uso de un módulo GSM, el cual realiza funciones de un celular como enviar SMS y recibir/realizar llamadas. Hay propuestas más experimentales como en [6], donde los autores proponen equipar los postes con proyectores y reemplazar algunas señales de tránsito que se encuentran en el suelo o paredes para marcar zonas de peligro y ofrecer información del entorno a los ciudadanos.

En [7] se exponen tendencias de diseño de postes inteligentes, implementaciones en las ciudades y lo que puede venir en un futuro para este tipo de dispositivos, además de discutir la importancia que tienen en las ciudades inteligentes. Los autores clasifican los postes inteligentes en 3 versiones, versión 1.0, 2.0 y 3.0. La versión 1.0 tiene únicamente la función del manejo inteligente de la iluminación, cuenta con sensores y un sistema de comunicaciones que permite el monitoreo y un control remoto centralizado. La versión 2.0 tiene otras funcionalidades adicionales, como detección de emergencias en la vía como choques de auto, sirven como estaciones de carga de autos eléctricos, alarmas y aviso a las autoridades de emergencia, etc. Los autores mencionan que la gran mayoría de ciudades con postes inteligentes se encuentran en esta etapa. Adicional a ello se menciona que hay dos formas de conseguir una versión 2.0 del poste inteligente, mediante reemplazo total o upgrade, siendo esta última la opción más común debido al alto costo de un reemplazo completo del poste. Para realizar el upgrade se añaden los componentes necesarios para desempeñar las nuevas funciones, es por esto por lo que los diseños tienden a ser lo más modular posible, para facilitar la integración de este tipo de mejoras. La versión 3.0, es el acoplamiento de las distintas redes urbanas, tales como las viales, eléctricas, redes de información y redes IoT. Parafraseando a los autores, es formar las redes nerviosas de la ciudad, es decir, convertir los postes inteligentes en las principales unidades de adquisición de información de la ciudad, lo cual los convierte en el elemento más importante de la ciudad inteligente. Se menciona que casi ninguna ciudad alcanza este punto y únicamente hay algunos proyectos piloto pequeños en algunas ciudades de China.

Sensores y detección de eventos

Los sensores son la pieza clave de la detección de eventos que desencadenan las acciones de control en el sistema de iluminación. Entre las implementaciones más básicas encontradas en la literatura se encuentra la detección de transeúntes y vehículos en la vía. Se hace uso de diversas tecnologías para lograr este fin, entre las que se encuentran los sensores ultrasónicos como en [1], allí se menciona que se debe elegir cuidadosamente la distancia de los sensores ya que se pueden producir retardos bastante altos en la detección del movimiento, en [8] y [9] hacen uso de esta tecnología, sin embargo, no se mencionan retardos en la detección. Los sensores ultrasónicos miden la distancia de los objetos mediante la detección del eco de las ondas ultrasónicas enviadas por el mismo sensor, en base al eco y un algoritmo en un microcontrolador se puede medir la distancia a la que se encuentran los objetos. Los artículos que se mencionan realizan un montaje básico, por lo que no se concluye efectividad en entornos abiertos, con diversos objetos en movimiento ni la precisión en la detección. Otra tecnología encontrada son los sensores infrarrojos, los cuales constan principalmente de un LED infrarrojo y un fotodiodo el cual detecta la luz infrarroja reflejada por los objetos en la vía; una propuesta se presenta en [10] donde se exponen las ventajas de uso de esta tecnología. En [11] se mencionan diversos tipos de sensores infrarrojos, entre ellos un sensor de rayo infrarrojo, el cual se trata de un emisor de rayo infrarrojo y un receptor, cuando un objeto se interpone entre el emisor y el receptor, interrumpe la señal y se infiere la presencia de un objeto, allí también se menciona que este tipo de sensores necesitan de un mantenimiento y una calibración constante, adicionalmente, si el transmisor y el receptor no se encuentran correctamente alineados la detección no funciona correctamente, por lo que son una alternativa que puede resultar algo problemática en el largo

plazo. La mayoría de las implementaciones con tecnología infrarroja hacen uso de sensores PIR o infrarrojos pasivos, los cuales captan la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, lo cual ofrece una forma óptima de detectar el movimiento; no requieren un mantenimiento estricto como otras alternativas por lo que resultan ser bastante atractivos. Algunas aplicaciones más experimentales consultadas hacen uso de materiales piezoeléctricos, los cuales producen voltaje cuando se les aplica presión; es por este curioso efecto de este tipo de materiales algunos artículos proponen su uso para la detección de los transeúntes y autos cuando estos pasan por encima de los sensores; en [12] se propone una aplicación de este tipo, sin embargo, no se realiza una implementación. En otros artículos como [13] y [14] usan este tipo de sensores para generar energía, este tipo de aplicaciones encontradas se discutirán más adelante. De los artículos consultados se evidencia la necesidad de propuestas un poco más detalladas a nivel de implementación, ya que se dejan al aire detalles importantes como la ubicación de los sensores en las vías o la conexión con el sistema del alumbrado público para el reporte o consumo de los eventos por parte del sistema.

Adicionalmente al movimiento se pueden detectar otro tipo de eventos en las vías como accidentes de tránsito o congestiones vehiculares, los cuales necesitan de la intervención de las autoridades. Para este fin la detección del movimiento no es suficiente, por lo que las propuestas encontradas en la literatura son bastante variadas. En [15] se encontró una de las implementaciones más básicas, ya que hace uso de la tecnología de láseres infrarrojos para detectar eventos anómalos en las vías; cuando se corta en rayo entre el emisor y el receptor durante mucho tiempo se infiere una situación anormal en el tráfico de la vía y se hace el reporte a las autoridades. Los autores advierten que hay métodos más eficientes para este tipo de eventos

mediante cámaras y algoritmos de procesamiento de imágenes, pero estos pueden resultar más costosos. En [3] se hace uso de técnicas de redes neuronales para detectar la velocidad de los vehículos en las vías, además de ofrecer funcionalidades de un sistema de alumbrado público inteligente, se presentan varios tipos de algoritmos y técnicas para detectar la densidad de tráfico en las vías. En [5] se presentan un sistema de alumbrado público con la incorporación de cámaras de vigilancia.

Para aprovechar el suministro de energía eléctrica que ofrecen los postes de alumbrado público en algunas aplicaciones se propone expandir el uso del poste más allá de su rol estructural y de distribución de la energía. En algunas de las implementaciones consultadas se equipan los postes con sensores de todo tipo para medir variables de importancia para las ciudades como la concentración de partículas, gases contaminantes, temperatura, etc. En [16] se implementan sensores de ruido, humo y emisiones de carbono, de igual forma la implementación mostrada en [3] hace uso de sensores de polución y material particulado, ya que el artículo está orientado a ofrecer una solución integral aprovechando el concepto de poste inteligente, el cual se abordó en profundidad anteriormente. Por último, en la mayoría de las propuestas consultadas se hace uso de resistencias sensibles a la luz para detectar los cambios de luminosidad en el ambiente y encender la lámpara cuando se requiere, en algunas implementaciones se utilizan también para diagnosticar el funcionamiento de la lámpara, si esta se enciende y entrega el brillo adecuado.

Alimentación

La característica de ahorro energético de las implementaciones inteligentes del alumbrado público se potencia mediante la implementación de una fuente de alimentación basada en energías limpias. Dentro de los artículos consultados predomina principalmente la energía solar, debido a su alta confiabilidad y amplio uso en diversos sectores. El panel solar debe venir acompañado de una batería para almacenar la energía generada durante el día y usarla durante la noche o en algunas ocasiones compensar el déficit de energía debido a los cambios de irradiancia del sol. También se hacen uso de controladores de carga que regulan el voltaje y la corriente eléctrica para cada etapa de la batería y evitar sobrecalentamientos, sobrecargas y alargar la vida útil de la misma. En [17] se hace uso de un panel solar y una batería para alimentar el sistema de control, los sensores y la lámpara. Tiene la particularidad de que usa un inversor de onda, ya que en las pruebas no hace uso de luminarias LED sino bombillos incandescentes, por lo que se tiene que convertir el voltaje DC de la batería a uno AC para la alimentación de dichas bombillas. También se habla de un sistema de emergencia en caso de que la batería falle se hace uso de la red eléctrica para alimentar el sistema; para este fin hace uso de un relé, pero no se aborda de forma detallada el proceso por el cual se detecta un bajo voltaje en la batería. En [12] se hace uso de un panel solar y una batería de iones de litio, también un control de carga diseñado especialmente para la carga de baterías de iones de litio, el controlador usa un método de carga lineal, el cual consiste en aplicar un voltaje y una corriente constante a la batería; se menciona que este método se usa para carga baterías de litio de una sola celda. No se especifica el tipo de panel solar a implementar ni las razones por las que se escoge la batería de iones de litio. En [18] se hace una implementación con el panel solar con el añadido de que el panel solar se puede

reorientar, gracias al uso de motores, esto con el fin de siempre lograr la mayor irradiancia posible. Allí también se observa una conmutación automática a la red eléctrica en caso de que la batería no tenga energía suficiente para alimentar el sistema; la conmutación se realiza nuevamente mediante un relé. En [19] y [13] los autores describen un sistema que hace uso de energía solar, pero no dan mayores detalles acerca del diseño de este apartado del sistema de iluminación.

La fuente más grande de energía renovable es la del sol, aunque solo una pequeña parte de esta es aprovechable una vez llega a la tierra. La generación de electricidad a través de energía solar puede hacerse mediante el efecto fotovoltaico o mediante la acumulación de calor, la cual lleva agua al estado gaseoso y mover una turbina que genera electricidad mediante inducción. Las celdas fotovoltaicas son una forma de generar electricidad a partir del sol y el aprovechamiento del efecto fotovoltaico. Estas celdas se componen principalmente de una oblea de silicio que se encuentra entre dos mallas metálicas, la oblea de silicio es tratada para que cuando incida sobre ella luz solar se liberen cargas y estas sean empujadas en una dirección dada. Existen diferentes tipos de celdas solares, las dos principales son: Monocristalinas y policristalinas; sus nombres hacen alusión al tipo de silicio con el que son construidas. Las celdas monocristalinas son construidas con un único cristal de silicio, lo cual aumenta su eficiencia menormente, al mismo tiempo que su costo; por otro lado, las celdas policristalinas son más baratas, pero generan mucha menos energía por metro cuadrado, debido a que las celdas cuentan con varios cristales de silicio y este es menos puro. [20]

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser de varios tipos:

- Sistemas conectados a la red: Generalmente no almacenan energía. Usados principalmente en zonas urbanas de países industrializados
- Sistemas centralizados: Grandes zonas o plantas fotovoltaicas para la generación de energía en una zona concreta para luego ser distribuida.
- Sistemas no centralizados: Son sistemas en donde se genera la energía en el lugar que se aprovecha, como por ejemplo viviendas o edificios, donde no se requiere distribución a otras zonas.

El sistema mostrado en este trabajo es un sistema conectado a la red y no centralizado, el cual, sin embargo, cuenta con una batería para proporcionar estabilidad al sistema cuando la luz del sol disminuye debido al curso natural del día, por nubes u otras condiciones climáticas. Cuando la irradiancia no es suficiente para mantener la potencia necesaria para el sistema, la batería proporciona la potencia necesaria para mantener el sistema encendido, el encargado de manejar los dos tipos de energía es un controlador solar.

Los controladores de panel solar son fundamentales no solo para gestionar una batería de respaldo sino también para controlar la corriente generada en el panel solar y proporcionar un voltaje deseado en su salida, lo cual se puede traducir en un mejor aprovechamiento de la energía proporcionada por el panel. Adicionalmente otorgan aislamiento y protección a la carga que le es conectada. Existen dos tipos principales de controladores solares: PWM y MPPT, siendo este último el más eficiente, ya que hace seguimiento del punto de máxima potencia, ajustando el voltaje a la salida para obtener la mayor generación de potencia posible; se hará uso de un controlador de este tipo en el sistema descrito a lo largo de este trabajo, debido a su eficiencia

Control de brillo

El control de brillo de la lámpara es una parte fundamental del sistema ya que contribuye considerablemente al ahorro de energía, al mismo tiempo que debe ser gestionado de forma adecuada para evitar accidentes en las vías. Este tipo de técnicas también afectan la vida útil de las lámparas, tal y como se muestra en [21], el cual es un estudio del deterioro de las lámparas LED a las cuales se les hace dimming o control de brillo. Allí se menciona que operar las lámparas LED con voltajes y corrientes con valores menores a los nominales alargan la vida útil de las mismas, sin embargo, si la variación de brillo se realiza entre valores muy extremos de brillo y en intervalos de tiempo muy cortos la vida útil se reduce debido al deterioro de las juntas de los materiales semiconductores con los que están contruidos los bombillos LED. Este deterioro es consecuencia del estrés térmico al que son sometidos los materiales, ya que los cambios de temperatura son muy repentinos, consecuencia de un cambio en el brillo proporcionado por la lámpara. El deterioro de la lámpara se ve reflejado en la disminución del flujo luminoso proporcionado. Es importante conocer este tipo de respuestas de las lámparas para encontrar una forma adecuada de realizar el control de brillo, para, como mínimo, no disminuir la vida útil de la lámpara o alargarla de ser posible.

Se encontraron diversas estrategias para el control de brillo o dimming. La más básica es on/off, es decir, cuando no se detecta movimiento en las vías se apaga la lámpara y se enciende en caso contrario durante un tiempo. Esta estrategia en términos de seguridad puede resultar cuestionable debido a la poca visibilidad en larga distancia, lo cual puede ser causante de

accidentes o ser de utilidad para personas mal intencionadas, sin embargo, esta técnica suele brillar más en ambientes privados en ciertas instalaciones como los baños de un centro comercial. La técnica del dimming o reducción de brillo parece ser la más indicada para las vías, tal y como se menciona en [22], por su excelente combinación con la tecnología de luminarias LED, llegando a alcanzar 70% de ahorro de energía y en implementaciones con control inteligente en base a la densidad de tráfico se logra un ahorro de un 50% en horas pico. Es la técnica más utilizada en los artículos que fueron consultados, sin embargo, en gran cantidad de ellas no se menciona el método por el cual se implementa. En [23] se menciona el uso de PWM para el control de brillo de la lámpara LED, pero cuenta con limitaciones que dependen en gran medida del tipo de controlador y el tipo de lámpara LED que sea empleada, ya que algunos drivers no permiten este tipo de control. En [8] se hace uso de un módulo externo para realizar el dimming de la lámpara, el módulo usado cuenta con 16 niveles de iluminación diferentes y puede ser controlado mediante el MCU usado en el sistema.

Comunicación

En el contexto del proyecto del grupo SISTEMIC es necesario que el poste haga un reporte de eventos remotamente a través de un enlace inalámbrico hacia una estación remota, donde se tiene la plataforma de ciudades inteligentes. Para este fin se exploraron diversas tecnologías inalámbricas que se usan en aplicaciones ciudades inteligentes. Se encontraron diversas tecnologías como GSM, ZigBee, LoRaWAN, etc. Una implementación detallada de un sistema de comunicaciones basado en ZigBee se hace en [23], allí se menciona que ZigBee es ideal para el diseño que se plantea ya que tiene bajo costo, bajo consumo de energía y es de fácil

instalación. En dicho artículo también se menciona como se agrupan las lámparas por nodos y se hace referencia al uso de diversas tecnologías de comunicación en un mismo sistema, la comunicación entre los postes se realiza mediante tecnologías de comunicación corta como PLC o radiofrecuencia; mientras que la comunicación entre nodos y la estación principal se puede hacer uso de tecnologías que permitan un mayor alcance como GPRS, también se menciona el uso de SMS para el encendido o apagado de las lámparas de manera remota. En [16] se presenta un sistema que hace uso de GSM y GPRS, sin embargo, no habla acerca de las razones de la elección de esta tecnología.

LoRa es una técnica de modulación de radio [24]. Esta codifica la información en las ondas de radio ofreciendo una transmisión robusta y a prueba de distorsiones que se pueden inducir en la señal cuando esta viaja largas distancias. Lora es ideal para aplicaciones donde se necesite enviar pequeños fragmentos de datos con una baja velocidad. Los datos pueden viajar más lejos comparados con otras tecnologías como WiFi. Todas estas características hacen de lora una tecnología atractiva para la implementación de redes de sensores donde se requiera bajo consumo.

LoRaWAN es un protocolo en la capa MAC, una capa por encima de LoRa, la cual es la capa física o de modulación [24]. En este protocolo se define como los dispositivos usan el hardware LoRa, como por ejemplo los formatos de los mensajes y la forma en la que estos transmiten.

FreeRTOS

FreeRTOS es un sistema operativo para sistemas embebidos gratuito y de código abierto. Según palabras en su página web este sistema operativo cuenta con un kernel robusto y confiable [25] y con una amplia gama de sistemas embebidos en los que se puede usar, entre ellos el microcontrolador donde se programará el firmware del poste inteligente, la Raspberry Pi Pico. Se hará uso de FreeRTOS para que las tareas y diferentes funcionalidades del poste se ejecuten en el orden debido en el momento que se deben ejecutar, sin dejar que una tarea con mucha carga de procesamiento tome completamente el sistema durante mucho tiempo, dejando las demás relegadas.

Para trabajar con FreeRTOS se descarga el port del sistema embebido o microcontrolador donde se desarrollará la aplicación y se incluye como una librería. Al momento de escribir el programa no se realiza de la forma típica, dentro de la función main. Las tareas se programan de forma independiente y con un ciclo infinito, ya que es un requerimiento que el programa no se salga de una tarea determina de forma normal. Las tareas son ejecutadas por el scheduler del sistema operativo, el cual se ejecuta de forma automática y continua una vez es invocado. El scheduler ejecuta tareas que se encuentren en el estado ready en función de su prioridad, la cual es establecida en el momento de creación de la tarea. Adicionalmente las tareas cuentan con un intervalo de tiempo en el que son ejecutadas, una vez se cumple este tiempo, si hay más tareas en estado ready, la tarea es relevada automáticamente y enviada a la cola, donde posteriormente será retomada en el punto donde estaba antes de ser relevada.

Metodología

Como punto de partida se realizó un presupuesto de potencia y las fuentes de alimentación a utilizar, además, un diagrama de bloques general del sistema. Se eligieron los componentes electrónicos y se realizaron simulaciones para comprobar su funcionamiento al mismo tiempo que se desarrollaba el firmware. Por último, se desarrollaron las placas de circuito impreso.

Presupuesto de potencia

Se da inicio al diseño del sistema de administración de energía teniendo en cuenta los requerimientos en términos de potencia de las tarjetas de cómputo en el borde, la lámpara LED y todo lo relacionado al MCU y los sensores. Cabe aclarar que los valores se toman un poco por encima para tener margen de potencia prudente. Los valores y componentes están ilustrados en la tabla 1.

Componente	Potencia
Lámpara LED	100 W
VIM4 (Tarjeta de cómputo en el borde para audio)	40 W
VIM4 (Tarjeta de cómputo en el borde para video)	40 W
MCU y sensores	20 W
Total	200 W

Tabla 1. Requerimientos de potencia

La tecnología de iluminación escogida es la iluminación LED debido a su larga vida útil y bajo consumo. En el mercado se encuentran de diversos tipos de potencia como es de esperar,

incluso algunos productos vienen con un panel solar y batería incluida. Este tipo de sistemas fueron puestos en consideración, pero fueron rápidamente descartados debido a que la batería con la que cuentan está pensada para alimentar únicamente la luminaria LED en horas nocturnas, por lo cual, en caso de una intervención para agregar los sensores inteligentes y demás subsistemas requeridos en el proyecto, la potencia suministrada por esta sería insuficiente para alimentar todo el sistema. Las tarjetas de cómputo en el borde son necesarias en el proyecto "Administración inteligente de problemas de seguridad ciudadana a través de modelos y herramientas generadas a partir de plataformas para territorios inteligentes apoyadas por estrategias de participación ciudadana en la ciudad de Medellín", por lo que deben de ser incluidas en el sistema del poste inteligente y garantizar su alimentación.

Una vez se tienen la potencia aproximada que consumirá el sistema se eligen las fuentes de alimentación que tendrá. Se contempló el uso de una batería para alimentar el sistema en horas de la noche como en algunas implementaciones de energía solar en postes de alumbrado público, sin embargo, se necesitaría una batería bastante grande y pesada por lo que no resulta viable para ser ubicada en lo alto de un poste. Por esta razón el uso de la batería se daría únicamente en caso de la falta de disponibilidad de la red eléctrica y la energía solar. En la tabla 2 se ilustran las fuentes de alimentación y el uso que se le dará a cada una.

Tipo de alimentación	Uso
Red eléctrica en CA	En horas de la noche o durante el día cuando la batería y el panel solar no pueden suministrar energía
Panel solar	En horas del día

Batería	Alimentación de emergencia en caso de que la red eléctrica o el panel solar no puedan suministrar energía al sistema
---------	--

Tabla 2. Fuentes de alimentación para el sistema.

Análisis de alternativas de diseño

Como punto de partida se intenta satisfacer la necesidad de la selección de las diferentes fuentes de alimentación, es por esto, que surgen 2 alternativas iniciales, una dominada principalmente por la corriente AC, a la cual se le llamará diseño AC y una segunda dominada por DC. La diferencia principal se encuentra en el componente que se encarga de realizar la conmutación de la fuente de alimentación y el tipo de alimentación recibida por este.

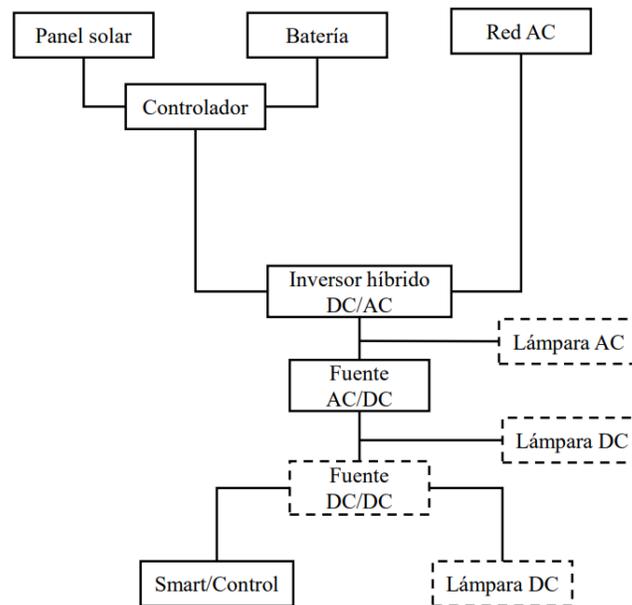


Figura 1. Diagrama de bloques del diseño AC inicial del sistema.

En el *diseño AC* el componente que permite seleccionar las fuentes de alimentación es un inversor híbrido. Siendo específicos el inversor híbrido no selecciona como tal una fuente de alimentación, sino que combina la energía de la red y la energía solar para suministrar una potencia dada en corriente AC. Dicho de otra manera, el inversor híbrido toma energía de la red eléctrica para apoyar a la energía solar cuando está no tiene la potencia requerida en una aplicación dada. En la *figura 1* se muestra el diagrama de bloques de este sistema en cuestión. Se puede observar que el inversor híbrido recibe la corriente AC de la red y la energía solar a partir de un controlador de carga, a la salida del inversor hay una fuente AC/DC y en serie con esta otra fuente DC/DC para las distintas salidas de voltaje del sistema. También se muestra en líneas punteadas la lámpara, ya que puede ser ubicada en diferentes puntos del sistema dependiendo de su tipo de alimentación, ya sea AC o DC. El bloque Smart/Control representa el microcontrolador, sus sensores y todo lo relacionado con el computo en el borde y los sensores inteligentes.

El principal problema encontrado en este diseño fue el inversor híbrido. Este tipo de dispositivos suelen estar orientados principalmente a hogares, es por esto que manejan potencias de más de 1 kW que resultan excesivas teniendo en cuenta los requisitos de potencia del proyecto. El inconveniente más grande encontrado es su gran tamaño y la necesidad de un espacio abierto en el cual puedan ventilarse ya que pueden disipar mucho calor.

En la *figura 2* se puede observar el *diseño DC*. Este diseño es diferente del anterior ya que hace uso de un interruptor para permitir la elección de la fuente de alimentación para el sistema, esta señal de control debe ser accionada por el microcontrolador. Este diseño es el más

viable debido a que no se realizan tantas conversiones entre AC/DC, es por esto por lo que se podrían alcanzar eficiencias más altas al minimizar pérdidas en la conversión y se puede lograr un tamaño más reducido al no contar con un inversor para la gestión de la energía. Sin embargo, el switch DC fue una gran incógnita ya que no se sabía a ciencia cierta si existían dispositivos que conmutaran de una fuente de alimentación a otra en caso de falla.

Se dedico un tiempo considerable para realizar la búsqueda de soluciones en el mercado para el switch DC, la mayoría de ellas orientadas a la industria, con manejo de alta potencia y fuentes de tipo AC.

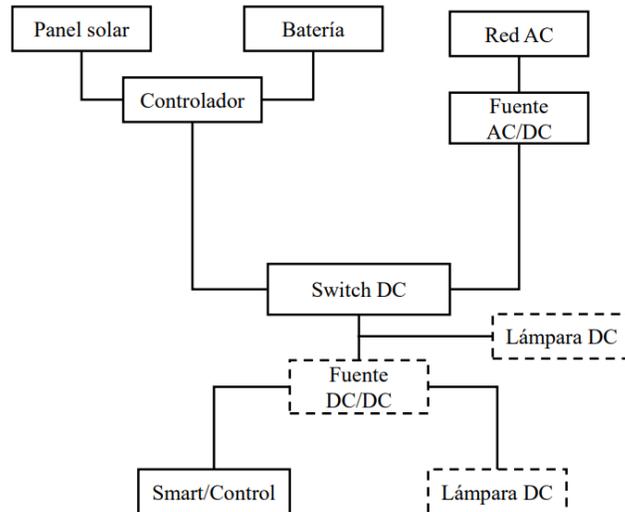


Figura 2. Diagrama de bloques del diseño DC inicial del sistema.

Diseño final

Como punto de partida se toma el diseño DC de la figura 2. Como las acciones de control del microcontrolador son principalmente elegir la fuente de alimentación se necesita contar con la información de potencia entregadas por las fuentes y la consumida por el sistema. Para este fin se añaden otros bloques adicionales, *medida de voltaje* y dos sensores de corriente, uno para los sensores y el restante para la lámpara LED. Como los sensores no cuentan con el mismo voltaje

se decide añadir una etapa de regulación, en la cual se cuenta con reguladores de voltaje de 5 y 3.3 voltios, dos de 12 voltios para las tarjetas de cómputo en el borde y uno de 16 voltios para la carga de la batería de respaldo. El diseño final se muestra en la figura 3.

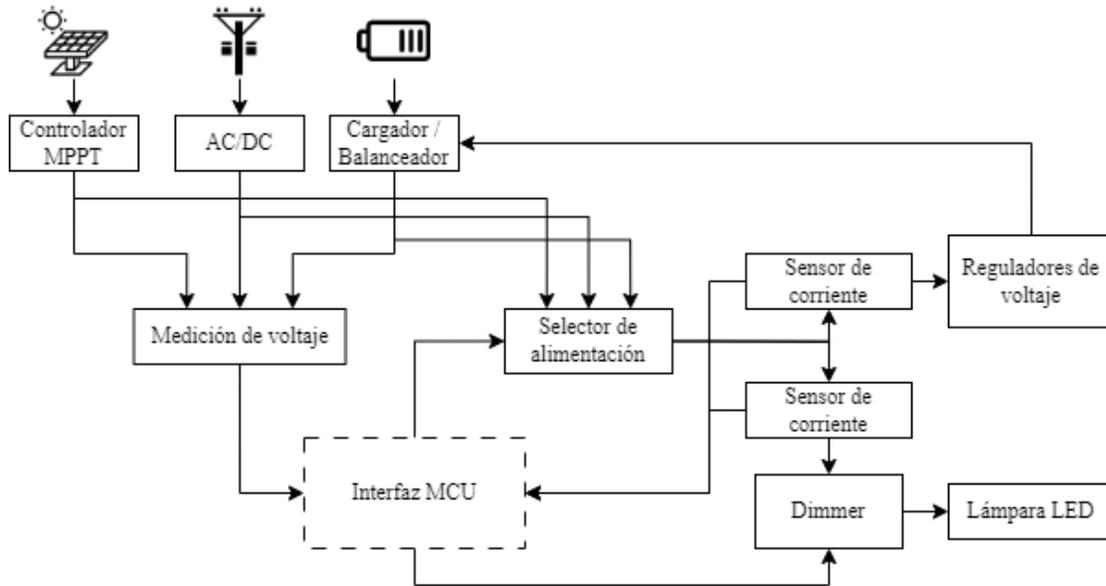


Figura 3. Diagrama de bloques del diseño final de la tarjeta de potencia.

Desarrollo Switch DC o selector de alimentación

El principal desafío al momento de diseñar un selector de alimentación basado en relés es la polarización del microcontrolador, ya que este debe estar polarizado para generar las correspondientes señales de control, por lo que, si se alimenta con una fuente permanente, como por ejemplo la red eléctrica, en caso de que esta falle el MCU no recibiría energía de la fuente auxiliar, por ejemplo, la batería, y por lo tanto el sistema no funcionaría en lo absoluto. Es por esto por lo que se decidió implementar el switch en dos partes, uno para los sensores, lámpara, etc. Y otro para el MCU, el cual se enclava y elige entre la red eléctrica y la batería de respaldo.

El que se enclave hace alusión a que al estar presente la red eléctrica esta polariza la bobina del relé, accionando el contacto y polarizando el MCU, en su ausencia el relé cambia de contacto dejando pasar la corriente de la batería. Una vez este switch polarice el MCU, este queda en total facultad para ejecutar las mediciones de los voltajes de las fuentes de alimentación y enviar la señal de control al switch de la fuente de alimentación más apta en dicho momento para alimentar el sistema. El circuito polarizador del microcontrolador se muestra en la figura 4.

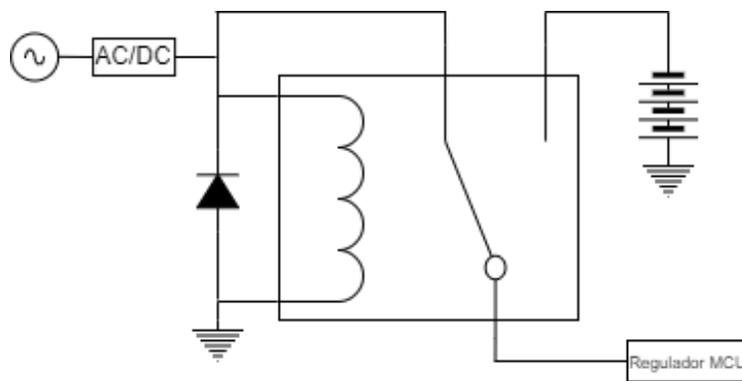


Figura 4. Circuito de enclavamiento del microcontrolador

Para accionar los demás relés el microcontrolador hace uso de sus pines I/O que llevan a la región de saturación a transistores BJT que permiten polarizar el inductor dentro de los relés, se añade un diodo antiparalelo para proteger el BJT de voltajes inducidos por el inductor en su desconexión. En el pin normalmente abierto se conecta la fuente de alimentación dada y se deja sin conectar el pin normalmente cerrado. El diagrama en cuestión es mostrado en la figura 5.

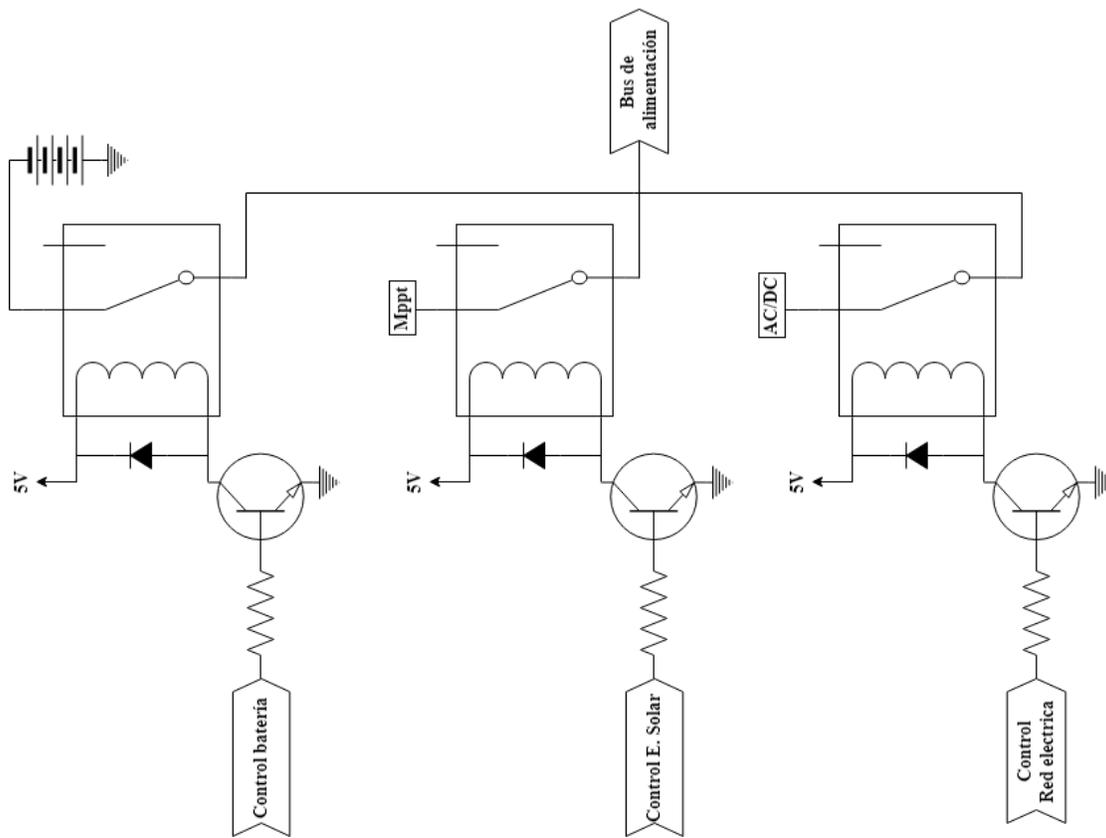


Figura 5. Relés de alimentación.

Medición de voltaje

Para realizar la medición de voltaje de las diferentes fuentes de alimentación se hará uso del ADC proporcionado por el microcontrolador. La raspberry pi pico cuenta con 3 canales de ADC, lo cual satisface la necesidad de tomar las medidas de las 3 fuentes de alimentación. Como los pines de la RaspBerry Pi Pico tienen un voltaje nominal de 3.3V y las 3 fuentes de alimentación superan con creces este valor, se realiza un divisor de voltaje de tal forma que cuando la fuente correspondiente presenta el valor máximo, el voltaje en el pin de ADC sea

3.3V, esto permite conocer el voltaje posteriormente realizando una regla de 3 en el microcontrolador. Se añade un buffer previo a la entrada de los canales de ADC para evitar caídas de voltaje que puedan alterar la medición. El esquemático de la medición de voltaje se muestra en la figura 6.

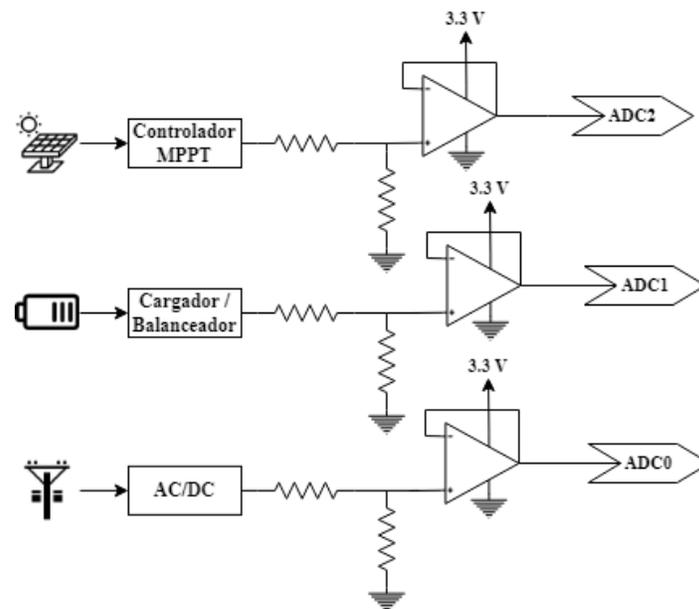


Figura 6. Circuito de medida de voltaje.

Sensores de corriente

Una vez la fuente de alimentación del sistema es seleccionada, esta es dividida en dos partes: La lámpara y los reguladores para los sensores. Se realiza esta separación para usar dos sensores de corriente para medir el consumo de la lámpara de forma individual a todo el sistema. Para este fin se hace uso del sensor de corriente LTC2946, el cual cuenta con una interfaz I2C para enviar los datos leídos al microcontrolador de forma digital. Se priorizan este tipo de interfaces en la selección de componentes debido a que se puede compartir un mismo bus para todos los esclavos del sistema, por lo que se pueden ahorrar pines. El circuito integrado cuenta

con alertas programables en caso de que el valor de la corriente este por fuera de un margen determinado. También cuenta con dos pines para establecer la dirección del dispositivo (*ADDR1* y *ADDR0*), la hoja de datos del dispositivo proporciona una tabla de direcciones en función de la conexión de los pines; de esta forma se establecen las direcciones *0xDE* y *0xD2*, para el sensor de corriente de la lámpara y el de los sensores respectivamente.

El circuito integrado cuenta con un ADC interno que mide el voltaje entre la resistencia shunt ubicada entre las terminales *sense+* y *sense-*, el valor se convierte a un formato digital y se envía por medio del bus I2C cuando dicho valor es solicitado. También cuenta con alertas programables, en caso de que el de corriente exceda o decaiga por debajo de un valor se envía una señal por el pin *GPIO3*, para hacer llamado a una ISR en el MCU. Los pines GPIO del circuito integrado pueden ser usados para propósito general o como en nuestro caso como alertas en caso de que la corriente exceda un rango que puede ser establecido desde el MCU. La figura 7 se muestra la interacción del circuito integrado con el MCU, por lo que se omiten pines.

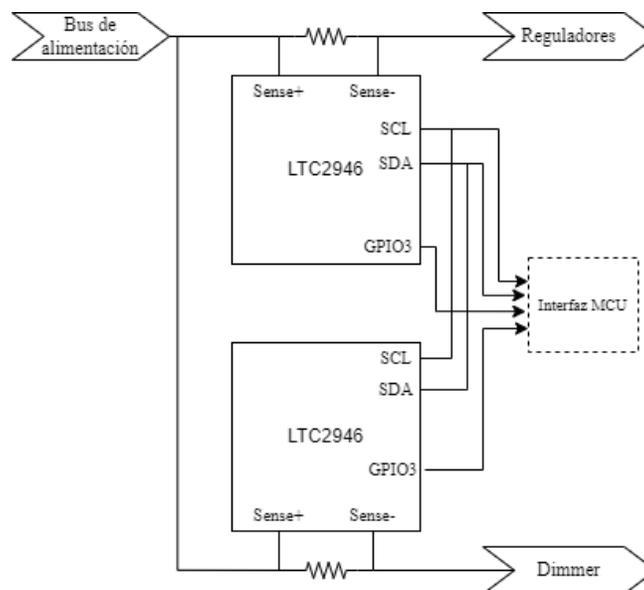


Figura 7. Comunicación de los sensores de corriente con el MCU.

Dimmer y lámpara LED

Para la variación del brillo de la lámpara LED se hace uso del circuito integrado LT3761. Este circuito integrado es según su hoja de datos un controlador DC/DC diseñado para operar como fuente corriente constante y un regulador de voltaje constante. Esta propiedad de mantener constante su corriente o voltaje le da algunas aplicaciones de carga de baterías o super capacitores. En el contexto del proyecto se usará para suministrar corriente constante a la lámpara LED y permitir el cambio de brillo a partir de una señal de control PWM proporcionada por el MCU. El controlador ofrece aislamiento de la parte de control y la de potencia y adicionalmente garantiza corriente constante en la carga. La topología para utilizar en el diseño es la mostrada en la figura 8, la cual fue proporcionada por el fabricante en su hoja de datos; esta topología permite hacer uso de un PWM externo de 30 kHz, el único cambio respecto a esta es la resistencia shunt en serie a la lámpara LED para medir la corriente que pasa por esta, la cual fue recalculada para un paso de 5A.

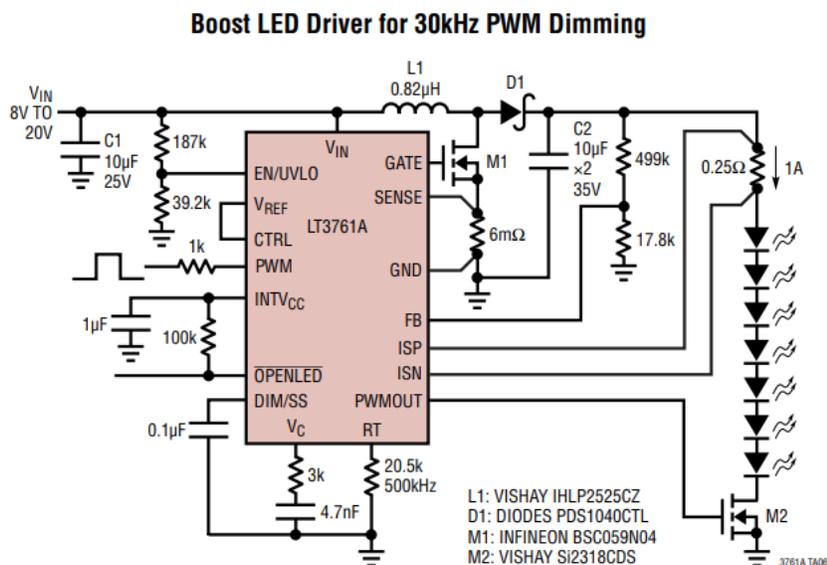


Figura 8. Topología del circuito dimmer. Tomada de la hoja de datos del fabricante.

Reguladores de voltaje

En la etapa de regulación se usan circuitos integrados que permitan obtener los valores de voltaje para los diferentes componentes que necesitan alimentación por parte de la tarjeta de potencia. Cada uno de estos circuitos integrados son reguladores con entradas de voltaje mayores a 24 voltios, con salida fija de un voltaje determinado para que esta sea lo más precisa posible al voltaje deseado y con baja caída de voltaje o voltaje dropout.

Se encuentran entonces 5 circuitos integrados de regulación: uno por cada tarjeta de cómputo en el borde para un total de 2, uno de 5 y otro de 3.3 voltios para sensores adicionales y por último uno de 16V para la carga de la batería. Los reguladores tienen salida directa, es decir, cualquier sensor o dispositivo externo el cual vea satisfecho sus requerimientos de alimentación puede conectarse al puerto en cuestión, sin necesidad de una señal de control del MCU, a diferencia del regulador para alimentar el cargador de la batería, el cual es controlado por el MCU mediante un relé para permitir o no la carga de la batería. En la tabla 3 se muestran los circuitos integrados usados, su voltaje y uso.

Referencia	Voltaje	Uso
BAJ6DD0T	16 V	Cargar batería y alimentar el balanceador
LM1085IT-12	12 V	Alimentación tarjeta de cómputo en el borde
LM1085IT-12	12 V	Alimentación tarjeta de cómputo en el borde
LM1085IT-5.0	5 V	Alimentación de propósito general
LD1117ADT33TR	3.3 V	Alimentación de propósito general

Tabla 3. Reguladores de voltaje a usar en la etapa de regulación

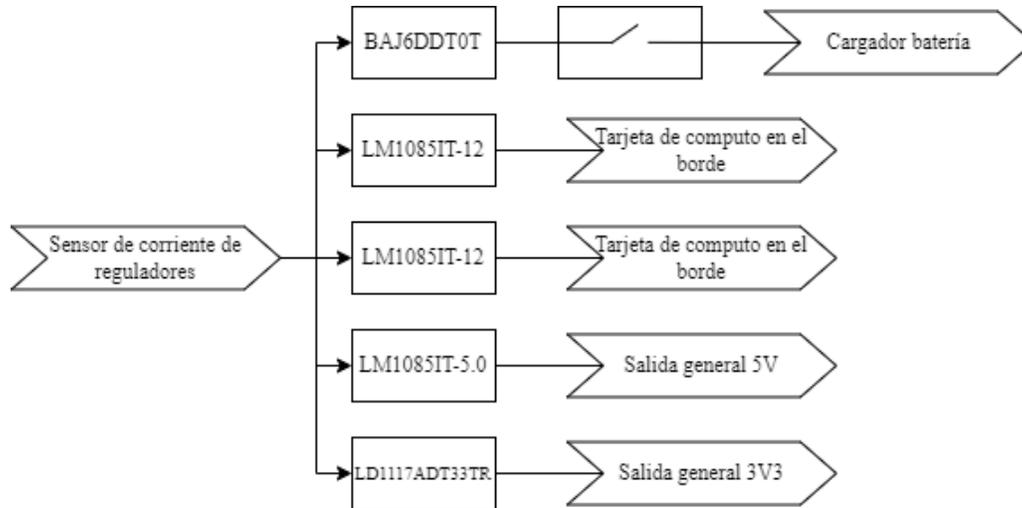


Figura 9. Diagrama de bloques de la etapa de regulación

Subsistema de control

Para generar las señales de control requeridas por la tarjeta de control se hace uso del microcontrolador Raspberry Pi Pico. Se desarrolla entonces otra tarjeta estrictamente relacionada con el microcontrolador y otros sensores adicionales, esto con el fin de disminuir el ruido electromagnético generado por los relés y altas corrientes que circularán por la tarjeta de potencia, a esta tarjeta se le denominará de ahora en adelante la tarjeta de control.

En la tarjeta de control también se añaden los sensores relacionados directamente con las funcionalidades del poste inteligente. Se hará uso de un sensor de movimiento PIR para detectar el movimiento en la vía, se prioriza la distancia y el ángulo de detección; un sensor de luz ambiental para medir el brillo entregado por la lámpara y mediante su caracterización, conocer si está entregando el brillo correspondiente, para en caso contrario, avisar a la plataforma. Por último, se agrega un sensor magnético para detectar una apertura de la cajuela que contendrá

todo el sistema en su interior y dar aviso con la posición del poste a la plataforma, las coordenadas se obtendrán mediante un módulo GPS que también será agregado en esta tarjeta. Para adecuar el bus I2C se añaden resistencias pull-up. La lista de los sensores usados en la tarjeta de control y sus referencias se muestran en la tabla 4

Referencia	Descripción	Comunicación
LTC2946	Sensor de corriente (Reguladores)	I2C – Dirección 0xD2
LTC2946	Sensor de corriente (Lámpara)	I2C – Dirección 0xDE
Genérico	Reed switch magnético	I/O – Interrupción
Parallax-28032	Sensor de movimiento PIR	I/O - Interrupción
GY30	Sensor de luz ambiental	I2C - Dirección
NEO 6M	GPS	UART

Tabla 4. Sensores seleccionados con sus protocolos de comunicación

En el contexto de poste inteligente donde también prima extender la funcionalidad del poste, se reserva una interfaz UART en caso de que sea quiera conectar una tarjeta extra que pueda resultar útil para distintos procesos de la ciudad que requieran de una información determinada. Este tipo de modularidad otorga una capa de personalización del poste para que pueda adaptarse a las diferentes necesidades de diversos sectores de la ciudad.

En el proyecto del grupo de investigación SISTEMIC es necesario recopilar los diferentes datos y enviarlos a un servidor remoto, era necesario pensar en una forma para realizar este cometido. Sin embargo, en el proyecto se decidió que la tecnología por la cual se iba a realizar dicha comunicación era mediante LoRaWAN. Por lo que el poste contará con un end-node el cual se enlazará a un Gateway y le enviará la información de consumo del poste, eventos reportados por las tarjetas de cómputo en el borde y datos de la tarjeta de expansión en caso de

que haya una conectada. El nodo LoRaWAN cuenta con una interfaz UART por la cual recibe comandos AT y la información que debe enviar.

En la tabla 5 se muestran los pines reservados en el microcontrolador, sus funcionalidades y tipo de pin.

Pin	Tipo	Componente/Función
GP26	ADC	Medida 24V (AC/DC)
GP27	ADC	Medida 14.8V (Batería)
GP28	ADC	Medida 12V (Energía Solar)
GP22	I/O	Switch 24V
GP21	I/O	Switch 14.8V
GP20	I/O	Switch 18V
GP2	I2C	Sensores de corriente (SDA)
GP3	I2C	Sensores de corriente (SCL)
GP4	I/O	Interrupción sensor de corriente (Reguladores)
GP5	I/O	Interrupción sensor de corriente (Lámpara)
GP16	I/O	Reed switch magentico (Para apertura)
GP15	I/O	Sensor de movimiento PIR
GP2	I2C	Sensor de luz ambiente (GY30) (SDA)
GP3	I2C	Sensor de luz ambiente (GY30) (SCL)
GP0	UART	UART para tarjeta de expansión (TX)
GP1	UART	UART para tarjeta de expansión (RX)
GP8	UART	Nodo de comunicaciones LoRaWAN (TX)
GP9	UART	Nodo de comunicaciones LoRaWAN (RX)

GP14	I/O	Habilitar carga de batería
GP6	I/O	Encender lámpara sin control de brillo (En caso de que el dimmer no funcione)
GP7	I/O	PWM para control de brillo
GP19	UART	GPS (TX)
GP18	UART	GPS (RX)

Tabla 5. Pines del microcontrolador a usar.

Estructura del firmware

El firmware se encuentra separado por capas, la más alta corresponde a la capa de aplicación, donde se encuentran las diferentes que son ejecutadas por el sistema operativo, el cual se encuentra en una capa por debajo de la de aplicación. Por otro lado, se desarrollan una serie de librerías para interactuar con el hardware, para separar el archivo donde se programan las tareas y se invocan funciones del sistema operativo. Estas librerías son las llamadas librerías de gestión, como `lightManager` para lo relacionado al hardware de la iluminación, `supplyManager` para el hardware de la potencia y alimentación, y por último la librería `comManager` que contiene lo relacionado a la interacción con el módulo LoRaWAN. Cada una se encarga de obtener información del proceso para el cual fueron diseñadas a partir de sensores e interactuar con los pines del microcontrolador, como, por ejemplo, cerrar o abrir un relé. Estas funciones son llamadas en las respectivas tareas para que deban ser ejecutadas en el momento oportuno.



Figura 10. Capas del firmware.

Como se llevan a cabo diferentes tareas que tienen diferentes niveles de dependencia, como por ejemplo la comunicación, que debe esperar a que los valores de todos los sensores sean leídos; se decidió hacer uso de un sistema operativo, en este caso *FreeRTOS*, el cual es gratuito, de código abierto y cuenta con un port para el microcontrolador Raspberry Pi Pico.

Inicialmente se definen 4 etapas principales que agrupan las diferentes tareas: Inicialización, lectura, gestión y comunicación. Todas a excepción de la etapa de inicialización son periódicas. Para este fin se crea una tarea que se lanza periódicamente que habilita las tareas de la etapa de lectura: Comunicación con tarjeta de expansión, lectura de sensores y comunicación con tarjetas del borde. La lectura de sensores habilita dos tareas de la etapa de gestión: Gestión de iluminación y Gestión de potencia; estas dos tareas se ejecutan inmediatamente en dos eventos concretos, interrupción por detección de movimiento por el sensor PIR para la tarea de gestión de iluminación y una alerta derivada de los sensores de corriente para el caso de la tarea de la gestión de potencia. También ambas tareas lanzan

inmediatamente la tarea de comunicación de forma prioritaria en caso de detectar un mal funcionamiento de la lámpara o una alerta de potencia/consumo, de lo contrario habilitan la tarea de armado de paquetes junto con las otras dos tareas de comunicación. La tarea dedicada al armado de paquetes espera que las 4 tareas mencionadas anteriormente terminen su ejecución, y contar con los datos necesarios para armar los paquetes que se enviarán posteriormente en la tarea de gestión de la comunicación. Un diagrama completo de las tareas, interrupciones y demás es mostrado en la figura 11.

Para que las tareas se ejecuten en el orden adecuado se hace uso de una característica que ofrece FreeRTOS llamada grupos de bits. Se trata de una agrupación de bits que pueden ser cambiados de estado dependiendo de eventos que puedan suceder, el encargado de esto es el sistema operativo mediante operaciones que se ejecutan de la forma más determinista posible. Las tareas se pueden configurar para esperar uno o varios bits y pasar al estado ready y ser ejecutadas posteriormente por el scheduler del sistema operativo.

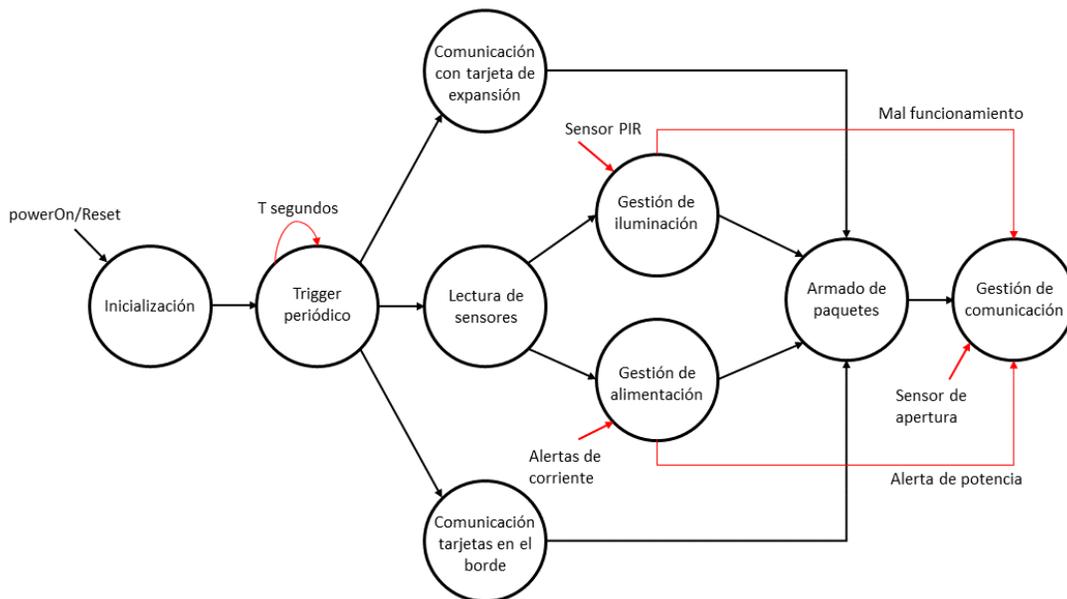


Figura 11. Diagrama de las tareas del firmware. Las flechas indican la tarea que habilitan a continuación. En color rojo aparecen interrupciones del sistema.

Por ejemplo, la tarea “Lectura de sensores” únicamente espera un bit para pasar al estado ready, la tarea “Armado de paquetes” espera cuatro bits que son puestos en 1 al final de cuatro tareas y la tarea “Gestión de la iluminación” puede ser despertada por una interrupción o cuando la tarea “Lectura de sensores” llega a su final. Es por esto por lo que la ejecución de las tareas puede hacerse en un orden lógico y estableciendo condiciones para ello a través de su creación y especificando que bits esperar y si deben esperar a todos para pasar al estado ready.

En el diagrama de la figura 11 se encuentran unas líneas de color rojo que representan event bits que son puestos en 1 mediante una interrupción. Estas corresponden al sensor PIR cuando detecta movimiento, el sensor de apertura y alertas de corriente generadas por los sensores. Las funciones de atención a interrupción que se usan son las proporcionadas por FreeRTOS debido a que ofrecen una solución determinista, lo cual es importante de cara a que no se interrumpa el flujo de ejecución del sistema operativo, lo cual no es garantizado si se usa el SDK del MCU.

Tarea: Gestión de la iluminación

La tarea de gestión de la iluminación es la encargada de cambiar los niveles de brillo de la lámpara y comprobar mediante los datos proporcionados por los sensores, el buen funcionamiento de esta. La tarea se llama de forma excepcional cuando, mediante una interrupción generada por el sensor PIR al detectar movimiento hace set de un bit de evento que lanza esta tarea. También es llamada de forma automática en el ciclo de tareas que de forma normal lleva a cabo el scheduler. La tarea también se encuentra en capacidad de despertar la tarea de comunicación de forma inmediata (Sin pasar por el gestor de paquetes) para que esta

inicie una comunicación de emergencia en caso de que la lámpara no reporte brillo cuando debería estar encendida. Con el fin de monitorear el funcionamiento de la lámpara se tienen 3 estados diferentes, los cuales son descritos con la acción a tomar por el sistema en la tabla 6.

Estado	Descripción	Acciones
EXPECTED	El brillo medido corresponde con el esperado, dado el PWM entregado a la lámpara	Ninguna
UNEXPECTED	El brillo medido no corresponde con el esperado dado el PWM entregado a la lámpara	Reporte periódico de mal funcionamiento a la central
NOT_WORKING	El brillo medido es nulo o demasiado bajo	Alerta inmediata y periódica a la central

Tabla 6. Estados de funcionamiento de la lámpara

El cambio en el nivel de brillo ocurre mediante una función que se ejecuta cuando se atiende a la interrupción del sensor PIR. Cuando el movimiento es detectado la función es llamada y aumenta el ciclo de dureza de la señal para aumentar el brillo, al mismo tiempo que inicializa un timer para llamar otra interrupción que disminuya el duty y por consiguiente el brillo después de un tiempo determinado. Si una interrupción es generada mientras el brillo se encuentra en su punto máximo, el timer de disminución de brillo es reiniciado. El tiempo de brillo máximo, el brillo máximo y mínimo pueden ser cambiados en el archivo de configuración del firmware. El diagrama de tiempo de la activación del timer y el sensor PIR se muestra en la figura 12.

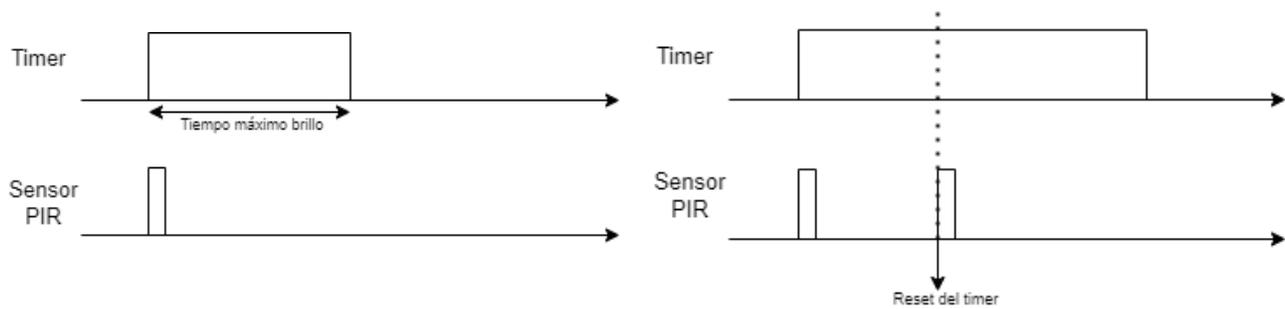


Figura 12. Diagrama de tiempo de la interrupción del sensor PIR.

Para contar con registro de los eventos y acciones de control tomadas por la tarea y, en resumen, su telemetría, se lleva un registro de eventos de estas acciones ejecutadas. Las acciones y su descripción se muestran en la tabla 7

Acción de control	Descripción
INCREASE_BRIGHT	Se aumentó el brillo de la lámpara
DECREASE_BRIGHT	Se disminuye el brillo de la lámpara
OP_MODE_CHANGED	Cambia el modo de operación

Tabla 7. Acciones ejecutadas por la tarea de iluminación.

Tarea gestión de alimentación

La tarea de la gestión de alimentación es la encargada de recibir los datos de los sensores de corriente y el voltaje de las fuentes de alimentación. En función estos datos, la tarea toma decisiones como cambiar la fuente de alimentación, cambiar el estado de operación del sistema y en casos de emergencia despertar a la tarea de comunicación de forma prioritaria. Cuando se realiza un cambio de fuente de alimentación la tarea interactúa con los pines del MCU y desconecta el relé de la fuente actual, inicializa un temporizador que genera una alerta después de un tiempo determinado para conectar la otra fuente de alimentación deseada. Se hace uso de este tiempo de seguridad para evitar cortocircuitos y otro tipo de inconvenientes eléctricos, este tiempo se eligió en base a la hoja de datos de los relés usados en el sistema, sin embargo, puede ser cambiado mediante el archivo de configuración del firmware. El diagrama de tiempo del cambio de fuente se muestra en la figura 13.

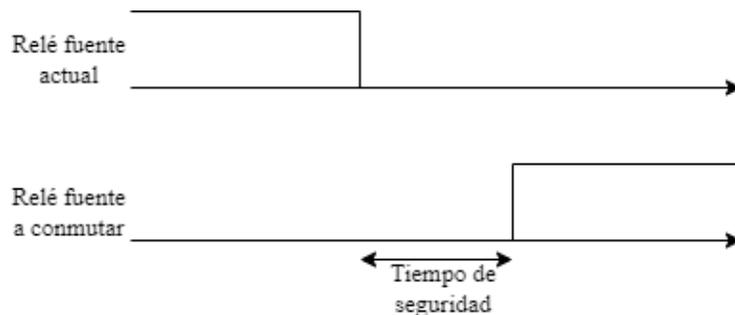


Figura 13. Diagrama de tiempo del cambio de fuente de alimentación.

Para monitorear y dar aviso del estado del sistema, la tarea cuenta con 3 macros que definen el estado de lo relacionado a la potencia y consumo del sistema. Estas macros son mostradas en la *tabla 8*.

Estado	Descripción	Acciones
OK	El sistema funciona correctamente	Ninguna
LOW_POWER	Baja potencia suministrada por la fuente de alimentación actual	Cambiar de fuente, si persiste cambiar a modo ahorro de energía
OVER_VOLTAGE	Sobre voltaje en la fuente de alimentación actual	Desconectar la fuente y guardar registro del evento
OVER_CURRENT	Exceso de corriente suministrada por la fuente de alimentación actual	Desconectar la fuente y guardar registro del evento
NO_POWER	Sin energía	Comunicación de emergencia y modo ahorro de emergencia

Tabla 8. Estados de la tarea de alimentación.

En el firmware también se definen modos de operación del sistema, los cuales son cambiados únicamente por la tarea gestión de alimentación y en función de las medidas de potencia y los eventos que pueden ocurrir. Estos modos de operación son comunes a todas las tareas, las cuales cambian su comportamiento en base al modo en el que se encuentra el sistema. Por ejemplo, durante el modo ahorro de energía se ralentiza la comunicación con la estación base

y el brillo máximo de la lámpara cuando se detecta movimiento es reducido. Los modos de operación, descripción e implicaciones son mostrados en la tabla 9.

Modo de operación	Cuando	Implicaciones
NORMAL_OPERATION	Las condiciones de operación del sistema son normales. No existen alertas de potencia o mal funcionamiento.	Ninguna
POWER_SAVING	El sistema está operando con la batería de respaldo, ya que no hay otra fuente disponible.	Disminución del brillo máximo Disminución en la frecuencia de la comunicación con la estación base Disminución de la velocidad de procesamiento del MCU y de las tarjetas de cómputo en el borde
EMERGENCY_OPERATION	Cuando hay alertas generadas por potencia, bajo voltaje en la batería de respaldo, la lámpara no enciende, etc.	Las mismas que el modo ahorro de energía Si el fallo es por alto voltaje, corriente o peligro de corto circuito el sistema desconectará las fuentes de alimentación por seguridad

Tabla 9. Modos de operación del sistema establecidos por la tarea de alimentación.

La tarea de gestión de la alimentación también lleva a cabo acciones de control en el sistema, interactuando con el hardware, por lo que se lleva un registro de estas para construir una telemetría completa de la tarea. Las acciones que la tarea puede realizar son mostradas en la tabla 10.

Acción	Descripción
CLOSE_RELAY	Se cierra un relé
RELEASE_RELAY	Se abre un relé
SUPPLY_CHANGED	Cambio de fuente de alimentación
MAX_CURRENT_TRHESHOLD_CHANGED	Se cambia el máximo valor de corriente para que sea generada una alerta
MIN_CURRENT_TRHESHOLD_CHANGED	Se cambia el mínimo valor de corriente para que sea generada una alerta
OP_MODE_CHANGED	Se cambia el modo de operación del sistema

Tabla 10. Acciones ejecutadas por la tarea de alimentación.

Parámetros del poste

El firmware cuenta con diversos parámetros fundamentales para su funcionamiento que pueden ser cambiados. Estos parámetros son compartidos con todas las tareas y el sistema mediante un encabezado llamado *smartPoleConfig.h*; allí también son declarados los eventos y acciones de control que realizan las tareas, los cuales han sido enunciados con anterioridad. En la tabla 11 se muestran los parámetros y su descripción. En caso de que se realice o se desee añadir otro tipo de comportamientos, eventos, acciones y funcionalidades al firmware en el futuro se recomienda añadir estos parámetros en este archivo para que todo el sistema tenga acceso a ellos.

Parámetro	Descripción
DEBUGLOG_MODE	Imprime mensajes para realizar debug
PERIOD_TRIGGER_TASK	Periodo en el que se lanza la tarea trigger periódica en milisegundos
MAX_BRIGHT_TIME	Tiempo en milisegundos que dura la lámpara con el brillo máximo
MAX_BRIGHT_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo máximo de la lámpara cuando se detecta movimiento en condiciones normales
MIN_BRIGHT_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo mínimo de la lámpara cuando se detecta movimiento en condiciones normales
MAX_BRIGHT_ENERGY_SAVING_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo máximo de la lámpara cuando se detecta movimiento en modo ahorro de energía
MIN_BRIGHT_ENERGY_SAVING_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo mínimo de la lámpara cuando se detecta movimiento en modo ahorro de energía
MAX_BRIGHT_EMERGENCY_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo máximo de la lámpara cuando se detecta movimiento en modo de emergencia
MIN_BRIGHT_EMERGENCY_DUTY	Ciclo de dureza para el brillo mínimo de la lámpara cuando se detecta movimiento en modo ahorro de energía
LAMP_PWM_FREQUENCY	Frecuencia en Hz de la señal PWM que controla la lámpara

RELAY_RELEASE_TIME	Tiempo en milisegundos que tarda en desconectarse un relé completamente. Generalmente se especifica en la hoja de datos del fabricante
--------------------	--

Tabla 11. Macros de configuración del firmware.

Cabe aclarar que los valores anteriores no representan ningún tipo de overhead o consumo de recursos extra, debido a que son definidos como macros.

Resultados y análisis

Simulaciones

A lo largo del desarrollo del sistema se realizaron una serie de cálculos basados en las necesidades eléctricas del sistema, como por ejemplo la necesidad de polarizar las bobinas de los relés, lo cual lleva a una elección de resistencias para los transistores que hacen esto posible. Para estos fines de elección de componentes se hizo uso de la teoría de circuitos y para la verificación del correcto análisis se llevaron a cabo una serie de simulaciones para diversos subsistemas que conforman el proyecto. Todas las simulaciones fueron hechas en el software LTSpice.

Se simuló la medida de voltaje para verificar que todas las fuentes de alimentación cuando entregaban el voltaje máximo, el voltaje del pin en el microcontrolador fuera 3.3V, asegurando así que fuera a ocasionar daños en el dispositivo, además, de que el buffer que se añadió para evitar una caída de voltaje si fuera efectivo. Para esto se puso una resistencia de

150kOhm en paralelo, para emular la impedancia de entrada de uno de los pines del microcontrolador.

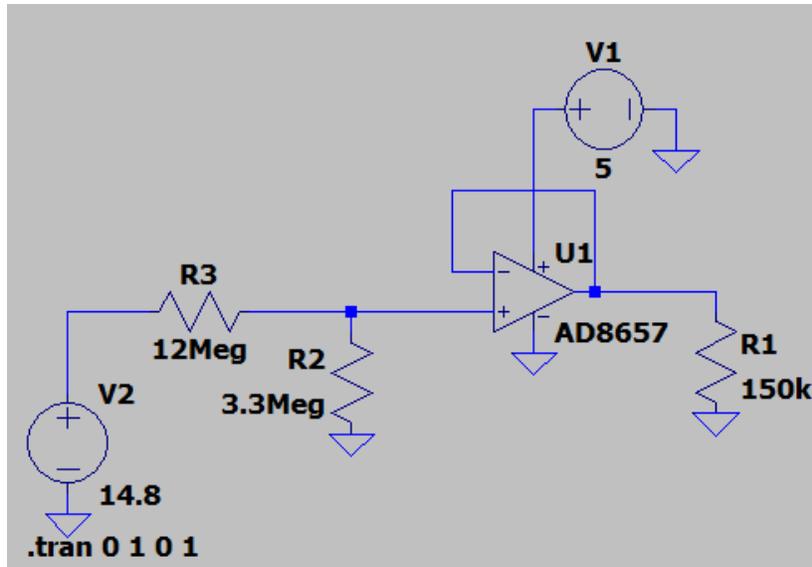


Figura 14. Circuito de medida de voltaje.

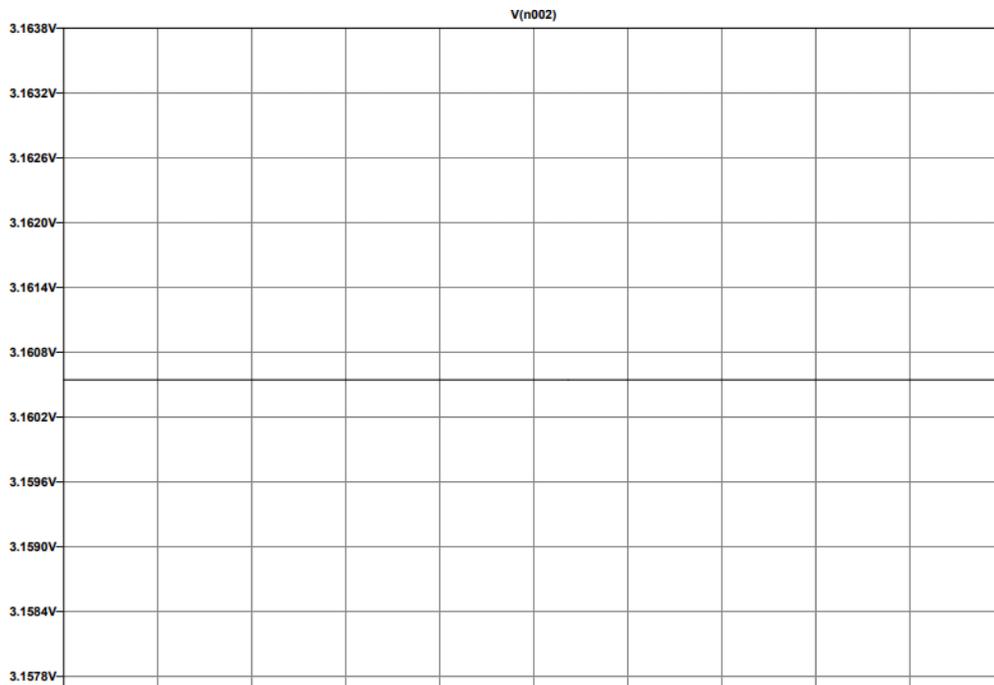


Figura 15. Resultado simulación de voltaje.

Como se puede observar en la figura 15 el voltaje en el pin cuando el voltaje de la batería es máximo (14.8V) no es exactamente 3.3V, esto debido a que para la simulación se usaron resistencias con valores comerciales, por lo que el divisor de voltaje no es exacto. Sin embargo, el valor de 3.16V es bastante cercano al valor deseado.

Se realiza otra simulación para probar la selección y valores de los componentes que permiten la polarización de la bobina de los relés. Se usaron los valores comerciales más cercanos a los calculados y se añade una resistencia de 31 ohm para emular la resistencia de la bobina del relé. El circuito por simular se muestra en la figura 16. Se realiza el saturado del transistor en la primera mitad de la simulación y se lleva a región de corte en la segunda, aplicando un voltaje de aproximadamente 3.3v, el cual es el entregado por los pines del microcontrolador. Se observa en la figura 18 el escalón de la fuente en 3.3v y el voltaje en la resistencia R2, la cual simboliza la bobina del relé, la cual cuenta con un voltaje aproximado a 5V. El voltaje es cercano a los 5v, esta caída de voltaje se presenta debido a la caída de voltaje entre las terminales colector emisor del transistor, que puede ser alrededor de 0.2V.

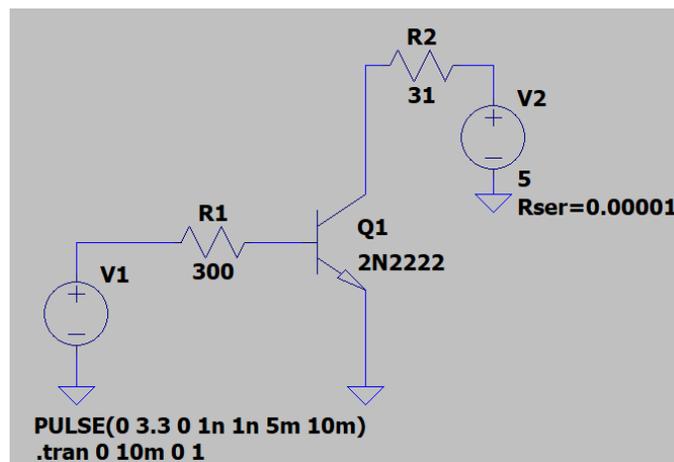


Figura 16. Circuito para simular la polarización de una bobina de un relé

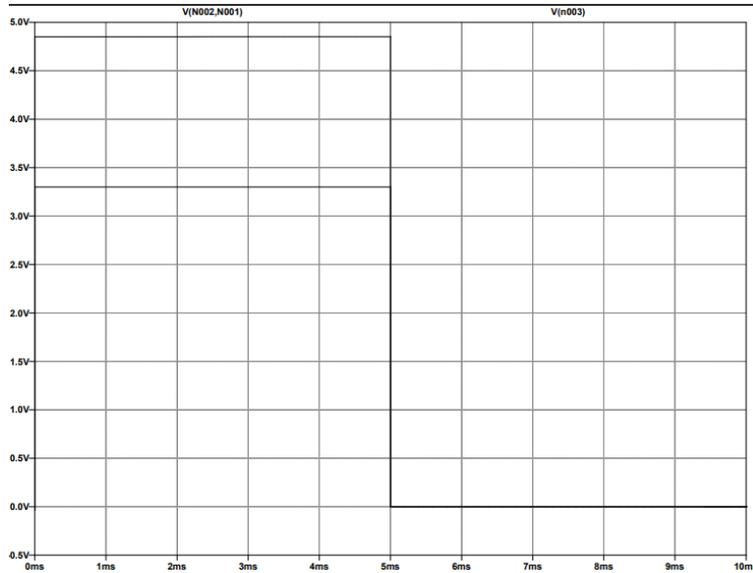


Figura 17. Resultado de la simulación del circuito de polarización de relé.

Por ultima se realiza la simulación del circuito integrado que hace posible el control de brillo la lámpara LED y regula la corriente que pasa por esta, para que sea constante. Se usó el modelo del circuito integrado LT3761 con el que cuenta el simulador LTSpice, debido a que es propiedad de Analog Devices. Se realizó el montaje de la topología indicada en la figura 18 y se añadieron diodos LED en serie para intentar simular la lámpara.

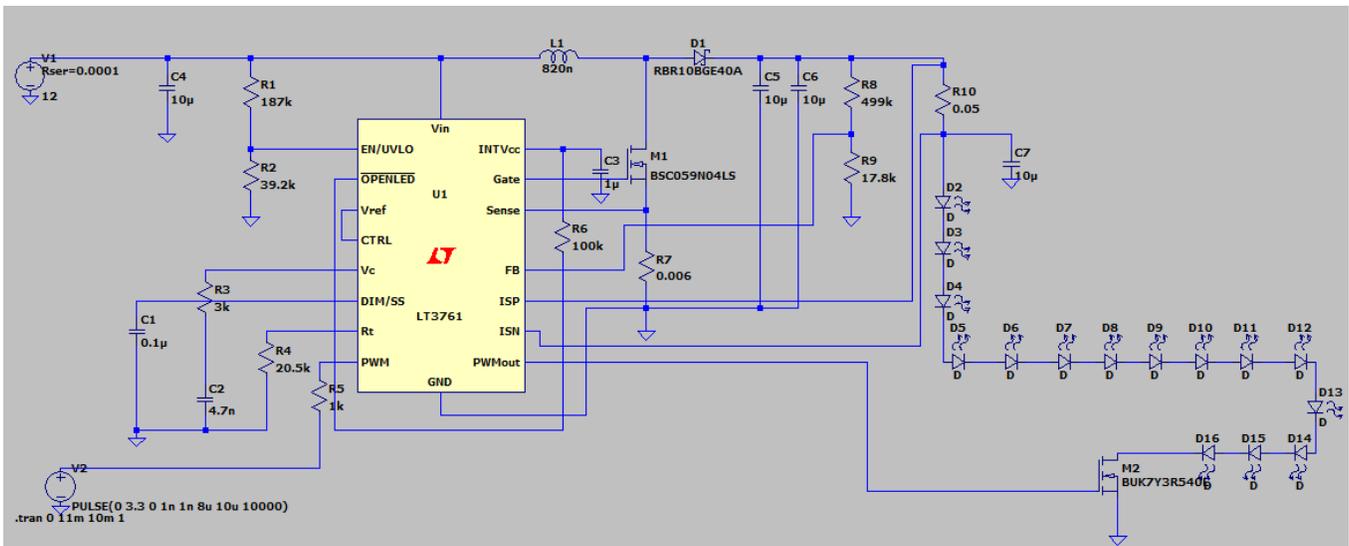


Figura 18. Topología por simular para el circuito integrado LT3761.

Para las pruebas se usa una fuente pulsada con un 80% de ciclo de dureza para simular el PWM. En la figura 19 se observa el voltaje que cae en la serie de bombillos LED tiene un comportamiento pulsado, aunque los pulsos se encuentran un poco deformados, pero conservan su forma cuadrada. Se observa también que la caída de voltaje promedio es de 12.5V. De igual forma la corriente también tiene un comportamiento pulsado, aunque presenta una distorsión mayor, sin embargo, tiene un comportamiento pulsado y en promedio su valor es de 4 amperios.

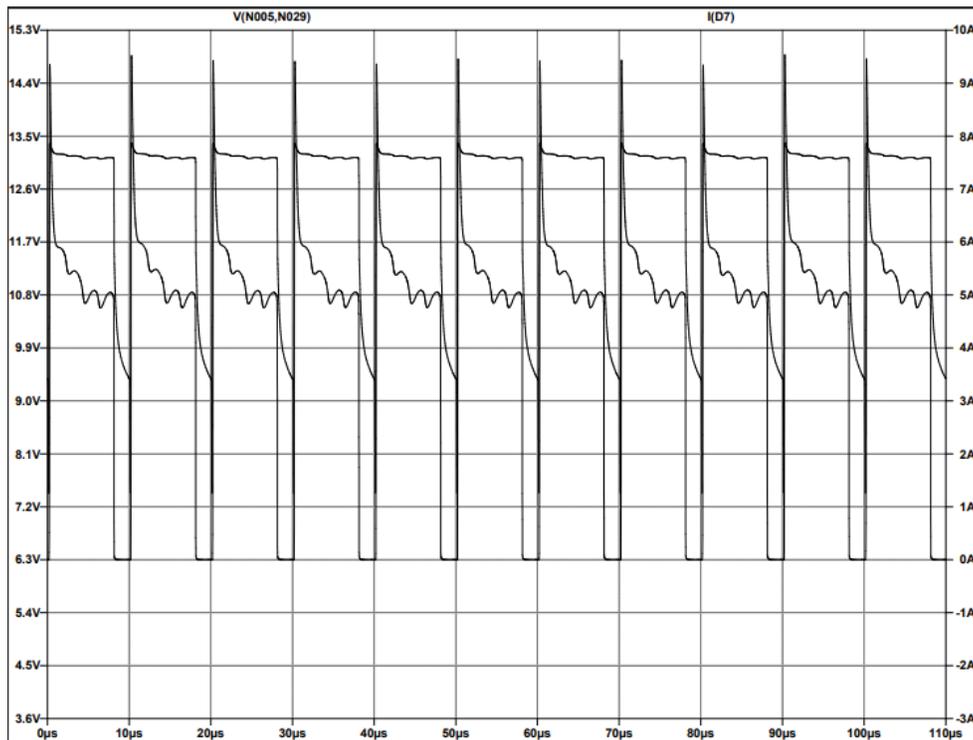


Figura 19. Resultado de la simulación del circuito integrado LTT3761.

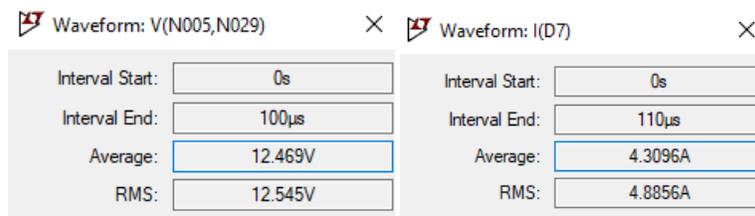


Figura 20. Valores promedio del voltaje y la corriente de la serie de diodos LED en la simulación de la figura 19.

Los resultados de corriente y voltaje son esperados dado el ciclo de dureza de 80%, ya que se tienen valores de potencia de 53W, cercanos a los 60W nominales de la lámpara. Se especula que al aumentar el ciclo de dureza al 100% los valores serán aún más próximos, sin embargo, esta hipótesis no se comprobó debido a que por encima del 90% de ciclo de dureza la simulación deja de funcionar y entrega valores incoherentes o directamente falla.

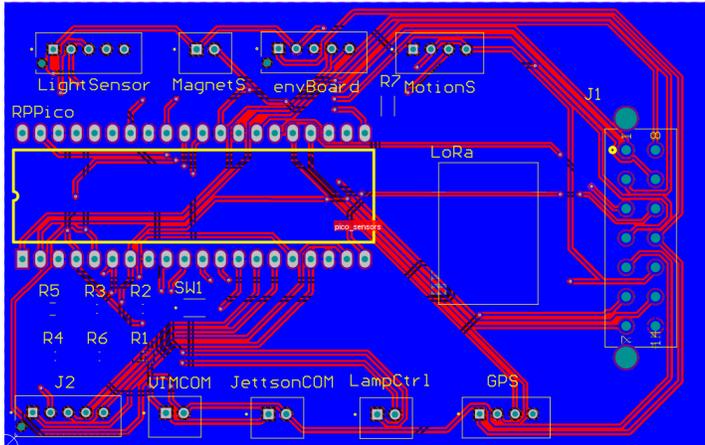
En el futuro se espera caracterizar el brillo de la lámpara en función del ciclo de dureza del PWM para darle la facultad al firmware de diagnosticar cualquier problema que pueda tener la lámpara.

BOM y esquema eléctrico final

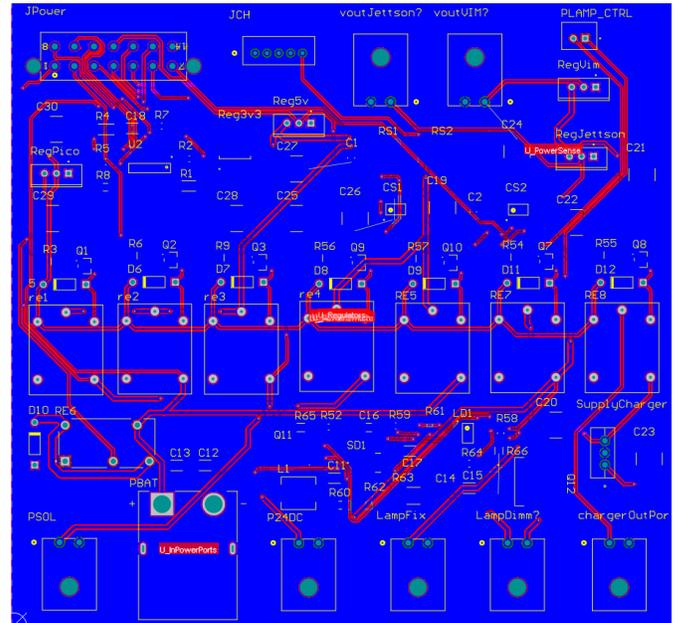
Se realizó una lista de compras para la construcción del primer prototipo funcional. Esta incluye los diferentes elementos electrónicos, las distintas fuentes de alimentación y los sensores que se usaran. No contiene las tarjetas de cómputo en el borde ni las cámaras o micrófonos de las que harán uso porque ya fue considerado en otro apartado del proyecto en el grupo de investigación.

Por otro lado, se realizó de forma completa el esquema eléctrico de la tarjeta de control principal y la tarjeta de potencia. El esquema fue desarrollado en el software Altium.

Rutas de las PCB



(A)



(B)

Figura 21. (A) Distribución de la tarjeta de control. (B) Distribución de la tarjeta de potencia

Pruebas del firmware

En el desarrollo del firmware se realizaron múltiples pruebas para comprobar el funcionamiento correcto de las tareas, interrupciones y demás respuestas ante eventos de interés para el sistema. Adicionalmente se crearon y agregaron las bibliotecas que permiten interactuar con el hardware en las tareas de gestión, tal y como se indicó en el desarrollo del firmware. Estas bibliotecas a facilitarán en un futuro la interacción con el hardware si se desea añadir nuevas funcionalidades o realizar ajustes a las que ya se tienen.

Inicialmente se probó la sincronización de las tareas, mediante la implementación del flujo de funcionamiento del firmware, es decir, se implementaron las tareas con sus respectivas prioridades y sus condiciones para ser despertadas, sin embargo, en su interior solo se ejecuta un print para indicar que la tarea fue ejecutada y evaluar mediante consola la ejecución correcta.

```
---- Opened the serial port COM23 ----  
  
<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ----> Tarea periódica  
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ----> } Tareas de lectura de sensores  
<---- READING ON BOARD SENSORS ----> }  
<---- LIGHT MANAGER TASK ----> } Tareas de gestión  
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ----> }  
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ----> Tarea de lectura de cómputo en el borde  
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ----> } Tareas de manejo de paquetes y comunicación  
<---- COM MANAGER TRIGGERED ----> }  
  
<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ---->  
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ---->  
<---- READING ON BOARD SENSORS ---->  
<---- LIGHT MANAGER TASK ---->  
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ---->  
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ---->  
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ---->  
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
```

Figura 22. Resultado sincronización y orden de las tareas del firmware.

En la prueba mostrada en la figura 22 se muestra la ejecución de las tareas en orden. Inicialmente se ejecuta la tarea periódica que se encarga de habilitar un nuevo ciclo del sistema, luego se leen los sensores de la tarjeta de potencia y la tarjeta de expansión con sensores extra en caso de que esté disponible, una vez se tienen los datos de los sensores de potencia se pueden tomar decisiones con las tareas de gestión de iluminación y alimentación, es por esto por lo que se ejecutan luego. Por último, se leen los datos de cómputo en el borde y las tareas para el armado de paquetes y comunicación. Como se puede observar el orden se mantiene entre los ciclos y respeta la continuidad mostrada en la figura 11.

Se valida también el correcto funcionamiento de la interrupción del sensor PIR y el cambio en el ciclo de dureza de la señal PWM que controlará el brillo de la lámpara. Para este fin se hace uso de un sensor PIR y se visualiza el flujo de las tareas mediante consola para verificar cuando se generan las interrupciones y los procesos que estas desencadenan. El resultado se muestra en la figura 23.

```

---- Opened the serial port COM23 ----
<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ---->
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ---->
<---- READING ON BOARD SENSORS ---->
<---- LIGHT MANAGER TASK ---->
DECREASING LAMP BRIGHTNESS → Se establece el brillo mínimo en ausencia de movimiento
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ---->
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ---->
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ---->
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
<PIR_TRIGGERED INTERRUPT: MOVEMENT DETECTED> → Se genera una interrupción cuando se detecta
movimiento y se establece un timer
<---- LIGHT MANAGER TASK ----> → Se despierta la tarea de iluminación
INCREASING LAMP BRIGHTNESS
INCREASING PWM DUTY CYCLE → El módulo que interactúa con el hardware incrementa el ciclo de dureza

<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ---->
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ---->
<---- READING ON BOARD SENSORS ---->
<---- LIGHT MANAGER TASK ---->
INCREASING LAMP BRIGHTNESS
INCREASING PWM DUTY CYCLE
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ---->
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ---->
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ---->
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
<PIR_OFF INTERRUPT: NO MOVEMENT> → El timer llega al tiempo deseado y mediante
interrupción se reduce el brillo nuevamente

```

Figura 23. Resultado prueba interrupción del sensor PIR.

Se realizaron pruebas para otro tipo de interrupciones como la del sensor reed switch magnético para indicar la apertura del contenedor en el que se ubicará el sistema. Se valida entonces que se realice la debida interrupción prioritaria a la tarea de comunicación, y se entable una comunicación de emergencia.

```

<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ---->
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ---->
<---- READING ON BOARD SENSORS ---->
<---- LIGHT MANAGER TASK ---->
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ---->
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ---->
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ---->
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
SENDING EMERGENCY PACKET. STATUS: BOX_OPEN } Interrupción y lanzamiento de la tarea de
<---- COM MANAGER TRIGGERED ----> } comunicación de forma periódica y prioritaria
SENDING EMERGENCY PACKET. STATUS: BOX_OPEN

```

Figura 24. Resultado prueba interrupción por sensor de cierre magnético.

Se comprobó que cuando la parte magnética del switch se aleja de su otra parte se lanza inmediatamente la interrupción correspondiente que lanza la tarea de comunicación de forma prioritaria para reportar el evento de emergencia, en este caso, para dar aviso de que la caja fue abierta.

También se hicieron pruebas del flujo de datos mediante las colas que comunican las tareas, de que se haga su liberación correspondiente y cada tarea reciba los datos que fueron enviados por otra. Para ilustrar el funcionamiento se usó la tarea LightManager como productora de los datos que son enviados a una cola y la tarea PacketManager como consumidora, la cual extrae los datos de las colas de las tareas para el armado de los paquetes. Se hace únicamente con una cola para que sea más legible el ejemplo en consola.

```
<---- LAUNCHING MEASUREMENT STAGE ---->
<---- READING ENVIROMENTAL SENSORS ---->
<---- READING ON BOARD SENSORS ---->
<---- LIGHT MANAGER TASK ----> Se envía a una cola los datos de la tarea LightManager para la tarea
Sending data to light queue encargada de crear los paquetes de comunicación
Measured light: 49, Expected light: 49, Operation mode: 0, Status: 0
<---- SUPPLY MANAGER TRIGGERED ---->
<---- READING EDGE COMPUTING BOARDS ---->
<---- PACKET MANAGER TRIGGERED ----> La tarea de comunicación recibe los datos de la cola de la tarea
Receiving from light queue LightManager
Measured light: 49, Expected light: 49, Operation mode: 0, Status: 0
<---- COM MANAGER TRIGGERED ---->
```

Figura 25. Resultado prueba producción y consumo de datos entre tareas.

Documentación

En paralelo al desarrollo del firmware se realiza la documentación correspondiente, mediante la utilidad Doxygen, la cual genera una documentación en formato HTML para facilitar su consulta y lectura o para un futuro despliegue en una aplicación web. Doxygen funciona mediante la declaración de etiquetas antes de las funciones, variables o estructuras que se desean

documentar. Las figuras 26 a la 28 muestran partes de la documentación generada mediante el uso de esta herramienta.

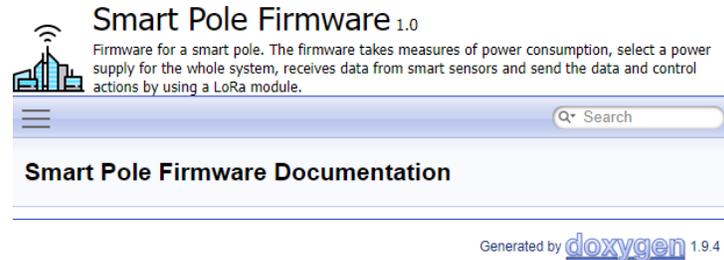


Figura 26. Página principal de la documentación.

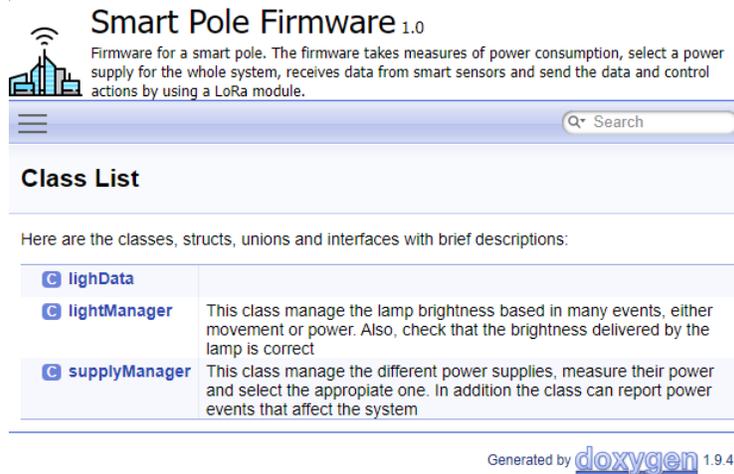


Figura 27. Sección de la lista de clases de la documentación.

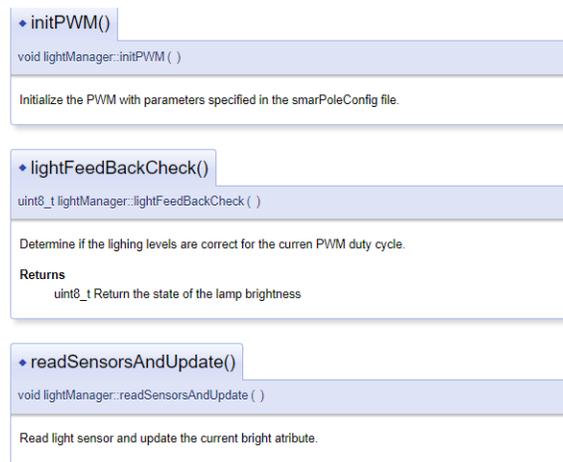


Figura 28. Sección de métodos pertenecientes a una clase. En este caso LighManager,

Conclusiones

Los sensores inteligentes añaden una capa extra de complejidad al poste, en comparación a los encontrados en la literatura. La carga extra en términos energéticos hace que no sea posible alimentar al sistema con una batería durante la noche manteniendo el compromiso de tamaño y peso del sistema.

Los postes del alumbrado público son actores importantes en las ciudades inteligentes, por su presencia a lo largo y ancho de las ciudades, proveen energía y un soporte estructural, lo cual los hace ideales para aplicaciones que necesiten recopilar información de los diferentes procesos de la ciudad por medio de sensores.

En el mercado se encuentran soluciones para energía solar y gestión de energía de alta potencia para aplicaciones domiciliarias e industriales y otros de baja potencia, orientadas a entusiastas. Es por esto que aplicaciones como el poste inteligente desarrollado se encuentran en tierra de nadie al no encajar en las aplicaciones objetivo de este tipo de productos

Referencias bibliográficas

- [1] R. us Saleheen, A. S. Shaikat, S. Islam, and M. R. Rahman, "MOTION BASED AUTOMATIC STREETLIGHT SYSTEM WITH VEHICLE SPEED SURVEILLANCE".
- [2] D. V. Babu, A. S. A. Nisha, D. B. Dhasan, M. Venkatesan, and C. Karthikeyan, "Intelligent high tech street lightning pole for smart city," *Ann Rom Soc Cell Biol*, pp. 13752–13759, 2021.
- [3] S. Kamoji, D. Koshti, J. Noronha, E. Arulraj, and E. Clement, "Deep Learning-based Smart Street Lamps—A Solution to Urban Pollution," in *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2020, pp. 478–482.
- [4] F. Leccese, "Remote-control system of high efficiency and intelligent street lighting using a ZigBee network of devices and sensors," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 21–28, 2012.
- [5] S. AlRuwais, R. AlQahtani, N. AlHajri, B. AlHashim, A. Bashar, and L. AlZubaidi, "S-LIGHT: Smart LED Lamppost using PWM-based Adaptive Light Controller," in *2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, 2021, pp. 325–331.
- [6] A. Sieß *et al.*, "Hybrid City Lighting-Improving Pedestrians' Safety through Proactive Street Lighting," in *2015 International Conference on Cyberworlds (CW)*, 2015, pp. 46–49.
- [7] F. Du, X. Huang, A. Pan, X. Qi, and Z. Niu, "Development trends and construction strategies of smart city and the ubiquitous power Internet of Things with smart streetlight pole as carrier," in *CIREDD 2020 Berlin Workshop (CIREDD 2020)*, 2020, pp. 679–682.
- [8] R. Kodali and S. Yerroju, "Energy efficient smart street light," in *2017 3rd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, 2017, pp. 190–193.
- [9] S. Ahmad, A. Siddique, K. Iqbal, A. Hussain, and A. Ijaz, "IoT Based Smart Street Lights Empowered By Piezoelectric Sensors," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 10, pp. 341–345, 2021.
- [10] R. Bhargavi and B. Pavitra, "Development of automatic street light illumination and vehicle speed controlling system on ARM7 for roadways," *DEVELOPMENT*, vol. 5, no. 3, 2016.
- [11] P. Saini, P. Saini, A. K. Jangid, and U. Mamodiya, "A smart street light system with auto fault detection," *Pramana Res J*, vol. 8, no. 8, 2018.
- [12] M. Mustafa and M. M. M. Ismail, "SMART STREET LIGHTING SYSTEM BASED ON IOT TECHNOLOGY AND PIEZOELECTRIC SENSORS," *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, vol. 16, no. 61, pp. 1090–1099, 2021.
- [13] C. Ellis, T. R. Vineetha, S. S. Keerthi, S. P. Kalpana, and R. R. Karen, "Internet of Things-based Smart Street System," *REVISTA GEINTEC-GESTAO INOVACAO E TECNOLOGIAS*, vol. 11, no. 4, pp. 5577–5594, 2021.

- [14] M. I. F. Kamardan, A. Z. Annuar, H. A. Zakaria, W. Ahmed, and W. H. W. Hassan, "DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC HARVESTING SYSTEM AS AN ALTERNATIVE RENEWABLE ENERGY FOR AUTOMATED STREET LIGHT IN MALAYSIA," *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, vol. 15, no. 2, 2021.
- [15] P. Rajendhar, J. Belwin Edward, and I. Jacob Raglend, "Energy-Efficient and Emergency Dispatch System for Smart Street Lighting," in *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control*, Springer, 2021, pp. 3221–3233.
- [16] K. Y. Rajput, G. Khatav, M. Pujari, and P. Yadav, "Intelligent street lighting system using gsm," *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. 2, no. 3, pp. 60–69, 2013.
- [17] A. Athiramkumar, D. Palpandi, and K. Satheesh, "SOLAR BASED STREET LIGHT WITH AUTO INTENSITY CONTROL," *Turkish Journal of Physiotherapy and Rehabilitation*, vol. 32, p. 3.
- [18] K. Nanavati, H. Prajapati, H. Pandav, K. Umariya, and N. Desai, "Smart Autonomous Street Light Control System," *IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering*, vol. 2, no. 10, pp. 729–733, 2016.
- [19] K. Sudheer, D. Madhurita, A. Chandana, M. Thanesh, and M. K. Babu, "Intelligent street light system for smart cities," *International Journal of Applied Science and Computations*, vol. 6, no. 5, pp. 684–690, 2019.
- [20] P. Puig and M. Jofra, *Energías renovables para todos: Solar fotovoltaica*. Haya Comunicación, 2003.
- [21] J. Askola, P. Kärhä, H. Baumgartner, S. Porrasmäa, and E. Ikonen, "Effect of adaptive control on the LED street luminaire lifetime and on the lifecycle costs of a lighting installation," *Lighting Research & Technology*, p. 14771535211008180, 2021.
- [22] P. Karrupusamy, V. E. Balas, and Y. Shi, "Sustainable Communication Networks and Application: Proceedings of ICSCN 2021." Springer.
- [23] H. Khawari and M. Nazem, "Intelligent Lighting Control System Based on Zigbee Communication".
- [24] TheThingsNetwork, "What are LoRa and LoRaWAN?" Sep. 2021. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>
- [25] FreeRTOS, "FreeRTOS - Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions." Sep. 2023. [Online]. Available: <https://www.freertos.org/index.html>