

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES – ITBA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**Módulo para comunicación de mediciones y control de actuadores**

**AUTORES: Bualó, Santiago (Leg. Nº 57557)**

**Martorell, Ariel Antonio (Leg. Nº 56209)**

**Mestanza, Joaquín Matías (Leg. Nº 58288)**

**Regueira, Marcelo Daniel (Leg. Nº 58300)**

**DOCENTES TITULARES: Pingitore, Ricardo Alejandro**

**Orchessi, Walter**

**Ugarte, Alejandro**

**TRABAJO FINAL PRESENTADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**BUENOS AIRES**

**SEGUNDO CUATRIMESTRE, 2020**

# Agradecimientos

TBD

# Índice

## Contenidos

[Agradecimientos 3](#_Toc57111809)

[Índice 4](#_Toc57111810)

[Contenidos 4](#_Toc57111811)

[Lista de Figuras 6](#_Toc57111812)

[Lista de Tablas 6](#_Toc57111813)

[Acrónimos y Definiciones 8](#_Toc57111814)

[Resumen 9](#_Toc57111815)

[1. Introducción 10](#_Toc57111816)

[1.1. Antecedentes. 10](#_Toc57111817)

[1.2. Contexto del proyecto 10](#_Toc57111818)

[2. Objetivos 11](#_Toc57111819)

[2.1. Finalidad del Proyecto 11](#_Toc57111820)

[2.2. Planteamiento del Problema a Resolver 11](#_Toc57111821)

[2.3. Alcance 11](#_Toc57111822)

[3. Definición de Producto 12](#_Toc57111823)

[3.1. Requerimientos de Cliente 12](#_Toc57111824)

[3.1.1. Relevamiento de Datos 12](#_Toc57111825)

[3.1.2. Requerimientos finales para trazabilidad 12](#_Toc57111826)

[3.2. Diagrama Funcional de Interfaces 13](#_Toc57111827)

[3.3. Especificaciones de Diseño. 14](#_Toc57111828)

[3.3.1. Especificaciones Funcionales 14](#_Toc57111829)

[3.3.2. Especificaciones de Interfaz 15](#_Toc57111830)

[3.3.3. Especificaciones de Implementación 17](#_Toc57111831)

[3.3.4. Especificaciones de Servicio (*RAMS*) 18](#_Toc57111832)

[4. Plan de Validación 20](#_Toc57111833)

[4.1. Diseño de Bancos de Pruebas 20](#_Toc57111834)

[4.2. Especificaciones de Tests 22](#_Toc57111835)

[4.3. Matriz de Trazabilidad de Validación 24](#_Toc57111836)

[4.4. Plan de Verificación y Validación 25](#_Toc57111837)

[5. Análisis de Factibilidad 26](#_Toc57111838)

[5.1. Factibilidad tecnológica 26](#_Toc57111839)

[5.1.1. Esquema Modular 26](#_Toc57111840)

[5.1.2. Implementación de módulo <<Unidad de Control>> 26](#_Toc57111841)

[5.1.2.1. Alternativas de diseño 26](#_Toc57111842)

[5.1.2.2. Elección de una solución 27](#_Toc57111843)

[5.1.2.3. Alternativas de diseño 27](#_Toc57111844)

[5.1.2.4. Elección de una solución 28](#_Toc57111845)

[5.1.3. Implementación de módulo <<Alimentación Interna>> 28](#_Toc57111846)

[5.1.3.1. Alternativas de diseño 28](#_Toc57111847)

[5.1.3.2. Elección de una solución 29](#_Toc57111848)

[5.1.4. Implementación de módulo <<Interfaz salidas digitales>> 29](#_Toc57111849)

[5.1.4.1. Alternativas de diseño 29](#_Toc57111850)

[5.1.4.2. Elección de una solución 29](#_Toc57111851)

[5.1.5. Implementación de módulo <<Interfaz entradas analógicas>> 29](#_Toc57111852)

[5.1.5.1. Alternativas de diseño 29](#_Toc57111853)

[5.1.5.2. Elección de una solución 30](#_Toc57111854)

[5.1.6. DFMEA 31](#_Toc57111855)

[5.2. Factibilidad de tiempos. 33](#_Toc57111856)

[5.2.1. Consideraciones 33](#_Toc57111857)

[5.2.2. Planificación (PERT y simulación de Montecarlo) 33](#_Toc57111858)

[5.2.3. Programación (Gantt) 34](#_Toc57111859)

[5.3. Factibilidad económica 35](#_Toc57111860)

[5.3.1. Modelo de Negocios 35](#_Toc57111861)

[5.3.2. Gastos e Ingresos 35](#_Toc57111862)

[5.3.3. Flujo de Fondos 35](#_Toc57111863)

[5.4. Factibilidad legal y responsabilidad civil 35](#_Toc57111864)

[5.4.1. Seguridad 35](#_Toc57111865)

[5.4.2. Certificación 35](#_Toc57111866)

[5.4.3. Normas a considerar 35](#_Toc57111867)

[6. Ingeniería de detalle 37](#_Toc57111868)

[6.1. Hardware 37](#_Toc57111869)

[6.1.1. Diagrama de bloques (hardware). 37](#_Toc57111870)

[6.1.2. Descripción detallada de cada bloque 37](#_Toc57111871)

[6.1.3. Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales de cada bloque 37](#_Toc57111872)

[6.1.4. Plan de pruebas de cada modulo 37](#_Toc57111873)

[6.2. Software 37](#_Toc57111874)

[6.2.1. Diagrama de estados y flujogramas 37](#_Toc57111875)

[6.2.2. Análisis de complejidad 37](#_Toc57111876)

[6.2.3. Descripción de subrutinas 37](#_Toc57111877)

[6.2.4. Listados comentados del código 37](#_Toc57111878)

[6.2.5. Plan de prueba de módulos y de depuración de Software 37](#_Toc57111879)

[7. Construcción del prototipo 38](#_Toc57111880)

[7.1. Definición de los módulos 38](#_Toc57111881)

[7.2. Diseño de los circuitos impresos 38](#_Toc57111882)

[7.3. Diseño mecánico 38](#_Toc57111883)

[7.4. Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje 38](#_Toc57111884)

[7.5. Bill of Materials (BOM) 38](#_Toc57111885)

[8. Validación del prototipo 39](#_Toc57111886)

[8.1. Estudios de confiabilidad de hardware y de software 39](#_Toc57111887)

[8.2. Resultados 39](#_Toc57111888)

[8.3. Evaluación 39](#_Toc57111889)

[8.3.1. Evaluación de resultados técnicos 39](#_Toc57111890)

[8.3.2. Evaluación de la planificación 39](#_Toc57111891)

[8.3.1. Evaluación de la factibilidad financiera 39](#_Toc57111892)

[9. Referencias 40](#_Toc57111893)

[9.1. LIBROS 40](#_Toc57111894)

[9.2. REVISTAS 40](#_Toc57111895)

[9.3. Notas de aplicación 40](#_Toc57111896)

[9.4. Fuentes Online 40](#_Toc57111897)

[10. Anexos Técnicos 41](#_Toc57111898)

[10.1. Esquemáticos 41](#_Toc57111899)

[10.2. Planos de PCB 41](#_Toc57111900)

[10.3. Listado de Partes y Componentes (*BOM*) 41](#_Toc57111901)

[10.4. Códigos de Software 41](#_Toc57111902)

[10.5. Hojas de Datos de Componentes 41](#_Toc57111903)

[10.6. Hojas de Aplicación, etc. 41](#_Toc57111904)

[10.7. Otra Documentación Técnica 41](#_Toc57111905)

## Lista de Figuras

[Figura 3‑1: Diagrama Funcional de Interfaces 13](#_Toc57111906)

[Figura 4‑1: Diagrama de dependencias de Validación 25](#_Toc57111907)

[Figura 5‑1: Esquema modular 26](#_Toc57111908)

[Figura 5‑2: Simulación de Montecarlo – Duración en días 34](#_Toc57111909)

[Figura 5‑3: Simulación de Montecarlo – Fecha de finalización 34](#_Toc57111910)

[Figura 5‑4: Diagrama de Gantt 34](#_Toc57111911)

[Figura 10‑1: Especificaciones de comunicación del calibre 41](#_Toc57111912)

## Lista de Tablas

[Tabla 3.1: Requerimientos 12](#_Toc57111933)

[Tabla 3.2: Leyenda de uso en especificaciones 14](#_Toc57111934)

[Tabla 3.3: Especificaciones Funcionales 14](#_Toc57111935)

[Tabla 3.4: Especificaciones de Interfaz S-IN 15](#_Toc57111936)

[Tabla 3.5: Especificaciones de Interfaz S-OUT 15](#_Toc57111937)

[Tabla 3.6: Especificaciones de Operación 17](#_Toc57111938)

[Tabla 3.7: Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética 18](#_Toc57111939)

[Tabla 3.8: Especificaciones de costos 18](#_Toc57111940)

[Tabla 3.9: Especificaciones de Confiabilidad 18](#_Toc57111941)

[Tabla 3.10: Especificaciones de Disponibilidad 18](#_Toc57111942)

[Tabla 3.11: Especificaciones de Mantenibilidad 18](#_Toc57111943)

[Tabla 3.12: Especificaciones de Seguridad 19](#_Toc57111944)

[Tabla 4.1: Tests de Performance 23](#_Toc57111945)

[Tabla 5.1: Alternativas de diseño para Unidad de Control 27](#_Toc57111946)

[Tabla 5.2: Alternativas de diseño para Microcontrolador 28](#_Toc57111947)

[Tabla 5.3: Alternativas de diseño para el módulo de Alimentación Interna 28](#_Toc57111948)

[Tabla 5.4: Alternativas de diseño para la Interfaz de salidas digitales 29](#_Toc57111949)

[Tabla 5.5: Alternativas de diseño para Interfaz de entradas analógicas 29](#_Toc57111950)

[Tabla 5.6: Tareas estipuladas con las duraciones estimadas 33](#_Toc57111951)

[Tabla 5.7: Flujo de Fondos 35](#_Toc57111952)

# Acrónimos y Definiciones

|  |  |
| --- | --- |
| Acrónimo | Descripción |
| AC | Corriente Alterna (*Alternate Current*) |
| ADC | Conversor de señal analógica a digital (*Analog to Digital Converter*) |
| DC | Corriente Continua (*Direct Current*) |
| EMC | Compatibilidad Electromagnética (*ElectroMagnetic Compatibility*) |
| HW | *Hardware* |
| HFE | Parámetro de ganancia de corriente continua de un transistor bipolar de juntura |
| SW | *Software* |
| TBD | *To Be Determined* |
| TBC | *To Be Confirmed* |
| VAC | Volts de corriente alterna (AC) |
| VCE0 | Tensión de ruptura entre Colector y Emisor de un transistor bipolar de juntura |
| VDC | Volts de corriente continua (DC) |
| POE | Alimentación a través de Ethernet (*Power Over Ethernet*) (ver definiciones) |

|  |  |
| --- | --- |
| Término | Definición |
| Industria 4.0 | Comúnmente se la refiere como la cuarta revolución industrial. Describe la creciente tendencia hacia la automatización y el intercambio de datos en tecnología y procesos dentro de la industria manufacturera, que incluye conceptos actuales como IoT (*Internet Of Things*). Además, realiza simulaciones de planta para evaluar la toma de decisiones óptimas y descentralizadas. |
| Pull Up | Refiere al concepto de fijar un estado lógico alto cuando la entrada o salida sobre la que se realiza el pull-up se encuentre en estado de alta impedancia (o circuito abierto). |
| Power Over Ethernet | Es un estándar de la IEEE que permite fusionar señales de potencia con señales de internet de datos. Se verá con mas detalle a lo largo del trabajo. |

# Resumen

El presente informe de proyecto final de la carrera de Ingeniería Electrónica plantea una problemática puntual de una empresa, y una posible solución con el producto que aquí se presenta: un módulo para comunicación de mediciones y control de actuadores.

Se analizan los requerimientos y especificaciones del producto teniendo en cuenta al cliente en este caso: un fabricante de piezas mecanizadas para autopartistas.

Se evalúan las diferentes posibilidades para el controlador central de este producto, eligiendo al microcontrolador como unidad de control preferida. También se evalúan las posibles implementaciones para los otros módulos que lo componen, teniendo en cuenta normativas de seguridad eléctrica y compatibilidad electromagnética (debido a que se trabaja en un ambiente industrial).

# Introducción

## Antecedentes.

En la fábrica “*Establecimiento Metalúrgico Campiutti S.R.L.*” se realiza la producción de piezas mecanizadas para automóviles. Para validar las dimensiones de dichas piezas, éstas son posicionadas para ser medidas utilizando calibres digitales.

Se dispone de un operario que registra manualmente la medición indicada por el calibre en una aplicación contenida en una Tablet, donde además éste controla que dicha medición esté dentro de las tolerancias admitidas (especificadas en la misma aplicación). Luego, a través de ella envía la medición registrada al servidor de la planta.

Los inconvenientes planteados por el cliente (dueño de la planta, Leandro Campiutti), son los siguientes:

* Demora demasiado tiempo en el largo plazo realizar el registro de las mediciones en forma manual
* Pueden ocurrir errores de tipeo del operario al realizar el registro, enviando la información con errores

## Contexto del proyecto

Actualmente, se tienen ciertas situaciones particulares que condicionan el desarrollo del proyecto, a saber:

* Pandemia de alcance mundial: Se dificulta efectuar reuniones físicas en el corto y mediano plazo. También, debido a ésta, se han impuesto restricciones en lo referente a la importación de componentes del exterior por parte del Gobierno Nacional (esto luego se traducirá en un requerimiento especificado por el propio cliente). Por otra parte, el acceso a los laboratorios para efectuar las mediciones y/o validaciones necesarias.
* Baja en las exportaciones de automóviles
* Caída en la producción de la industria automotriz, reducción en jornada laboral
* Cierre de fábricas autopartistas

Por otra parte, el regreso del cepo cambiario amplió la brecha, permitiendo que aquellos que poseen ahorros en dólares, ganen mayor poder adquisitivo. Como consecuencia, se abarata el costo de algunos autos ensamblados en el país.

# Objetivos

## Finalidad del Proyecto

La finalidad del proyecto consiste en ofrecer a la empresa “*Establecimiento Metalúrgico Campiutti S.R.L.*” un producto que facilite el proceso de medición de las piezas producidas, así como el registro y la validación de las mediciones tomadas.

A su vez, ofrecer la posibilidad de conectar otros sensores y actuadores adicionales en el futuro, brindando escalabilidad.

## Planteamiento del Problema a Resolver

Este trabajo busca lograr comunicar al operario digitalmente el valor de las mediciones tomadas por los calibres utilizados en forma satisfactoria, evitando que deba registrarlas manualmente (consiguiendo así reducir los tiempos de adquisición de ellas) y ocupándose únicamente de la validación de sus dimensiones.

Para ello, el primero de los focos importantes será poder asegurar la validez de la información recibida. Es decir, que aquellos datos que sean transmitidos por el calibre sean los mismos que reciba el operario en la aplicación de su Tablet de trabajo. Esto contempla esencialmente lograr una correcta comunicación con el calibre (que utiliza un protocolo serie) y con la red local, que está integrada a la tecnología POE (el segundo de los focos importantes de este trabajo, a desarrollar posteriormente).

El tercer foco importante consiste en ofrecer, por un lado, una correcta interfaz para entradas analógicas adicionales con el estándar 4-20mA, para poder conectar en un futuro próximo sensores que se comuniquen con dicho estándar. Y, por otro lado, una correcta interfaz para salidas digitales de 24VDC, para poder conectar en un futuro próximo actuadores que se alimenten con dicho estándar.

## Alcance

El proyecto contempla el desarrollo de un producto con el cual el operario a cargo de realizar las mediciones con los calibres digitales pueda comunicar dichas mediciones tomadas a través de una red local con POE. Además, contará con entradas analógicas (del estándar 4-20mA) y salidas digitales de 24VDC adicionales, contemplando un uso futuro por parte del cliente. El trabajo no contempla la validación de los valores medidos por los calibres. La contrastación periódica de los calibres estará a cargo del cliente.

Las instrucciones para solicitar la lectura de las entradas analógicas adicionales, así como para configurar las salidas digitales, se realizarán también a través de la conexión de red sin intervención del producto par ninguna de estas tareas.

# Definición de Producto

## Requerimientos de Cliente

### Relevamiento de Datos

El relevamiento de datos para la obtención de los requerimientos se realizó mediante conversaciones directas con el dueño de la fábrica. Éste indicó tanto detalles de funcionamiento a tener en cuenta, como del instrumental a utilizar (los calibres digitales).

### Requerimientos finales para trazabilidad

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** |
| REQ-01 | El operario deberá recibir el valor de la medición hecha por el calibre en la aplicación para Tablet preexistente. Puede darse que se quiera obtener la medición de más de un calibre. | Cliente |
| REQ-02 | El producto deberá comunicarse y alimentarse mediante POE. | Cliente |
| REQ-03 | El producto deberá comunicarse con los calibres siguiendo el protocolo serie especificado por el fabricante (Mitutoyo) | Cliente |
| REQ-04 | Deberán poder conectarse al producto al menos 4 (cuatro) calibres. | Cliente |
| REQ-05 | Si no hay una pieza presente, el producto deberá igualmente transmitir el valor de medición que le sea comunicado por el calibre. | Cliente  Tácito |
| REQ-06 | Si el calibre se encuentra apagado, y se solicita un valor de medición de éste, el producto deberá comunicar que el calibre al que se solicitó un valor de medición se encuentra apagado. | Cliente |
| REQ-07 | Los componentes que se vayan a utilizar para el desarrollo del producto deben conseguirse dentro de la República Argentina, para evitar los actuales inconvenientes de importación. | Cliente  Factibilidad Económica |
| REQ-08 | El producto deberá disponer de puertos de entrada analógicos con el estándar 4-20mA para conectar sensores de presión de escala 0 - 200 mBar modelo SS611ED y puertos de salidas digitales de 24VDC, para contemplar una escalabilidad a futuro. | Cliente |
| REQ-09 | El producto deberá cumplir con la norma IRAM de compatibilidad electromagnética, dado que se ubicará en un ambiente industrial. | Norma |
| REQ-10 | El producto deberá cumplir con la norma IEC 60529, respecto al nivel de protección que debe tener el gabinete donde estará contenido, dado que se ubicará en un ambiente industrial. Se indicará con el grado de protección IP. | Norma |
| REQ-11 | El producto deberá contar con una salida USB Tipo A, con el fin de permitir al operario conectar la Tablet para recargar su batería. La conexión será únicamente para alimentación, y no para datos. | Cliente |

Tabla 3.1: Requerimientos

## Diagrama Funcional de Interfaces



Figura 3‑1: Diagrama Funcional de Interfaces

## Especificaciones de Diseño.

### Especificaciones Funcionales

|  |  |
| --- | --- |
| **Leyenda para Especificaciones** | |
| **Aplicabilidad** | **Validación** |
| **P**: Prototipo | **I:** Inspección Visual |
| **D**: Documentación de Diseño |
| **F**: Producto Final | **S**: Simulación |
| **T**: Test |

Tabla 3.2: Leyenda de uso en especificaciones

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| FUN-POW-01 | Alimentación desde POE según estándar 802.3af:  Consumo de potencia no mayor a 15W - 400mA (limitado por los cables, según el estándar básico)  El producto debe utilizar cables 8PC8-RJ45 de 8 pines Modo B, categoría 3. (100BASE-TX) con un largo no mayor a 100 metros.  El producto debe enviar por el cableado la alimentación y los datos por pines separados, utilizando los pares de repuesto.  El rango de tensión que recibe el equipo debe estar entre 37V y 57V.  La impedancia de entrada del equipo debe ser de entre 19K𝛀 y 26.5 k𝛀.  El dispositivo debe respetar la secuencia de arranque de POE contemplada en la norma 802.3af. | REQ-02 | P, F  I, D, T |
| FUN-POW-02 | El producto deberá contar con un conector USB Tipo A (5V – TBD mA), que permita al operario conectar su Tablet para recargar la batería si así lo requiere. Esta conexión será únicamente para alimentación, y no para datos. | REQ-11 | P, F  D, T |

Tabla 3.3: Especificaciones Funcionales

### Especificaciones de Interfaz

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| INT-S-IN-01 | El producto deberá disponer de 4 entradas analógicas adicionales que trabajen con el estándar 4-20mA.   * Mayor seguridad (menor a 30 mA) * Mayor inmunidad al ruido eléctrico e interferencias electromagnéticas * Facilidad en detección de fallas | REQ-08 | P, F  I, D, T |

Tabla 3.4: Especificaciones de Interfaz S-IN

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| INT-S-OUT-01 | El producto deberá disponer de 4 salidas digitales de tipo 24VDC SINK.   * Máximo 1A de corriente para cada salida * Rango de tensión de alimentación entre 20.4 V a 26.4 V | REQ-08 | P, F  I, D, T |

Tabla 3.5: Especificaciones de Interfaz S-OUT

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| INT-CAL-01 | El producto deberá comunicarse con los calibres siguiendo el protocolo serie especificado por el fabricante (Mitutoyo)  La frecuencia de reloj para la sincronización posee un valor típico de 4.096KHz.  Se adjuntan más detalles en la *sección 10.5*, *Figura 10-1*. | REQ-03 | P, F  D, T |
| INT-CAL-02 | El producto deberá disponer de al menos 4 (cuatro) conjuntos de puertos de conexión, según indica la documentación del fabricante de los calibres:   |  |  |  | | --- | --- | --- | | **Pin Nro.** | **Señal** | **I/O** | | **1** | GND | - | | **2** | DATA | O | | **3** | CK | O | | 4 | N.C. | - | | **5** | /REQ | I |   De manera tal de poder conectar al menos 4 (cuatro) calibres. | REQ-04 |  |

Tabla 3‑6: Especificaciones de Interfaz CAL

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| INT-COM-01 | El producto se comunicará con el servidor a través de una conexión a red local por Ethernet, mediante protocolo TCP-IP. | REQ-01, REQ-02, REQ-05, REQ-06 | P, F  D, T |
| INT-COM-02 | La impedancia máxima proporcionada por los cables será de 20𝛀. | REQ-02 | P, F  D, T |
| INT-COM-03 | Debe poder recibir del servidor instrucciones para enviar mediciones de las entradas analógicas y configurar las salidas digitales a través del cable de Ethernet. | REQ-02 | P, F  D, T |
| INT-COM-04 | Si un calibre está apagado y se solicita una medición de dicho calibre, deberá contemplar un TimeOut de 5 segundos y comunicar al servidor que el calibre está apagado. | REQ-06 | P, F  D, T |
| INT-COM-05 | Si no hay una pieza presente, se transmitirá de todas maneras valor de medición nulo. | REQ-05 | P, F  D, T |

Tabla 3‑7: Especificaciones de Interfaz COM

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| INT-MEC-01 | El equipo deberá tener un grado de protección **IP53**, que corresponde a:  Nivel de protección contra elementos sólidos:   |  |  |  | | --- | --- | --- | | **Nivel** | **Tamaño objeto entrante** | **Efectividad** | | 5 | Protección contra polvo | La entrada de polvo no puede evitarse, pero el mismo no debe entrar en una cantidad tal que interfiera con el correcto funcionamiento del equipo |   Nivel de protección contra elementos líquidos:   |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | **Nivel** | **Protección frente a** | **Método de prueba** | **Resultados** | | 3 | Agua nebulizada (spray) | Se coloca el equipamiento en su lugar de trabajo habitual | No debe entrar el agua nebulizada hasta en un ángulo de 60° a derecha e izquierda de la vertical, a un promedio de 11 litros por minuto, y a una presión de 80-100 kN/m2 durante un tiempo no menor a 5 minutos |   De acuerdo con la norma IEC 60529. | REQ-10 | P, F  I, T |

Tabla 3‑8: Especificaciones de Interfaz MEC

### Especificaciones de Implementación

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| IMP-OPE-01 | El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la temperatura ambiente sea:  0°C < TAMB < 40°C (TBC) | (Entorno Industrial) | F D, T |

Tabla 3.6: Especificaciones de Operación

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| IMP-EMC-01 | El dispositivo deberá operar normalmente con inmunidad al ruido electromagnético de acuerdo con la norma IRAM 2491:  CEM = EMI + SEM. (Emisiones electromagnéticas y Susceptibilidad Electromagnética)  Norma IRAM 2491-1-1: Definición de la terminología básica relacionada a CEM.  Norma IRAM 2491-4-1 y 2491-4-2: Técnicas de medición y ensayo para garantizar los valores deseados de EMI y de descargas eléctricas.  Norma IRAM 2491-4-14: Norma para garantizar inmunidad electromagnética al equipo SEM. | REQ-09 | F T |

Tabla 3.7: Especificaciones de Compatibilidad Electromagnética

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **D** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| IMP-COS-01 | Los componentes que se vayan a utilizar para el desarrollo del producto deben conseguirse dentro de la República Argentina, para evitar los actuales inconvenientes de importación. | REQ-07 | F D |

Tabla 3.8: Especificaciones de costos

### Especificaciones de Servicio (*RAMS*)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| RAM-CON-01 | TBD | TBC | TBD |

Tabla 3.9: Especificaciones de Confiabilidad

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| RAM-DIS-01 | TBD | TBC | TBD |

Tabla 3.10: Especificaciones de Disponibilidad

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| RAM-MAN-01 | TBD | TBC | P, F T |

Tabla 3.11: Especificaciones de Mantenibilidad

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **Descripción** | **Origen** | **Aplicabilidad Validación** |
| RAM-SEG-01 | La máxima temperatura que podrá tener la carcasa será de TBD | TBC | P, F D, S, T |

Tabla 3.12: Especificaciones de Seguridad

# Plan de Validación

## Diseño de Bancos de Pruebas

Para realizar el diseño de banco de pruebas, se tuvieron en cuenta dos grandes partes del proyecto. En primer lugar, la de sistema de comunicación con el servidor y el calibre, y en segundo, la comunicación con el servidor y las entradas analógicas y salidas digitales. Por último, se contempló un banco de pruebas para ensayos de compatibilidad electromagnética en el producto final.



Banco de Pruebas 1



Banco de Pruebas 2



Banco de Pruebas 3



Banco de Pruebas 4



Banco de Pruebas 5

## Especificaciones de Tests

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ID Aplicabilidad** | **Procedimiento** | **Criterio** |
| **Procedimiento General**: para todas estas pruebas, se deberá conectar el DUT al banco de pruebas #1. Verifique que ambas puntas del osciloscopio estén correctamente conectadas, y que cada una de ellas tenga la referencia conectado al pin de tierra inmediatamente al lado del que se intenta medir. El osciloscopio deberá estar ajustado para mostrar en pantalla un período no mayor a 5ms, dado que la trama es de 13 datos y la señal de CLK es de 4096Hz. Deberá tener también acoplado AC para evitar ver señales de tensión continua. La amplitud que se pueda ver en pantalla deberá ser no mayor a 5VDC (TBC). El trigger deberá estar puesto en automático y el nivel del trigger en 2.5VDC (TBC). El display deberá estar puesto en estado normal (es decir, sin persistencia). Las puntas deberán estar en impedancia de entrada x10, con el ajuste acorde en el osciloscopio. Escala de 1V/div. Salvo que el test así lo indique, no deberá haber ningún tipo de filtro salvo aquellos ya mencionados. | | |
| T-PERF01  Proto, Final | 1. Se procede a utilizar el banco de pruebas #1. Verificar que la PC, la alimentación, el calibre y el DUT estén encendidos y correctamente conectados. 2. Verificar que cuando se pide a través del servidor (en este caso, emulado por la PC) al DUT que el calibre transmita una medición, la misma llegue al DUT. En este caso si después de la solicitud, no hay respuesta luego de transcurridos 5 segundos es porque el calibre está apagado. 3. Frente a medidas patrón (TBD) verificar que lo que se mide con el calibre y aparece en la pantalla de este es igual a lo que recibe el DUT, y que aparecerá en la aplicación de la Tablet. | Correspondencia entre valores: de señal de datos de calibre y lo que se recibe en el módulo |
| T-PERF02  Proto, Final | 1. Se procede a utilizar banco de pruebas #2 2. Se asume que la alimentación y la comunicación con el módulo a través de POE, ya se encuentra validado en el test T-PERF01, así como la correcta conexión de la PC. 3. Por medio del servidor proveer una configuración a la parte de entradas analógicas. 4. Luego se realiza la inyección a la entrada analógica por medio de un generador de señales y con la disposición de un conversor de tensión a corriente de forma tal de tener como entrada: en un caso el mínimo nivel de corriente (4mA), y en otro caso el nivel máximo (20mA). 5. Para verificar que se lee correctamente en cada entrada hay que ver que se corresponda lo que está en la entrada y lo que se envió al servidor con un cierto criterio de tolerancia sugerido por CPI S.A. | En mínimo:  (4+/-0.2) mA  En máximo:  (20+/-0.5) mA |
| T-PERF03  Proto, Final | 1. Se procede a utilizar banco de pruebas #2 2. Se asume que la alimentación y la comunicación con el módulo a través de POE, ya se encuentra validado en el test T-PERF01, así como la correcta conexión de la PC y demás. 3. Cambiar la escala de medición vertical a 5V/div. 4. Efectuar medición con osciloscopio en cada una de las salidas digitales con la siguiente configuración establecida por el servidor: una de las salidas activa y el resto apagadas, y ver que se corresponda el estado de la salida con lo que se mide en el osciloscopio. 5. Repetir el paso anterior, pero con todas las salidas activas. | Tensión con salida activa:  (0 – TBD) V  Tensión con salida apagada: (20.4 - 26.4) V |
| T-PERF04  Final | 1. Procedimiento a definir para medición de EMI (TBD) con el banco de pruebas #3. | TBC |
| T-PERF05  Proto, Final | 1. Se procede a utilizar el banco de pruebas #4. Conectar la bornera auxiliar de salida de alimentación USB al osciloscopio, y verificar que se mide una tensión continua de 5V 2. Conectar luego, mediante un cable USB Tipo A la salida a la Tablet del operario. 3. Verificar que se visualiza en ella que la batería se está cargando. | Tensión de salida:  (4.5 – 5.5) V  Inspección visual en la Tablet de estado de batería cargando |
| T-PERF06  Final | 1. Se procede a utilizar el banco de pruebas #5. Con el equipo conectado y en funcionamiento, rociar con agua nebulizada según indica el procedimiento de la norma IEC 60529. | No se ve afectado el funcionamiento general, según norma IEC 60529 |

Tabla 4.1: Tests de Performance

## Matriz de Trazabilidad de Validación

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Origen** | **REQ ID**  ***Descripción corta*** | **ESP ID** | **TEST ID o**  **Sección** |
| Cliente | REQ-01  Poder ver la medición en Tablet | INT-COM-01 | T-PERF01 |
| Cliente | REQ-02  Alimentación del módulo mediante POE | FUN-POW-01  INT-COM-01  INT-COM-02  INT-COM-03 | T-PERF01 |
| Cliente | REQ-03  El módulo usa protocolo de comunicación de calibres Mitutoyo | INT-CAL-01 | T-PERF01 |
| Cliente | REQ-04  Conectar 4 calibres | INT-CAL-02 | T-PERF01 |
| Cliente  Tácito | REQ-05  Pieza no presente, transmitir valor nulo de medición | INT-COM-01  INT-COM-05 | T-PERF01 |
| Cliente | REQ-06  Si un calibre está apagado, que el módulo lo comunique | INT-COM-01  INT-COM-04 | T-PERF01 |
| Cliente  Factibilidad Económica | REQ-07  Utilizar componentes en Argentina | IMP-COS-01 | No aplica |
| Cliente | REQ-08  Entradas analógicas con protocolo 4-20mA, salidas digitales de 24VDC | INT-S-IN-01  INT-S-OUT-01 | T-PERF01  T-PERF02  T-PERF03 |
| Norma | REQ-09  El producto deberá cumplir con la norma IRAM 2491-1-1, 2491-4-1, 2491-4-2, y 2941-4-14 de compatibilidad electromagnética. | IMP-EMC-01 | T-PERF04 |
| Norma | REQ-10  Cumplir norma IEC 60529, respecto del nivel de protección que debe tener el gabinete. Grado de protección IP. | INT-MEC-01 | T-PERF06 |
| Cliente | REQ-11  Salida USB Tipo A, con el fin de cargar batería de Tablet. | FUN-POW-02 | T-PERF05 |

## Plan de Verificación y Validación



Figura 4‑1: Diagrama de dependencias de Validación

# Análisis de Factibilidad

## Factibilidad tecnológica

### Esquema Modular



Figura 5‑1: Esquema modular

Se presenta ahora una breve descripción de los módulos, para luego poder realizar el planteo de las alternativas de diseño.

* **Unidad de Control**: funciona como interfaz entre la información provista por los calibres y las entradas analógicas, con el servidor. A través de la conexión por Ethernet comunicará debidamente la información proveniente de estos módulos, como así recibirá instrucciones de configuración para las salidas digitales.
* **Interfaz entradas analógicas**: contiene el hardware necesario para convertir la información por corriente de las entradas analógicas a un formato de tensión adecuado para ser interpretado por la unidad de control cuando le sea requerido.
* **Interfaz salidas digitales**: permite activar o desactivar las salidas digitales de acuerdo con la configuración proveniente de la unidad de control (que a su vez proviene del servidor externo).
* **Alimentación interna**: contiene el hardware necesario para adaptar la alimentación proveniente de la conexión por POE a las diversas alimentaciones requeridas por el equipo.
* **Carga por USB**: posee el hardware requerido para proveer mediante el puerto USB externo una alimentación estable para cargar la Tablet del operario.
* **Centro de control**: unidad de hardware adicional para la realización de pruebas de validación.

### Implementación de módulo <<Unidad de Control>>

### Alternativas de diseño

Como se trata de un problema de ingeniería, hay muchas soluciones posibles, por lo cual se optó por utilizar un método tabular para poder realizar un análisis cualitativo distintas soluciones exploradas y de esa forma determinar la óptima. Es importante tener en cuenta que la tabla fue armada teniendo en cuenta que las distintas unidades de control puedan aproximadamente solucionar nuestro problema con el cuidado de no sobredimensionar demasiado en cuanto a las prestaciones que posee cada una.

En base a estas consideraciones, se confeccionó la siguiente tabla comparativa.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Factores a tener en cuenta** | | | |
| **Opciones** | **Tiene periféricos internos** | **Curva de aprendizaje (Ascenso)** | **Apto ambiente industrial** | **Costo (~)** |
| **Microcontrolador** | Si | Lento | Si | US$ 10 |
| **Microprocesador** | Si\*\* | Lento | Si | US$ 10 |
| **FPGA** | No\* | Muy Lento | Si\*\*\* | US$ 20 |
| **Arduino** | Si | Rápido | No | US$ 10 |
| **RaspberryPi** | Si | Medio | No | US$ 35 |

Tabla 5.1: Alternativas de diseño para Unidad de Control

\*: Pueden integrarse.

\*\*: Pocos o más básicos

\*\*\*: Varía según el caso

### Elección de una solución

En primer lugar, se tuvo en cuenta la curva de aprendizaje de cada unidad de control. Dentro de ese conjunto de curvas, la que más se destaca es la de las FPGA, la cual es muy lenta. Esto no es un dato menor ya que eso en conjunto con la poca experiencia que nuestro grupo de trabajo, se prevé que va a provocar un aumento significativo en el tiempo de realización del proyecto.

Luego, se consideró que tanto las Arduino y RaspberryPi no presentaban la robustez necesaria para poder funcionar correctamente en un ambiente industrial.

Por último, sólo queda realizar un análisis dentro de las dos posibles opciones restantes de la tabla, microcontrolador y microprocesador. Por un lado, desde el punto de vista de costo estimado, la curva de aprendizaje y su aptitud para el ambiente industrial, las dos soluciones parecen ser igualmente viables en comparación a las anteriores. Pero, por otro lado, un factor determinante para tener en cuenta es la cantidad de periféricos que posee la unidad de control.

En este sentido, el microcontrolador ofrece una mejor prestación que el microprocesador, y es por esta razón que fue elegido solución de preferencia para este proyecto.

### Alternativas de diseño

Teniendo definida la Unidad de Control, se pasa ahora al análisis particular de posibles alternativas de Microcontrolador. Se tiene en cuenta, por un lado, la disponibilidad de un periférico de Ethernet interno, dado que esto condiciona el número de pines a disponer. Por otro lado, se contempla el número de entradas analógicas disponibles, porque esto influirá en las alternativas de diseño para la interfaz de las entradas analógicas externas del equipo. Finalmente, se incluye la memoria FLASH disponible para el programa: este factor es también crítico debido a que se desconoce cuánto espacio ocupará en dicha memoria.

Con estas consideraciones, se armó la siguiente tabla comparativa.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Factores a tener en cuenta** | | | | | | |
| **Opciones** | **Ethernet (HW)** | **Arquitectura (HW) bits** | **Memoria Flash** | **N° de Pines** | **Entradas analógicas** | **Disponible en Argentina** | **Costo** |
|  |
| **STM32F407** | Si | 32 bits | 1MB | 100 | 3\* | Si | USD$ 11.86 |  |
| **MK64FN1M0VLL12** | Si | 32 bits | 1MB | 100 | 2\* | Si | USD$ 14.37 |  |
| **ATMega 328P + Periférico** | Si | 8 bits | 32KB | 32 | 8 | Si | USD$ 2.18 + Periférico |  |
|  |
| **ATMega 640 + Periférico** | Si | 8 bits | 64KB | 100 | 16 | Si | USD$ 8.49 + Periférico |  |
|  |

Tabla 5.2: Alternativas de diseño para Microcontrolador

\*: Al tener menos de 4 entradas analógicas disponibles nativamente, condiciona luego la elección de alternativas para el módulo de *Interfaz de entradas analógicas*.

Se describen ahora las consideraciones sobre cada opción relevantes para el proyecto. *(mismo de antes, breve)*

* **STM32F407**:
* **MK64FN1M0VLL12**:
* **ATMega 328P + Periférico**:
* **ATMega 640 + Periférico**:

### Elección de una solución

En base a lo descripto previamente, considerando su versatilidad, se optó por utilizar el microcontrolador **STM32F407**.

### Implementación de módulo <<Alimentación Interna>>

### Alternativas de diseño

Para el planteo de alternativas para el módulo de alimentación interna, se consideran las dos ramas existentes (lineal y conmutada o switching). Los aspectos de interés a comparar son las EMI (dado que se trabajará en un ambiente industrial) y la PSRR (principalmente debido a que la tensión proveniente del POE puede tener un rango de variación amplio, entre 37V y 57V).

Con dichas consideraciones, se construye la siguiente tabla.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Factores a tener en cuenta** | | | |
| **Opciones** | **Rendimiento** | **EMI** | **PSRR** | **Costo** |
| **Reguladores Lineales** | < 50% | Bajas | Bajas | Bajo |
| **Reguladores Switching** | ~ 95% | Altas\* | Altas\*\* | Alto\* |
| **Lineal + Switching\*\*\*** | \*\*\* | Altas | Bajas | \*\*\* |

Tabla 5.3: Alternativas de diseño para el módulo de Alimentación Interna

Se describe a continuación los aspectos a destacar en cada opción planteada para el módulo.

* **Reguladores Lineales**: en este caso, dado que el control es analógico, no se tiene un buen rendimiento, y para la exigencia de corrientes más altas por breves períodos de tiempo la capacidad de rechazo PSRR no es muy buena. Pero como ventajas, el costo en horas hombre para su diseño es menor (dado que es menos compleja la circuitería) y su costo monetario también es más bajo. Por otra parte, al ser un control de tipo analógico, las EMI son bajas.
* **Reguladores Switching**: poseen un buen rendimiento y la capacidad de rechazo PSRR es mucho mejor, lo que resulta más conveniente para el caso de la alimentación que se destine a la Unidad de Control, y para la fuente de carga por USB. En contraparte, al ser circuitos que conmutan a altas frecuencias, las EMI son más elevadas y el diseño puede resultar más complejo y caro.

### Elección de una solución

Dado que los módulos tienen cada uno diferentes requisitos en cuanto a potencia y estabilidad de tensión, se optó por considerar **una combinación de ambos tipos** de fuente para cada caso, según sea ese requerimiento. De esta forma, en los casos que se pueda optar por un diseño más simple y económico se recurrirá al primer tipo, y en los otros casos al segundo.

### Implementación de módulo <<Interfaz salidas digitales>>

### Alternativas de diseño

Para el planteo de las alternativas de diseño, se consideran como factores base la tensión de trabajo (dado que las salidas están especificadas por tensión) y la corriente de trabajo (en función del tipo de actuador a conectar).

En base a esto, se analizaron dos opciones de base, presentadas en la siguiente tabla.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Factores a tener en cuenta** | | | |
| **Opciones** | **V de trabajo** | **I de trabajo** | **Aislación** | **Costo** |
| **Optoacoplador + Relé Contacto** | 30 VDC | 3A | Si | US$ 1.06 |
| **Relé Estado Sólido** | 60 VDC | 3A | Phototriac | US$ 14.16 |

Tabla 5.4: Alternativas de diseño para la Interfaz de salidas digitales

* **Optoacoplador + Relé Contacto**: son más económicos, pero se añade una aislación adicional mediante optoacoplador para separar bien el circuito con la bobina de la Unidad de Control.
* **Relé Estado Sólido**: son más caros, pero poseen mayor robustez (y soportan una tensión de trabajo mayor).

### Elección de una solución

Dado que el cliente no incluyó requerimientos adicionales sobre los actuadores a conectar, se optó por la opción más simple, en este caso los **Relé de Contacto + Optoacoplador**.

### Implementación de módulo <<Interfaz entradas analógicas>>

### Alternativas de diseño

Para poder realizar la funcionalidad propuesta de entradas analógicas, dado que las entradas analógicas del módulo trabajan con un protocolo 4-20mA, hay que realizar una conversión de corriente a tensión de modo tal que los ADC disponibles en la unidad de control puedan efectuar una lectura del valor de tensión asociado a lo que mide cada sensor respectivamente.

En base a estos criterios, se construyó la siguiente tabla.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Factores a tener en cuenta** | | | | |
| **Opciones** | **uC con ADC suficientes** | **Requiere calibrar** | **Precisión** | **Aprovecha todo el rango de V** | **Costo** |
| **4x Resistor** | Si | No | ± 1% | No | \* |
| **4x Conv. I/V Arduino** | Si | Si | ± 0.2% | Si | US$ 24 |
| **ADS7841 +4x Resistor** | No | No | ± 0.1%\*\* | No | US$ 8 |
| **ADS7841 +4x Conv. I/V** | No | Si | +0.3% | Si | US$ 32 |

Tabla 5.5: Alternativas de diseño para Interfaz de entradas analógicas

Se solicitó que el módulo trabajara con 4 entradas analógicas, por lo tanto, los ADC necesarios resultan ser 4. Cuando se realizó la búsqueda de microcontroladores disponibles en el mercado, se halló que no siempre llegaban a disponer esa cantidad de ADC. Frente a esta problemática, se pudo hallar un *workaround* que consiste en utilizar el módulo ADS 7841. Dicho módulo contiene 4 ADC, los cuales se multiplexan y se envía la lectura mediante la salida serial que posee. Dado que la unidad de control seleccionada se trata del STM32F407, el cual posee 3 ADC, surge como necesidad utilizar el módulo ADS 7841.

Resuelta esta problemática, solo queda explorar la conversión de corriente a tensión. En esta nueva problemática se contemplaron dos posibles soluciones. Por un lado, se colocan 4 resistores en la entrada de cada ADC. Por otro lado, en las mismas entradas se colocan módulos de conversión de corriente a tensión Arduino.

La opción de colocar resistores tiene como ventaja el hecho de que no requiere calibración, pero no aprovecha todo el rango de tensión disponible del ADC. En cambio, en la opción de los conversores Arduino, ocurre lo opuesto.

### Elección de una solución

A pesar de que la opción que combina el módulo ADS 7841 y conversores Arduino parece ser la opción más viable en cuanto a la prestación, en términos de costo no lo es. Es por eso que se tomó la decisión de combinarlo con resistores.

### DFMEA

Para la realización de la DFMEA, se tuvieron en cuenta los siguientes posibles problemas, según el módulo al que están asociados:

* Alimentación por POE: problemas de hardware (físicos o de implementación) o software (en este caso, relacionado a la implementación)
* Transmisión de medición de calibres: errores presentes en la trama de datos transmitida
* Entradas analógicas: mediciones fuera de rango, o problemas en el lazo de corriente
* Salidas digitales: problemas de configuración desde el servidor (software), o mal funcionamiento de estas (hardware)
* USB: problemas con la alimentación brindada

Se utiliza una escala de **1** a **5** para los tres índices. En el caso de Severidad, 1 para menos severo y 5 para máxima severidad. En el caso de Ocurrencia, 1 para menos frecuente y 5 para muy frecuente. Finalmente, en el caso de Detectabilidad, 1 para mayor facilidad de detectar la falla, y 5 para el caso de muy difícil detectabilidad.



## Factibilidad de tiempos.

Consideraciones

La distribución de las diferentes tareas se basa en la separación por módulos del producto. Como días de trabajo efectivos, se consideran los 5 días hábiles de la semana. Se descuenta el receso de verano (siendo esto Enero, y la primera quincena de Febrero).

Respecto a esto último, se añade una semana previa al mes de Marzo para revisar la organización y el estado del proyecto, en caso de requerir alguna actualización en la planificación.

### Planificación (PERT y simulación de Montecarlo)

A continuación, se muestra un cuadro con las tareas estipuladas para el desarrollo del proyecto. Se indica el tiempo más probable, sumando además los tiempos más optimistas y pesimistas.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N° | Tarea | Duración optimista | Duración más probable | Duración pesimista | Predecesora |
| 2 | Detectar una necesidad | 2 | 3 | 4 | - |
| 3 | Definir el alcance | 4 | 5 | 6 | 2 |
| 4 | Antecedentes y Contexto | 4 | 5 | 6 | 2 |
| 5 | Entrevista a la empresa | 1 | 3 | 5 | 3;4 |
| 6 | Definir objetivos de Diseño | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 7 | Escribir Requerimientos | 2 | 4 | 6 | 6 |
| 8 | Escribir Especificaciones | 4 | 5 | 7 | 7 |
| 9 | Planes de Validación | 4 | 5 | 7 | 8 |
| 10 | DFMEA - 1° Reunión | 4 | 5 | 6 | 8 |
| 11 | Investigación POE y Unidades de Control | 8 | 10 | 14 | 7 |
| 12 | Análisis de Factibilidad Tecnológica | 10 | 15 | 20 | 11 |
| 13 | Análisis de presupuesto y costos | 12 | 15 | 20 | 7 |
| 14 | Análisis de Factibilidad Económica | 7 | 10 | 15 | 13 |
| 15 | DFMEA - 2° Reunión | 3 | 5 | 8 | 10 |
| 16 | (Receso) | 0 | 67 | 0 | 14 |
| 17 | Cálculos y selección de HW | 5 | 10 | 15 | 11;16 |
| 18 | Diagrama de HW e implementación | 12 | 15 | 20 | 17;15 |
| 19 | Prueba de HW | 12 | 15 | 20 | 18 |
| 20 | Diagramación de SW | 8 | 10 | 12 | 13;16 |
| 21 | Implementación de SW | 12 | 15 | 20 | 20 |
| 22 | Diseño de prototipo - Gabinete | 8 | 10 | 12 | 18;21 |
| 23 | Validación de prototipo | 15 | 20 | 25 | 22;19 |
| 24 | Estudio de confiabilidad | 5 | 10 | 15 | 23 |

Tabla 5.6: Tareas estipuladas con las duraciones estimadas

Efectuando la simulación de Montecarlo con las estimaciones establecidas previamente, se obtienen los siguientes resultados en términos de duración y fecha de finalización.

Chart, histogram

Description automatically generated

Figura 5‑2: Simulación de Montecarlo – Duración en días

Chart

Description automatically generated

Figura 5‑3: Simulación de Montecarlo – Fecha de finalización

De donde se estima que el proyecto estará finalizado para el 15 de Junio de 2021 con un 95% de probabilidad.

### Programación (Gantt)

En el siguiente diagrama de Gantt, se muestran las tareas previamente tabuladas, indicando el camino crítico.



Figura 5‑4: Diagrama de Gantt

En color azul, se marcan las tareas relacionadas al Hito 1, en verde las relacionadas a los Hitos 2 y 3, y finalmente en rojo las tareas correspondientes al Hito 4. El camino crítico está indicado por los círculos con borde rojo.

## Factibilidad económica

Modelo de Negocios

Este diseño se trata de un proyecto único, con posibilidad de realizar hasta 5 unidades adicionales posteriores a su finalización.

El principal ingreso corresponderá al diseño del hardware y software para el control del módulo, para lo que se requiere de conocimiento técnico (que será el valor agregado del proyecto). Se lo contempla al finalizar el proyecto.

Gastos e Ingresos

Como gastos principales, se considera los traslados hacia la fábrica, para llevar a cabo la instalación, puesta en marcha y validación del prototipo. Dicho gasto se tendrá en cuenta a partir del mes de Marzo, hasta la finalización del proyecto, para todos los integrantes del grupo. Se contabilizarán 10 US$ mensuales.

Para la compra de los componentes, se suman los costos estimados previamente, más el resto de los componentes misceláneos (resistores, capacitores, etc.) para el diseño de los circuitos involucrados. Se estima de este modo un costo de componentes de 100 US$, a contabilizar una única vez.

Como ingreso, se va tiene en cuenta una suma de 200 US$ contemplando los gastos que no estén siendo tenidos en cuenta y el resto será la ganancia del proyecto. Se apunta a obtener al finalizar, una ganancia del 50%.

Flujo de Fondos

Revisando los ítems anteriores, se arma el siguiente cuadro con el flujo de fondos para todo el proyecto.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Mes** | | | | | | | | | | | |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| **Ingreso** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200 |
| **Egreso** | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 | 110 | 10 | 10 | 10 |
| **Flujo** | 0 | 0 | 0 | 0 | -10 | 0 | 0 | -10 | -110 | -10 | -10 | 190 |

Tabla 5.7: Flujo de Fondos

Calculando la VAN del proyecto resulta en 38.83 US$ positivos, por lo tanto, el proyecto es viable económicamente.

## Factibilidad legal y responsabilidad civil

### Seguridad

Acorde a la regulación 351/79 del ENRE, el equipo va a trabajar en tensiones bajas (entre 50 y 1000 Vrms). La regulación considera una tensión de seguridad de hasta 24V respecto a tierra.

Los sectores relevantes que están expuestos en el equipo son las salidas digitales (24VDC Sink), y las entradas analógicas (4-20mA).

### Certificación

Acorde a la resolución 169/2018, como el producto no es de producción masiva, no requiere realizarse una certificación obligatoria.

En caso de querer realizarla, la misma al momento es gratuita (de acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Productivo).

### Normas a considerar

De acuerdo con lo estipulado en las especificaciones, las normativas a considerar son las siguientes:

* + Estándar **802.3af** para módulo de alimentación por POE
  + Estándar **4-20mA** para módulo de entradas analógicas
  + Estándar de **24VDC SINK** para módulo de salidas digitales
  + Norma **IEC 60529** para diseño de gabinete - Grado de protección IP
  + Norma **IRAM 2491-1-1**: Definición de la terminología básica relacionada a CEM
  + Norma **IRAM 2491-4-1** y **2491-4-2**: Técnicas de medición y ensayo para garantizar los valores deseados de EMI y de descargas eléctricas para entornos industriales
  + Norma **IRAM 2491-4-14**: Norma para garantizar inmunidad electromagnética al equipo (SEM).

Siendo CEM = EMI + SEM (Emisiones electromagnéticas y Susceptibilidad Electromagnética)

# Ingeniería de detalle

## Hardware

### Diagrama de bloques

En la siguiente figura, se muestra el diagrama en bloques del hardware contemplando los módulos internos a diseñar, y las correspondientes conexiones:

Diagram

Description automatically generated

Figura 6‑1: Diagrama en bloques de Hardware

### <<Controlador PoE>>

### Descripción

El prototipo va a recibir la energía a través del protocolo de PoE IEEE802.3af, proveniente de un Switch PoE con capacidad de entregar hasta 15W de potencia. Debido a esto, se requiere diseñar el circuito encargado de realizar la secuencia de inicialización correcta y seleccionar la cantidad de potencia máxima que deseamos que nos provea el Switch.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

El diseño principal del circuito se centra en la utilización de un integrado que ofrecen los principales fabricantes de circuitos integrados. Sabiendo la potencia máxima a utilizar (15 W, correspondiente al standard PoE 802.3af) se selecciona el integrado que mejor se adapte a dichas especificaciones.

El circuito integrado seleccionado es el **TPS2375D**, de Texas Instruments.

* + - **Entrada**: Tensión + Datos proveniente de Switch PoE (Cable RJ-45)

El circuito recibe los 8 pines del cable RJ-45, y en base a esto, en primera instancia debe separar los datos de la alimentación principal. Si bien para estándares de mayores potencias dicha separación se realiza mediante transformadores (como se puede observar en el circuito a continuación), gracias al uso de un estándar de menor potencia, la tensión se provee en cables separados de los datos desde el Switch, por lo que los transformadores son prescindibles.

A partir de allí, se hace pasar la tensión por un puente de diodos, para garantizar siempre la polaridad positiva de la tensión, y luego se ingresa al circuito integrado.

El circuito final (estructura sugerida por la hoja de datos del fabricante) se puede observar en la siguiente figura:

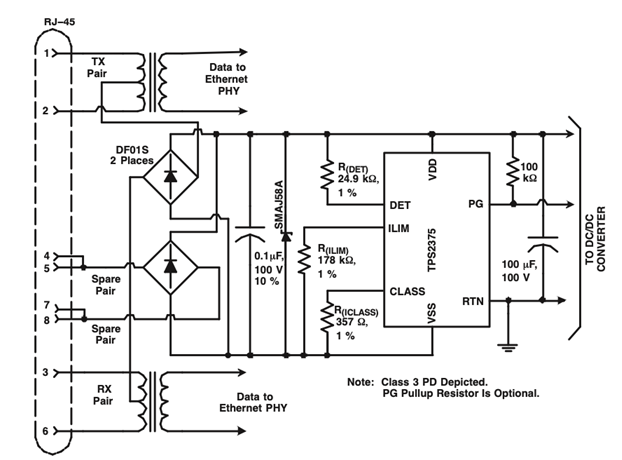


Figura 6‑2: Implementación del controlador TPS2375D

Para lograr una correcta inicialización del PoE, es preciso elegir los componentes restantes según lo indica la hoja de datos del fabricante:

|  |  |
| --- | --- |
| **Componente** | **Valor** |
| R(DET) | 24.9K [Metal film 1%] |
| R(ILIM) | 178K [Metal film 1%] |
| R(ICLASS) | 357Ω [Metal film 1%] |
| C1 | 0.1uFx100V [Electrolítico] |
| C2 | 100uFx100V [Electrolítico] |
| Diodo Zener | Vz (Nominal): 57V |

Tabla 6.1: Selección de componentes para la configuración a la potencia requerida

Los componentes que participan de forma directa en la selección y configuración de la potencia a obtener son las resistencias R(ICLASS) y R(ILIM). La primera es la carga a ser vista por el Switch PoE, que está establecida por la norma, y determina la potencia máxima a recibir. La segunda, limita la corriente pico durante la secuencia de inicialización, para asegurarse que se realice de forma correcta.

El capacitor C1, para cumplir con la norma PoE debe ser menor a 5μF. Para la potencia a utilizar, el fabricante recomienda aplicar la siguiente cota:

C1 ≤ (IOUT\*180) / (10 mA)

Sin embargo, cambios en dicho capacitor pueden traer consecuencias a la hora de la inicialización, por lo que el fabricante sugiere utilizar el valor indicado en la tabla.

La potencia final está determinada por VDD y I(RTN) máxima, siendo que el circuito integrado garantiza en las peores condiciones de uso 13W de potencia (con una tensión de entrada de 37V).

* + - **Salida**: La salida del circuito integrado se toma entre los pines VDD y RTN, una tensión nominal de 50V y una corriente máxima de 0.3 A (limitada por el Switch). Desde estos terminales, se derivarán los módulos de <<Alimentación Interna 3.3V>>, <<Alimentación Interna 24V>> y <<Carga por USB>>.

### Plan de pruebas

Para el plan de pruebas de este módulo, se utilizarán los siguientes elementos:

* Switch PoE
* Cable Ethernet RJ-45
* Osciloscopio
* Reóstato de potencia 15W o superior

El objetivo es realizar una correcta inicialización del módulo, y validar que para una tensión del estándar de PoE (entre 37 y 57 V), se obtiene una salida de al menos 13W de potencia.

Para ello, se conecta el osciloscopio y el potenciómetro a los pines de salida (VDD, RTN). Luego, se conecta el módulo al Switch PoE a través del cable ethernet RJ-45. Se debe observar en primera instancia la inicialización correcta de PoE (como se muestra en la siguiente figura), seguido de una tensión continua de valor constante (el valor esperado es de 50 V, pero deberá estar comprendida en el intervalo mencionado anteriormente).

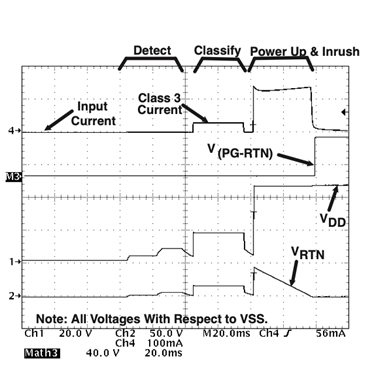


Figura 6‑3: Secuencia de inicialización de PoE

Para la prueba con carga, se conecta el reóstato (ajustado a una resistencia de valor 15W/VDD o de por lo menos 220Ω) en los pines de salida. Comprobar que la potencia máxima que entrega el módulo se mantenga en todo momento en 13W o superior (potencia mínima garantizada por el circuito integrado).

### <<Alimentación Interna 3.3V>>

### Descripción

La fuente de 3.3V se requiere para alimentar la Unidad de Control y la Interfaz de Entradas Analógicas. De las características de entrada y salida (a detallar a continuación) surgen los criterios de diseño a adoptar, siguiendo además las recomendaciones dadas por los fabricantes.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

En primera instancia se buscará poder realizar un diseño de fuente tipo lineal, debido al requerimiento de bajas EMI. Para el diseño se tienen en cuenta las siguientes características:

* + - **Entrada**: Tensión proveniente de PoE (37V – 57V)

A partir de esto, surge la necesidad de que en la búsqueda de circuitos integrados (independientemente de que la fuente sea del tipo lineal o switching) que posean la característica HV (High Voltage). Es decir, la tensión máxima admitida en su entrada sea hasta 60V. Se descarta la posibilidad de realizar un diseño que posea en su totalidad elementos discretos debido a que implica una mayor complejidad, cantidad de componentes y costo. Además, se debe considerar que resta el diseño de otras dos fuentes (5V para la carga de Tablet por USB, y 24V para la Interfaz de Salidas Digitales).

* + - **Salida**: A partir de las características de la Unidad de Control y la Interfaz de Entradas analógicas:
      * Unidad de Control: VDD = 1.8V - 3.6V, IDD (máximo) = 240mA
      * ADS7841: VDD = 2.7V - 5.0V, IDD = 240uA

Como objetivo de diseño, se toma entonces una Vo = 3.3V, y Io (máxima) = 0.24A + 25% = 0.3A.

De los integrados lineales de la serie LM que tienen característica HV se encuentra el **LM317HVT**, que es posible configurar para tener 3.3V a su salida. Para verificar que puede cumplir los requisitos, se halla la zona de trabajo en la siguiente curva de operación, considerando:

* INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL = 57V-3.3V = 53.7V
* OUTPUT CURRENT = 300mA

Chart

Description automatically generated

Figura 6‑4: Límite de la zona de trabajo – T Package Device

Donde puede observarse que queda cerca del límite de operación. Por ello, se procede a derivar el consumo mediante un transistor externo.

Añadiendo dicho transistor en paralelo, el circuito resultante de regulación lineal posee la siguiente estructura:

A picture containing chart

Description automatically generated

Figura 6‑5: Fuente Regulada de 3.3V

Para el regulador lineal, se considera una corriente de regulación (IREG) de 30mA para que se encienda el transistor Q1 a través de R3. La corriente de regulación mínima (de acuerdo con la hoja de datos) es de 10mA, por lo que se toma un margen para cumplir dicha condición y mantenerlo en la zona de trabajo permitida, siendo que el resto de la corriente máxima posible (270mA) serán conducidos por el transistor Q1.

El transistor a seleccionar debe cumplir entonces los siguientes requerimientos de funcionamiento:

* HFE (DC) Mínimo > ICC/IREG = 10
* VCE0 (270mA) > 53.7V
* Potencia disipada máxima > VCE\*(ICC-IREG) = 14.5W

El transistor **TIP127** (encapsulado TO-220) cumple con estas características. Para verificar el margen disponible para la VCE0, se busca el punto de trabajo en la curva característica de la zona de operación segura:

A picture containing chart

Description automatically generated

Figura 6‑6: TIP127 - Zona de Operación Segura

A partir del punto de intersección, se verifica que VCE0 para la corriente dada cumple con el límite requerido.

Para el cálculo de R3, se busca en la hoja de datos la tensión VBE(ON) mínima, teniendo entonces que:

**R3** = 0.8V/IREG = **33Ω**

Para la potencia de trabajo calculada, es necesario incorporar un disipador para el transistor.

De las tablas de la hoja de datos se tiene:

Tj (Máxima) = 125°C Rjc = 1.92°C/W Rcd = 0.5°C/W Ta = 60°C PD = 14.5W

La resistencia térmica para la interfaz entre la carcasa y el disipador se estimó para uso de grasa siliconada. Teniendo en cuenta lo anterior, la temperatura de juntura resultante está dada por:

Tj = Ta + PD\*(Rda + Rcd + Rjc)

De donde se despeja el valor de la mínima Rda, obteniendo:

Rda = [Tj – Ta – PD\*(Rjc+Rcd)]/PD < 3.7°C/W

Dado que un disipador con esa característica tiene un tamaño considerable (y hay que tener en cuenta luego el diseño de las dos fuentes de alimentación restantes y el gabinete del prototipo), se agregó un segundo transistor en paralelo, que se denominará Q2. Dicho transistor será idéntico a Q1, con el objetivo de disipar la mitad de la potencia requerida, y poder utilizar disipadores de dimensiones más pequeñas. El circuito queda entonces con la siguiente estructura:

A picture containing application

Description automatically generated

Figura 6‑7: Fuente Regulada de 3.3V optimizada

La potencia que disipa cada transistor es ahora de 14.5W/2 = 7.25W. Se vuelve a calcular la resistencia térmica máxima posible para el disipador (de cada uno):

Rda = [Tj – Ta – PD\*(Rjc+Rcd)]/PD < 10°C/W

Para este propósito, se disponen de disipadores de **aluminio** **ZD35** de **63mm** de extrusión, cuya **Rda = 8°C/W**, que cumple con la cota necesaria.

Para establecer la tensión de salida deseada, se configuran los valores para las resistencias R1 y R2. A partir de la ecuación de cálculo provista por la hoja de datos:

Vout = 1.25V\*[1+(R2/R1)] + Iadj\*R2

Donde Iadj es la corriente de polarización del circuito integrado, y está dada por la hoja de datos. Para el diseño, se considera el peor caso; es decir el valor máximo que ésta puede tomar, que de acuerdo con la hoja de datos es de 100uA. Tomando **R1 = 240Ω** y **R2 = 390Ω**, de metal film y tolerancia de 1% (dado que se tiene un mejor coeficiente de temperatura y estabilidad). Se obtiene entonces un valor máximo de Vout = 3.32V, que está en el rango permisible [2.7V – 3.6V]. La diferencia aportada por el factor Iadj es de aproximadamente 0.05V; por lo tanto, la variación no resulta apreciable.

Finalmente, para la selección de los valores de los capacitores, se toman en consideración los sugeridos por la hoja de datos del regulador (Texas Instruments).

De esta forma, se tiene **Cin = 10uFx100V**, tal que el voltaje nominal sea 1.5 veces la tensión a la que estará conectado, en cuyo peor caso es 57V. Por lo tanto, 1.5\*57V = 85.5V (hacia arriba, el primer valor comercial es de 100V). Para la salida, se tiene entonces **Cout = 47uFx16V** (tomando el mismo criterio previo, 1.5\*3.3V = 5V).

### Plan de pruebas

Para la validación del módulo, se requiere que se encuentre ya validado el módulo <<Controlador PoE>>. El objetivo es verificar que, para una tensión de entrada Vin provista por dicho módulo, se obtiene una tensión de salida Vout de valor esperado 3.3V, que deberá comprendida en el rango [2.7V – 3.6V].

Los elementos requeridos para realizar las pruebas son los siguientes:

* Módulo <<Controlador PoE>> validado
* Osciloscopio Digital

Estando apagado, conectar la salida del módulo <<Controlador PoE>> a la entrada Vin del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta la polaridad. Configurar el osciloscopio, teniendo en cuenta el acople para visualizar señales con nivel de DC. Luego, conectar una punta a la salida Vout del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta nuevamente la correcta polaridad para la referencia de GND. Encender el módulo <<Controlador PoE>>, y luego de que éste haya realizado su período de inicialización, comprobar que en el osciloscopio se observe una señal VDC comprendida en el rango indicado previamente.

### <<Alimentación Interna 24V>>

### Descripción

La fuente de 24V se requiere para alimentar la Interfaz de Salidas Digitales. De las características de entrada y salida (a detallar a continuación) surgen los criterios de diseño a adoptar, siguiendo además las recomendaciones dadas por los fabricantes.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

El proceso de diseño en este caso es similar al desarrollado para <<Alimentación Interna 3.3V>>. Para el diseño se consideran ahora las siguientes características:

* **Entrada**: Tensión proveniente de PoE (37V – 57V)

Para las salidas, se tiene en cuenta de que deben poder accionar (cada una) relés simples de 24VDC – 10A. La corriente característica de la bobina interna de este tipo de relés para su activación está entre 30mA-40mA. Se toma para el diseño una corriente de hasta 50mA por salida. Siendo 4 salidas, resulta en una corriente total de 200mA. Entonces:

* **Salida**: VDD = 24VDC, IDD = 0.2A

Como objetivo de diseño, se toma entonces una Vo = 24V, y Io (máxima) = 0.2A + 25% = 0.25A.

Para este caso resulta también útil el circuito integrado **LM317HVT**, utilizado en <<Alimentación Interna 3.3V>>, dado que es posible también configurarlo para obtener 24V a su salida. Para verificar que puede cumplir los requisitos, se halla la zona de trabajo en la siguiente curva de operación, considerando:

* INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL = 57V-24V = 33V
* OUTPUT CURRENT = 250mA

Chart

Description automatically generated

Figura 6‑8: Límite de la zona de trabajo – T Package Device

Aunque para la curva correspondiente a Tj = 25°C se tiene un margen considerable, se optó por derivar el consumo a través de un transistor externo, en una topología similar a la planteada en <<Alimentación Interna 3.3V>>. La estructura del circuito resultante es la siguiente:

A picture containing chart

Description automatically generated

Figura 6‑9: Fuente Regulada de 24V

Para el regulador lineal, se considera una corriente de regulación (IREG) de 30mA para que se encienda el transistor Q1 a través de R3, similar al criterio adoptado para <<Alimentación Interna 3.3V>>. El resto de la corriente máxima posible (220mA) serán conducidos por el transistor Q1.

El transistor a seleccionar debe cumplir entonces los siguientes requerimientos de funcionamiento:

* HFE (DC) Mínimo > ICC/IREG = 10
* VCE0 (250mA) > 33V
* Potencia disipada máxima > VCE\*(ICC-IREG) = 7.25W

El transistor **TIP127** (encapsulado TO-220) cumple con estas características. Para verificar el margen disponible para la VCE0, se busca el punto de trabajo en la curva característica de la zona de operación segura:

A picture containing diagram

Description automatically generated

Figura 6‑10: TIP127 – Zona de Operación Segura

A partir del punto de intersección, se verifica que VCE0 para la corriente dada cumple con el límite requerido.

Para el cálculo de R3, se busca en la hoja de datos la tensión VBE(ON) mínima, teniendo entonces que:

**R3** = 0.8V/IREG = **33Ω**

Para la potencia de trabajo calculada, es necesario incorporar un disipador para el transistor.

De las tablas de la hoja de datos se tiene:

Tj (Máxima) = 125°C Rjc = 1.92°C/W Rcd = 0.5°C/W Ta = 60°C PD = 7.25W

La resistencia térmica para la interfaz entre la carcasa y el disipador se estimó para uso de grasa siliconada. Teniendo en cuenta lo anterior, la temperatura de juntura resultante está dada por:

Tj = Ta + PD\*(Rda + Rcd + Rjc)

De donde se despeja el valor de la mínima Rda, obteniendo:

Rda = [Tj – Ta – PD\*(Rjc+Rcd)]/PD < 9.9°C/W

Para este propósito, se disponen de disipadores de **aluminio** **ZD35** de **63mm** de extrusión, cuya **Rda = 8°C/W**, que cumple con la cota necesaria.

Para establecer la tensión de salida deseada, se configuran los valores para las resistencias R1 y R2. A partir de la ecuación de cálculo provista por la hoja de datos:

Vout = 1.25V\*[1+(R2/R1)] + Iadj\*R2

Donde Iadj es la corriente de polarización del circuito integrado, y está dada por la hoja de datos. Para el diseño, se considera el peor caso; es decir el valor máximo que ésta puede tomar, que de acuerdo con la hoja de datos es de 100uA. Tomando **R1 = 220Ω** y **R2 = 3K9**, de metal film y tolerancia de 1% (dado que se tiene un mejor coeficiente de temperatura y estabilidad). Se obtiene entonces un valor máximo de Vout = 23.8V, que está en el rango permisible [20.4V – 26.4V] dado por los requerimientos.

Finalmente, para la selección de los valores de los capacitores, se toman en consideración los sugeridos por la hoja de datos del regulador (Texas Instruments).

De esta forma, se tiene **Cin = 10uFx100V**, dado que las características de entrada son las mismas que para <<Alimentación Interna 3.3V>>. Para la salida, se tiene **Cout = 47uFx50V** (tomando el mismo criterio previo, 1.5\*24V = 36V, el valor comercial superior más cercano disponible es de 50V).

### Plan de pruebas

Para la validación del módulo, se requiere que se encuentre ya validado el módulo <<Controlador PoE>>. El objetivo es verificar que, para una tensión de entrada Vin provista por dicho módulo, se obtiene una tensión de salida Vout de valor esperado 24V, que deberá comprendida en el rango [20.4V – 26.4V].

Los elementos requeridos para realizar las pruebas son los siguientes:

* Módulo <<Controlador PoE>> validado
* Osciloscopio Digital

Estando apagado, conectar la salida del módulo <<Controlador PoE>> a la entrada Vin del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta la polaridad. Configurar el osciloscopio, teniendo en cuenta el acople para visualizar señales con nivel de DC. Luego, conectar una punta a la salida Vout del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta nuevamente la correcta polaridad para la referencia de GND. Encender el módulo <<Controlador PoE>>, y luego de que éste haya realizado su período de inicialización, comprobar que en el osciloscopio se observe una señal VDC comprendida en el rango indicado previamente.

### <<Carga por USB>>

### Descripción

Fuente de 5V que hizo Ari, le agrego la justificación breve de que una lineal llevaría o varios transistores o disipadores tamaño casa

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

Para este caso se tiene en consideración el circuito integrado **LM317HVT**, utilizado en <<Alimentación Interna 3.3V>>, dado que es posible también configurarlo para obtener 5V a su salida. Para verificar que puede cumplir los requisitos, se halla la zona de trabajo en la siguiente curva de operación, considerando:

* INPUT-OUTPUT DIFFERENTIAL = 57V-5V = 52V
* OUTPUT CURRENT = 1.2A

Chart

Description automatically generated with medium confidence

Figura 6‑11: Límite de la zona de trabajo – T Package Device

Dado que el punto de operación se encuentra muy por fuera de la zona de trabajo permitida, necesariamente debería derivarse el consumo mediante transistores externos. Teniendo en cuenta el transistor utilizado en <<Alimentación Interna 3.3V>> y <<Alimentación Interna 24V>>, dado que la potencia a disipar en este caso es PD = 52V\*1.2A = 62.4W, se requieren al menos dos de ellos (debido a que como máximo, la potencia que puede disipar cada uno es de 50W). Por otra parte, la temperatura ambiente considerada es también alta respecto a la normal de 25°C (en este caso son 60°C), por lo que el diseño llevaría a tener que implementar incluso más de 2 transistores y/o utilizar disipadores de dimensiones mucho más grandes que las consideradas en <<Alimentación Interna 3.3V>> y <<Alimentación Interna 24V>>. Además, se añade el calor adicional que produciría el circuito. Por estos motivos, se decidió recurrir a un diseño de fuente tipo switching.

Y acá viene el diseño…

### Plan de pruebas

Para la validación del módulo, se requiere que se encuentre ya validado el módulo <<Controlador PoE>>. El objetivo es verificar que, para una tensión de entrada Vin provista por dicho módulo, se obtiene una tensión de salida Vout de valor esperado 5V.

Los elementos requeridos para realizar las pruebas son los siguientes:

* Módulo <<Controlador PoE>> validado
* Osciloscopio Digital

Estando apagado, conectar la salida del módulo <<Controlador PoE>> a la entrada Vin del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta la polaridad. Configurar el osciloscopio, teniendo en cuenta el acople para visualizar señales con nivel de DC. Luego, conectar una punta a la salida Vout del módulo bajo prueba, teniendo en cuenta nuevamente la correcta polaridad para la referencia de GND. Encender el módulo <<Controlador PoE>>, y luego de que éste haya realizado su período de inicialización, comprobar que en el osciloscopio se observe una señal de 5VDC.

### <<Unidad de Control>>

### Descripción

En primera instancia, para la Unidad de Control se utilizará la placa de desarrollo básica existente **HP Ethernet MCU card with STM32F407VGT6**, de laempresa MikroElektrónika:

A screenshot of a computer game

Description automatically generated with low confidence

Figura 6‑12: Placa de desarrollo básica

La placa de desarrollo posee las siguientes características:

* Cristal y elementos pasivos embebidos.
* Líneas de comunicación por USB 🡺 Permite la programación del microcontrolador de forma externa.
* Ethernet Transceiver 🡺 Resuelve la interfaz de conexión requerida entre el periférico que posee el microcontrolador y las conexiones provenientes del cable Ethernet externo (**PHY**).
* Puede utilizarse tanto en un placa de prueba como en el prototipo y el producto final.

En los agujeros disponibles serán soldadas tiras de pines, que permitirán conectar dicha placa a otra placa general, con todas las interfaces principales del diseño.

En segunda instancia, se tiene la conexión de los calibres a la Unidad de Control para la transmisión de las mediciones.

En tercera instancia, deben conectarse a la Unidad de Control por un lado el pedal para solicitar lectura de medición de un calibre, y por otro lado una conexión proveniente de un PLC que indica que se debe contabilizar una pieza adicional al inventario. Dichas conexiones, cuando están en nivel alto, son de 24VDC, por lo que deben adaptarse adecuadamente a las entradas de la Unidad de Control. Por requerimiento del cliente, dicha adaptación se realizará mediante el uso de optoacopladores.

Como optoacoplador se utilizará el **TLP521-2**, dado que es simple de conseguir en los proveedores del país y posee dos circuitos optoacopladores internos, que son la cantidad requerida.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

Por cada calibre, se tienen las siguientes 4 conexiones:

* /REQ (Input): en estado **bajo** inicia la transmisión
* DATA (Output): trama de 13 bits con la información de la medición y configuración
* CLK (Output): señal de reloj generada por el calibre para sincronización
* GND: tierra

La entrada de /REQ está conectada a una resistencia de Pull-Up interna a la tensión de la pila del calibre (1.55V):

Shape

Description automatically generated with medium confidence

Figura 6‑13: Entrada de un Calibre

Puede conectarse directamente a uno de los puertos de la Unidad de Control, de tal forma que para utilizarla se colocará el puerto en estado **bajo** para establecer el mismo estado en la entrada tratada, o en **alta impedancia** para establecer el estado alto.

Las salidas DATA y CLK son de tipo **Open Drain**, por lo que se debe agregar una resistencia de Pull Up externa para conectarlas a los puertos de la Unidad de Control:

Shape

Description automatically generated with low confidence

Figura 6‑14: Salidas de un Calibre

Para las entradas de comando de pedal y PLC, el diseño del circuito tiene la siguiente estructura:

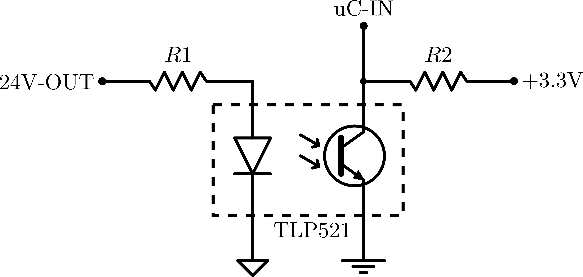


Figura 6‑15: Circuito para optoacoplado 24V – 3.3V [Por cada entrada]

De la hoja de datos del circuito integrado, se tienen las condiciones recomendadas de trabajo para el diseño:

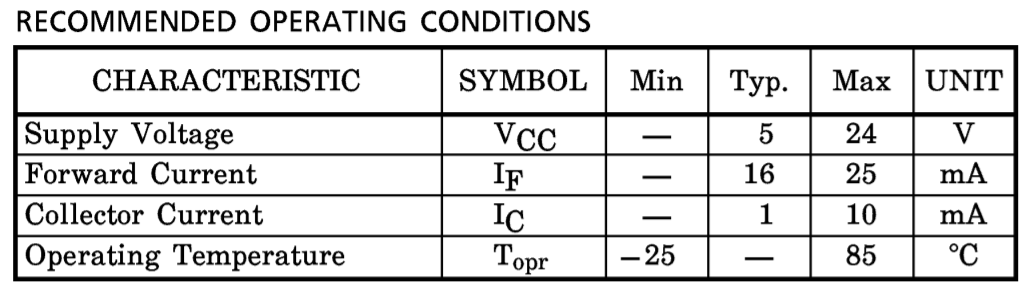


Figura 6‑16: Tabla de Condiciones de operación recomendadas (Futurlec)

Donde IF será la corriente por R1 e IC la corriente por R2.

Tomando un valor intermedio para IF = 20mA, se ingresa a la curva de operación IF-VF:

Chart, line chart

Description automatically generated

Figura 6‑17: Curva de trabajo IF-VF (Futurlec)

Se tiene que para IF = 20mA, VF = 1.2V. Entonces resulta:

R1 = (24V – VF)/IF = 1.14K 🡺 **R1 = 1K + 150Ω** [Tol. 1% - Metal Film], a fin de disminuir las variaciones.

Tomando un valor intermedio para IC = 5mA, se ingresa a la curva de trabajo IC-VCE:

Chart, diagram

Description automatically generated

Figura 6‑18: Curva de operación IC-VCE (Futurlec)

Se tiene que para IC = 5mA, con IF = 20mA resulta VCE = 0.1V. Este valor para saturación es importante verificar que sea menor a la VIL indicada por el fabricante de la Unidad de Control, a saber:

VIL = 0.3\*VDD = 0.3\*3.3V = 1V

Con lo que se está dentro del límite permitido, para que dicho valor de VCE sea considerado como un cero lógico. Se tiene entonces:

R2 = (3.3V - VCE)/IC = 640Ω 🡺 **R2 = 680Ω** [Tol. 1% - Metal Film]

### Plan de pruebas

La prueba de comunicación con los calibres, una vez conectados a la Unidad de Control, debe realizarse desde el Software (a detallar más adelante). Debe, además, encontrarse validado el módulo <<Alimentación Interna 3.3V>>.

Para la prueba de funcionamiento de las señales de los comandos externos, se requiere:

Los elementos requeridos para realizar las pruebas son los siguientes:

* Módulo <<Alimentación Interna 3.3V>> validado
* Osciloscopio Digital
* Fuente de 24VDC externa

El procedimiento a describir debe repetirse para ambas entradas.

Tomando una de las entradas, se conecta la fuente de 24VDC entre los pines (24V-OUT, GND-Externa) respetando la polaridad). Conectar luego el osciloscopio en su respectiva salida (los pines uC-IN, GND-Interna), estando configurado para poder visualizar señales con nivel de DC. Debe visualizarse una tensión continua de 0.2V o menor.

Luego, conectar ambos pines (24V-OUT, GND-Externa) a la referencia de la fuente externa, de forma tal que haya 0V entre ambos. En el osciloscopio ahora deberá visualizarse una tensión continua de 3.3V.

### <<Interfaz Entradas Analógicas>>

### Descripción

Como interfaz para las entradas analógicas de corriente 4-20mA, se utiliza el **ADS7841**, que es un ADC cuyas entradas pueden ser tomadas en forma simple (referidas a GND) o diferencial (esta última es la que resulta de interés). La medición es comunicada a la unidad de control a través de un protocolo serie SPI.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

Dado que se tienen 4 entradas analógicas de corriente, y cada circuito integrado permite conectar 2 entradas diferenciales, se requerirán dos unidades de éste. El conexionado típico estipulado por la hoja de datos es el siguiente:

Diagram, schematic

Description automatically generated

Figura 6‑19: Configuración básica del ADS7841 (Texas Instruments)

Las entradas diferenciales deberán conectarse a resistencias en paralelo, como se muestra en la siguiente figura:

Diagram

Description automatically generated with medium confidence

Figura 6‑20: Conexión a lazos de corriente [Por cada circuito integrado]

Teniendo en cuenta el máximo valor de corriente, se calcula el máximo valor que podrán tener las resistencias, dado que la diferencia de tensión que se produzca no puede superar el valor de la tensión de alimentación (3.3V). Luego, normalizando hacia abajo:

**RL** = 3.3V/20mA = 165Ω 🡺 **150Ω**

En base a esto, se tiene para los límites de operación que las caídas de tensión serán:

* + 4mA 🡺 0.6V
  + 20mA 🡺 3V

### Plan de pruebas

Para la validación del módulo, se requiere que ya esté validado el módulo <<Alimentación Interna 3.3V>>. El objetivo en este caso será comprobar mediante una medición diferencial realizada con un osciloscopio, que se produzcan las caídas de tensión esperadas sobre las resistencias.

Para realizar la prueba se requieren los siguientes elementos:

* Módulo <<Alimentación Interna 3.3V>> validado
* Instrumental para generación de lazo de corriente
* Voltímetro Digital

El procedimiento a describir se realiza sobre la resistencia RL1, debe repetirse para la otra resistencia RL2 y para las resistencias sobre el segundo circuito integrado.

Configurar el instrumental de generación de lazo de corriente a 4mA, y conectar sobre la entrada correspondiente a RL1. Luego, medir la diferencia de tensión sobre la resistencia con el Voltímetro, debiendo observarse un valor de tensión continua de 0.6V.

Configurar el instrumental para generación de lazo de corriente en 20mA, y repetir la medición, debiendo observarse en este caso un valor de tensión continua de 3V.

Realizadas las validaciones anteriores, se procederá luego con la validación de las lecturas de ADC a través de la sección de Software.

### <<Interfaz Salidas Digitales>>

### Descripción

Con la interfaz para las salidas digitales de 24VDC, se utiliza un circuito estructurado mediante optoacopladores y transistores para aislar la señal de control proveniente de la Unidad de Control, de las salidas propiamente dichas.

### Detalles de selección y cálculo de los elementos circuitales

### Plan de pruebas

## Software

### Diagrama de estados y flujogramas

El software a programar en la Unidad de Control deberá contar con 3 partes principales:

* Establecer la comunicación entre la placa y los calibres
* Incrementar el contador de piezas en el servidor, cada vez que se indique por comando externo
* Realizar lectura de entradas analógicas y controlar encendido de salidas digitales según se indique

A continuación, se muestran los diagramas de estados y flujogramas correspondientes:

Diagram

Description automatically generated

Diagrama 1: Comunicación entre Placa y Calibres

Graphical user interface, text, application, chat or text message

Description automatically generated

Diagrama 2: Conteo de piezas producidas

Diagram

Description automatically generated

Diagrama 3: Control de entradas analógicas y salidas digitales

### Análisis de complejidad

Analizando conceptualmente los diagramas de flujo del programa, se observa que ningún algoritmo que forma parte del código involucra operaciones en función de la cantidad de muestras (como podría ser, por ejemplo un cálculo de una transformada rápida de Fourier con complejidad O(n log n)), ni tampoco se presentan multiplicaciones. Por ello, se llega a la conclusión de que la complejidad es de O(1), dado que el tiempo de ejecución de las diferentes subrutinas que conforman el código es constante.

### Comunicación con calibres - Protocolo

El fabricante Mitutoyo brinda una hoja de datos donde se especifica el protocolo que utilizan.

A screenshot of a video game

Description automatically generated with low confidence

Figura 6‑21: Trama de datos de comunicación de calibres

Dado que la trama no corresponde a un estándar común utilizado (como lo es por ejemplo SPI, a utilizar en <<Interfaz Entradas Analógicas>>), se optó por implementarlo mediante una combinación de GPIO e interrupciones.

### Descripción de subrutinas

Para poder empezar a pensar en las subrutinas se debe recordar cuales son las principales funcionalidades que debe cumplir el dispositivo. Se distinguen en color verde las funciones disponibles en SDK y en negrita las funciones implementadas por el equipo de desarrollo.

* Tiene que poder recibir de la entrada de pedal la orden de leer la medición, adquirir la medición y enviarla al servidor.
  + Poder leer el pedal: interrupciones de GPIO (flanco ascendente).
  + Tomar medición: **digimaticGetMeasure** (Protocolo Digimatic) que requiere interrupciones de GPIO, HAL\_GPIO\_ReadPin y HAL\_GPIO\_WritePin.
  + Validación de frame: **digimaticIsValidFrame**.
  + Enviar frame al servidor: **ETHSendFrameHandler**, la cual arma el paquete según que se necesita enviar (en este caso es un valor de medición de calibre) y luego hace uso de **HAL\_ETH\_TransmitFrame**.

**CaliperManager**: administra las funciones previamente descritas, y se activa con la interrupción del pedal.

* Tiene que llegar un comando desde el servidor vía Ethernet y poder discernir si se está tratando de leer una entrada analógica o encender/apagar una salida digital, y actuar en consecuencia.

Se utiliza una interrupción de recepción vía Ethernet: hace uso de HAL\_ETH\_GetReceivedFrame , y luego en base a lo que se recibió por medio de **ETHReceiveFrameHandler**, se determina la operación a realizar. Separando en los dos casos posibles:

* + Entradas Analógicas
    - Leer ADC: usa HAL\_SPI.
    - Validación de lectura de ADC: **analogValidate**, si no es válido le avisa al servidor que vuelva a intentar.
    - Enviar dato de la entrada al servidor: **ETHSendFrameHandler**, la cual arma el paquete según que se necesita enviar (en este caso es un valor de medición de entrada analógica) y luego hace uso de **HAL\_ETH\_TransmitFrame**.
  + Salidas Digitales
    - Encender/Apagar salida: usa HAL\_GPIO\_WritePin.

**analogInDigitalOutManager**: administra las funciones previamente descritas, y se activa con la interrupción de recepción de Ethernet.

* Tiene que poder, en base a una señal digital provista desde un PLC, enviar un mensaje al servidor para incrementar el contador de piezas producidas.
  + Poder leer la señal: interrupciones de GPIO y HAL\_GPIO\_ReadPin.
  + Enviar el incremento en la cantidad de piezas al servidor: **ETHSendFrameHandler**, la cual arma el paquete según que se necesita enviar (en este caso es incrementar el contador de piezas producidas) y luego hace uso de **HAL\_ETH\_TransmitFrame**.

**pieceCounterManager**: administra las funciones previamente descritas, y se activa con la interrupción generada por la señal del PLC.

### Listados comentados del código

typedef enum {

    READ\_ANALOG\_INPUT,

    SET\_DIGITAL\_OUTPUT

} received\_frame\_t;

typedef enum {

    CALIPER\_MEASURE,

    ANALOG\_IN\_MEASURE,

    INCREMENT\_COUNTER,

    WARNING\_NOT\_VALID\_CALIPER\_MEASURE,

    RETRY\_ANALOG\_IN\_MEASURE

} send\_frame\_t;

void ETHSendFrameHandler(send\_frame\_t frame\_type, uint16\_t\* data){

    switch(frame\_type){

        case CALIPER\_MEASURE:

        // statement using HAL\_ETH\_TransmitFrame(...);

        break;

        case ANALOG\_IN\_MEASURE:

        // statement using HAL\_ETH\_TransmitFrame(...);

        break;

        case INCREMENT\_COUNTER:

        // statement using HAL\_ETH\_TransmitFrame(...);

        break;

        case WARNING\_NOT\_VALID\_CALIPER\_MEASURE:

        // statement using HAL\_ETH\_TransmitFrame(...);

        break;

        case RETRY\_ANALOG\_IN\_MEASURE:

        // statement using HAL\_ETH\_TransmitFrame(...);

        break;

        default:

        break;

    }

}

received\_frame\_t ETHReceiveFrameHandler(uint16\_t receivedFrame, uint16\_t \* receivedData){

    //caracteristica del paquete, suponiendo b15 = 1 significa analog in

    \*receivedData = receivedFrame & ~(1<<15);

    if(receivedFrame & 1<<15){

        return READ\_ANALOG\_INPUT;

    }else{

        return SET\_DIGITAL\_OUTPUT;

    }

}

uint16\_t digimaticGetMeasure(void){

    // Administracion del protocolo digimatic

    // Activar señal de request

    // Encender CLK por 13 ciclos

    // En cada ciclo se lee DATA

    uint16\_t data = 0;

    // aca va el protocolo digimatic

    return data;

}

// En flanco ascendente del pedal

void CaliperManager(void){

    uint16\_t measure = 0;

    uint8\_t retry\_times = 3;

    bool is\_valid = false;

    while(retry\_times > 0 && !is\_valid){

        measure = digimaticGetMeasure(); // this is probably blocking

        is\_valid = digimaticValidateFrame(measure);

        retry\_times--;

    }

    if(is\_valid){

        ETHSendFrameHandler(CALIPER\_MEASURE, &measure);

    }else{

        ETHSendFrameHandler(WARNING\_NOT\_VALID\_CALIPER\_MEASURE, NULL);

    }

}

// Interrupción Rx Ethernet

void AnalogInDigitalOutManager(void){

    uint16\_t receivedFrame = HAL\_ETH\_GetReceivedFrame(...);

    uint16\_t receivedData = 0;

    received\_frame\_t received\_state = ETHReceiveFrameHandler(receivedFrame, &receivedData);

    if(received\_state == READ\_ANALOG\_INPUT){

        if(analogValidate(receivedData){ // si es valido

            ETHSendFrameHandler(ANALOG\_IN\_MEASURE, &receivedData);

        }else{

            ETHSendFrameHandler(RETRY\_ANALOG\_IN\_MEASURE, NULL);

        }

    }else if(received\_state == SET\_DIGITAL\_OUTPUT){

        HAL\_GPIO\_WritePin(receivedData);

    }

}

// Interrupcion por señal de PLC

void pieceCounterManager(void){

    ETHSendFrameHandler(INCREMENT\_COUNTER, NULL);

}

### Plan de prueba de módulos y de depuración de Software

Se va a utilizar un enfoque bottom-up para hacer el debugging. Es decir, se prueban primero las unidades más pequeñas para luego acoplarlas al programa principal.

* **Ethernet**
  + *Recepción*
    - Prueba: Envío de paquete de Ethernet de tipo **testETHRx** desde la PC.
    - Resultado esperado: Se active la interrupción de RX y se reciba el **testFrameRx**. #IFDEF **TEST\_ETH\_RX** assert(receivedFrame == **testFrameRx**)
  + *Envío*
    - Prueba: Envio de paquete de Ethernet de tipo **testETHTx** desde la PC.
    - Resultado esperado: Se active la interrupción de Rx y como se detectó que el paquete es de tipo **testETHTx**, hay que responder al servidor en ese momento con un frame de tipo **ACK** por Ethernet y ver que vuelve por la terminal.
* **Calibres**
  + *Con calibre encendido*
    - Prueba: se mide un objeto de dimensiones conocidas y se emula el pedal de medición conectado al GPIO.
    - Resultado esperado: En **digimaticGetMeasure** si hay un error, ocurre un assert: #IFDEF **CALIPER\_TEST** assert(MIN\_VAL <= measure <= MAX\_VAL). Recibir por Ethernet el valor medido.
  + *Con calibre apagado*
    - Prueba: se emula el pedal de medición conectado al GPIO.
    - Resultado esperado: esperar el frame de warning a través de Ethernet en la PC.
* **Entradas Analógicas**
  + *En rango*
    - Prueba: ingresar al sistema con corrientes entre 4mA y 20mA. Enviar mensaje via Ethernet para tomar medición del ADC.
    - Resultado esperado: debe llegar por medio de Ethernet el valor medido.
  + *Fuera de rango*
    - Prueba: ingresar al sistema con una corriente fuera de rango (0mA). Enviar mensaje vía Ethernet para tomar medición del ADC.
    - Resultado esperado: cuando falla la validación, debe llegar un frame de tipo RETRY a la PC mediante Ethernet.
* **Salidas Digitales**
  + - Prueba: se envía un paquete por Ethernet de tipo apagarSalida/encenderSalida.
    - Resultado esperado: con un osciloscopio medir las salidas y comprobar que el estado lógico es correcto.
* **Contador de Piezas**
  + - Prueba: se emula la señal del PLC, conectado al GPIO.
    - Resultado esperado: debería activarse interrupción de recepción por Ethernet con el tipo de paquete **contador de piezas**. En la PC se debería recibir el paquete de **incrementar piezas**.

# Construcción del prototipo

## Definición de los módulos

## Diseño de los circuitos impresos

## Diseño mecánico

## Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje

## Bill of Materials (BOM)

# Validación del prototipo

## Estudios de confiabilidad de hardware y de software

## Resultados

## Evaluación

### Evaluación de resultados técnicos

### Evaluación de la planificación

### Evaluación de la factibilidad financiera

Consideraciones finales hacia el producto final

# Referencias

## LIBROS

## REVISTAS

## Notas de aplicación

## Fuentes Online

Compatibilidad Electromagnética - IRAM [Online]. Available: https://cie.gov.ar/web/images/Compatibilidad-Electromagnetica.pdf

Normas IP ANSI [Online]. Available: https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/que-son-las-normas-ip

Lazos de corriente 4-20mA [Online]. Available: https://www.herramientasingenieria.com/onlinecalc/spa/4\_20mA.html

CPI: ¿Por qué 4-20mA? [Online]. Available: https://cpi.com.ar/notas/por-que-4-20-ma/

Design in high power POE IEEE [Online]. Available: https://www.digikey.com/es/articles/design-in-high-power-poe-ieee-8023bt-solutions

IEEE Standard for Ethernet [Online]. Available: https://es.qwe.wiki/wiki/Power\_over\_ethernet#Power\_levels\_available

Módulo de salida drenador de 24 VCC de estado sólido Compact (Especificaciones de Salida) [Online]. Available:

https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1769-in056\_-es-p.pdf

# Anexos Técnicos

## Esquemáticos

## Planos de PCB

## Listado de Partes y Componentes (*BOM*)

## Códigos de Software

## Hojas de Datos de Componentes

Diagram

Description automatically generated

Figura 10‑1: Especificaciones de comunicación del calibre

## Hojas de Aplicación, etc.

## Otra Documentación Técnica