

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

**Master Universitario Oficial en Automatización y Telecontrol
para la gestión de Recursos Hídricos y Energéticos**



**Estudio de Prototipo de mejora
hardware/software para Automatización de
Lisímetro de Pesada (LP3).**

TRABAJO FIN DE MASTER

AUTOR:

Sergio Belmonte Martínez

DIRECTOR/ES:

José Miguel Molina Martínez

Leandro Ruiz Peñalver.

Antonio Ruiz Canales

Diciembre 2017

RESUMEN

El objetivo del siguiente proyecto “Estudio de Prototipo de mejora hardware/software para Automatización de Lisímetro de Pesada (LP3)” ha consistido básicamente en el estudio sobre implantación de un sistema de adquisición y control de datos mediante comunicación Modbus usando como equipo de medida y control un ArduPLC, equipo que proviene de la familia de los Arduino.

Partiendo de la base de otros prototipos de lisímetros, se ha intentado integrar dicho ArduPLC, en una versión de lisímetro vertical, como podrá verse más detalladamente e el contenido de la memoria.

Paralelamente, en otras versiones de lisímetros se han utilizado otros tipos de equipos para adquisición de datos, como puede ser el Datalogger CR300, en este estudio se ha intentado suplir dicho equipo con el ArduPLC, manteniendo la filosofía de obtener un lisímetro de pesada lo más funcional y económico posible, y su montaje haría prescindir de otros elementos de otras versiones, como por ejemplo los relés de maniobra los cuales van integrados en el mismo equipo.

Mencionar que algunos de los puntos descritos en el desarrollo de la memoria, podemos decir que se dan por validados por extensión de versiones anteriores de lisímetros.

El desarrollo de este tipo de equipos finalmente serán un paso más sobre las previsiones en la tecnología agrícola en un futuro venidero, en lo que se refiere a la industrialización 4.0, en el término de (IoT) *Internet of things*, usando internet como medio de comunicación de nuestros equipos para poder tener control directo mediante la acción humana.

Aunque en este proyecto no se desarrolla completamente este punto, sí que se dan unas pinceladas para integrar una serie de componentes (shields) en nuestro ArduPLC, que cumplirían con este fin y porque no mirando más allá, integrar el término de visión artificial para posibles versiones de lisímetros.

Finalizar diciendo que dicho Trabajo fin de Master es una pequeña contribución al desarrollo de futuros prototipos de Lisímetros llevados a cabo por Telenatura y el departamento de Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena, y por otro lado ser parte de proyectos realizados por la Universidad Miguel Hernández.

ABSTRACT

The objective of the following project "Study of Prototype Hardware / Software for Automation of Weighing Lysimeter (LP3)" has consisted basically of the study on the implementation of a data acquisition and control system using as measurement and control equipment an ArduPLC, equipment that comes from the Arduino family, through Modbus communication.

Starting from the basis of other lysimeter prototypes, an attempt has been made to integrate said ArduPLC, in a vertical lysimeter version, as can be seen in more detail in the content of the memory.

In parallel, in other versions of lysimeters have been used other types of equipment for data acquisition, such as the Datalogger CR300, in this study has tried to replace said equipment with the ArduPLC, maintaining the philosophy of obtaining a weighing lysimeter as functional and economic possible, and its assembly would do without other elements of other versions, such as the maneuver relays which are integrated into the same equipment.

Mention that some of the points described in the development of memory, we can say that they are validated by extension of previous versions of lysimeters.

The development of this type of equipment will finally be a step more on the forecasts in the agricultural industry in the future, in what refers to the 4.0 industrialization, in the term of (IoT) Internet of things, using internet as a means of communication of our teams to be able to have direct control through human action.

Although in this project this point is not fully developed, some brushstrokes are given to integrate a series of components (shields) in our ArduPLC, which would fulfill this purpose and because not looking further, integrate the term of artificial vision for possible versions of lysimeters.

Finish by saying that said Final Master's Project is a small contribution to the development of future prototypes of lysimeters carried out by Telenatura, the Department of Agromotics and the sea of the Polytechnic University of Cartagena and the Miguel Hernández University of Elche in the Technical School of Oirhuela.

AGRADECIMIENTOS

Mi inquietud por seguir enriqueciéndome personalmente y profesionalmente, me llevo a tomar la decisión de llevar acabo el Master en Automatización y Telecontrol de Recursos Hídricos y Energéticos, pensando que una vez finalizado me daría mayores oportunidades laborales por un lado, por otro poder seguir creciendo en lo que a conocimientos se refiere, y por ultimo seguir creciendo a nivel personal ya que este tipo de retos que uno se marca en ciertos periodos de su vida, ya sea a los 20, a los 30 o a los 70, hace enfrentarse a ciertas pruebas que te pone la vida, y poder superarlas, y al fin y al cabo esto es lo que nos hace crecer como personas.

A lo largo de mi vida me he enfrentado a diferentes pruebas, metas etc, y esta ha sido una de mi ultimas metas, por ello quería hacer mención de las personas que han hecho que haya podido cumplirlas, en especial a mi mujer, Swati, persona que desde que la conozco ha estado siempre a mi lado, y sin que ella lo supiera, y solo viendo como se ha enfrentado a ciertas situaciones de cierta dificultad, que le ha puesto la vida en su camino y como las ha afrontado ha hecho que percibiera la vida desde otra perspectiva. Este último tiempo no ha sido fácil para ninguno de los dos, pero agradecerte que hayas estado ahí!

Mi hijo de dos años que inconscientemente, ha hecho, con una simple mirada suya, que cada día fuera más fácil, y sacarme siempre una gran sonrisa.

Mi familia, siempre ha estado allí, siempre para lo bueno y para lo malo, y simplemente por ello, por ser familia, padres, hermanas y abuela, queda implícito que contribuyan a cualquier aspecto de mi vida, mis más sinceras gracias por estar siempre ahí.

No quería despedirme sin antes dar mis más sinceros agradecimientos a las personas que a continuación menciono, que son;

Director de Master, Antonio Ruiz, servicial y predispuesto a mis llamadas telefónicas, que sin conocerlo personalmente, siempre ha mostrado interés en ayudarme, hoy finalmente lo conoceré. Casualidades de la vida, en una etapa laboral de mi vida, pude conocer a un familiar suyo.

Director de proyecto, Jose Miguel, persona sensata, mostrando siempre una gran profesionalidad, y sabiduría de las cosas que dice!

Profesor asociado, Manuel Jiménez, gracias por aportar aquella clase magistral exprés.

Padre de Jose Miguel, persona enérgica y jovial, que con su edad, y con solo dos o tres encuentros, lo único que puedo decir es: admiración por sus ganas de vivir, y agradecer ese par de consejos de la vida!

Y por último hacer mención especial de Leandro Ruiz, siempre ha mostrado templanza en su saber estar, discreto en sus movimientos, pero una vez realizados, salpica a borbotones el Know-How. Gracias por haberme dado la oportunidad de compartir ese tiempo contigo en el laboratorio del ELDI.

“Hay partidos importantes que uno siente que puede ganar pero hay condicionantes externos que hacen que es día no pueda ser. En éste caso lo importante y lo que me llevo es que he podido participar en ese gran partido”.
Sergio



INDICE DE CONTENIDO:

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMIENTOS	III
INDICE DE CONTENIDO	V
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Evolución Histórica.....	2
1.3. Principio de funcionamiento de un lisímetro	4
1.4. Objetivos.....	5
2. Descripción y características del lisímetro vertical de pesada propuesta6Prototipo LP3.	4
Descripción general del funcionamiento	6
3. Dimensionado del sistema de pesaje	9
3.1. Células de carga: descripción, funcionamiento, esquemas eléctricos.....	9
3.1.1. Descripción.....	9
3.1.2. Funcionamiento.....	12
3.1.3. Esquemas Eléctricos.....	14
3.2. Dimensionado del sistema de pesaje del recipiente de cultivo (selección de las células de carga teniendo en cuenta el rango, resolución necesaria)	15
3.3. Verificación de las células de carga.....	18
3.3.1. Calibración de las células de carga	18
4. Instrumentación electrónica de pesaje	20
4.1. Sumadores electrónicos: descripción, funcionamiento, esquemas eléctricos... ..	20
4.1.1. Principio de funcionamiento	21
4.1.2. Conexión de las células de carga a una caja de sumas.....	22
4.1.3. Conexión de un indicador a la caja de sumas.....	24
4.1.4. Ajuste de la caja de sumas.....	26
4.2. Indicadores de pesada	26
4.3. Sistema de medida del recipiente de cultivo (selección del sumador, indicador de pesada, parametrización del Swift manual y mediante software del fabricante, etc.)	28
4.4. Sistema de medida del depósito de drenaje (selección del sumador, indicador de pesada, parametrización del Swift manual y mediante software del fabricante.)	29
5. Sistema de adquisición de datos (comunicaciones)	30
5.1. Equipos de adquisición de datos basados(ArduPLC).....	30
5.1.1. Descripción.....	31

5.1.2. Características principales	32
5.1.3. Especificaciones Técnicas	45
5.1.4. Esquemáticos	45
5.1.5. Selección	45
5.2. Conversor RS 232-RS485.	48
5.3. Tarjetas MicroSD, EPROM, etc., para almacenamiento de datos.	49
5.4. Comunicación industrial (RS232, RS422, RS-485, USB, etc.)	51
5.5. Protocolos de comunicaciones: ModBus	55
5.6. Comunicación ArduPLC V2 con los indicadores de pesada	58
5.7. Puerto SDI-12 (Este punto se incluirá como mejora)	60
6. Sistema de control	63
6.1. Arduino como equipo de control. ArduPLC V2: salidas digitales por transistores y por relés, salidas pwm, salidas analógicas, etc.	63
6.2. Relés y contactores (Descripción, funcionamiento, tipos, selección....)	64
6.3. Actuadores: electroválvulas. (Descripción, funcionamiento, selección)	64
6.4. Sistema de control para la gestión del depósito de drenaje	68
6.5. Actuadores: ventiladores para cuadros eléctricos.....	69
6.6. Calculo de la fuente de alimentación de las EV y el ventilador	70
6.6.1. Consumo de las electroválvulas.....	70
6.6.2. Consumo del ventilador.....	71
7. Sistema de telemetría.....	71
7.1. Telemetría y telecontrol	71
7.2. Módulos de comunicaciones para Arduino. ArduPLC V2	72
7.3. Shield GSM/GPRS SIM800L.	72
8. Software de adquisición de datos y control.....	74
8.1. IDE Arduino para ArduPLC V2	74
8.1.1. Entorno de desarrollo	74
8.1.2. Estructura básica de programa.	75
8.1.3. Declaración de variables	76
8.1.4. Funciones	77
8.2. Algoritmo de adquisición y almacenamiento de datos	78
8.3. Algoritmo de control del depósito de drenaje	80
8.4. Algoritmo de control PID de temperatura del cuadro	84
8.5. SCADA PC para visión de datos.-	85
9. Diseño y cálculo del cuadro de adquisición de datos y control.....	87
9.1. Consumo energético.	87
9.1.1. Cálculo de fuentes de alimentación	87
9.1.2. Requisitos de la fuente de alimentación.....	87
9.1.3. Selección de la fuente de alimentación	89
9.1.4. Conexión de la fuente de alimentación	90
9.2. Circuitos eléctricos y protecciones	91
9.2.1. Interruptores magnetotérmicos.....	91
9.2.1.1. Protecciones interruptores magnetotérmicos.....	91
9.2.1.2. Funcionamiento de un magnetotérmicos.....	93
9.2.1.3. Cálculo de los magnetotérmicos empleados	94
9.2.2. Interruptores Diferenciales	99
9.2.2.1. Protecciones de los interruptores diferenciales	100
9.2.2.2. Funcionamiento de un interruptor diferencial.....	100
9.2.2.3. Cálculo del diferencial empleado	102

9.2.3. Selección Protecciones.....	103
9.2.3.1. Comparativa de interruptores magnetotérmicos	103
9.2.3.2. Comparativa de interruptores diferenciales	104
9.3. Dimensionado del sistema de ventilación	105
9.3.1. Tipos de ventilación y climatización.....	105
9.3.2. Calculo del ventilador.....	107
9.4. Mecanizado y montaje del cuadro	108
9.5. Cableado y marcado.....	108
10. Instalación en campo.	109
11. Conclusiones y líneas futuras	109
12. Bibliográfica.....	111
ANEXO I: Checklist Comunicación Modbus	115
ANEXO II: Ejemplo comunicación SDI-12.....	116
ANEXO III: Sketch para obtener la temperatura del Sensor SD18B20.	119



INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Vistas 3D Prototipo Lisímetro de pesada
Figura 2: Lisímetro de Pesada Vertical
Figura 3. Célula de carga monoplato MN10.
Figura 4. CTA1 con módulo de pesaje antivuelco.
Figura 5. Célula de carga cortadura CT1A.
Figura 6. Célula de carga DC1 Y DC2
Figura 7. Célula de carga SX3
Figura 8. Célula de carga C150 a compresión
Figura 9: Circuito equivalente de una célula de carga
Figura 10: Circuito completo de una célula de carga de alta precisión
Figura 11: Características y densidad de diferentes tipos de terreno
Figura 12: Célula de carga Vetek 108TA
Figura 13: Instalación del lisímetro en campo
Figura 14. Sumador electrónico de 4 células.
Figura 15. Conexión eléctrica del sumador
Figura 16: Circuito de una caja de sumas conectada a 4 células de carga de 6 hilos
Figura 17: Conexión entre célula de carga, caja de sumas e indicador de pesaje
Figura 18: Esquema de conexión entre una célula de 4 hilos y la caja de sumas
Figura 19: Esquema de conexión entre una célula de 6 hilos y la caja de sumas
Figura 20: Marcado de la carátula del visualizador SWIFT con las señales de entrada y salida
Figura 21. Indicador de pesada Swift
Figura 22. Dimensiones SWIFT
Figura 23. Conversor de 4 a 6 hilos.
Figura 24. Sistema de Adquisición de datos.
Figura 25. ArduPLC V2.00
Figura 26: Detalle conexión, Alimentación en placa ArduPLC
Figura 27: Pruebas en Laboratorio con Relés.
Figura 28: Detalle conexión, Relés de Salida en placa ArduPLC
Figura 29: Pruebas en Laboratorio con salidas digitales.
Figura 30: Detalle conexión, Positivo común en placa ArduPLC
Figura 31: Pruebas en Laboratorio con salidas Analógicas.
Figura 32: Detalle conexión, 0-10V.
Figura 33: Detalle conexión, 0-5V.
Figura 34: Detalle conexión, 0-20mV.
Figura 35: Detalle conexión, Potenciómetro.
Figura 36: Detalle conexión, para transductor de presión 4/20mA.
Figura 37: Valores digitales de conversión.
Figura 38: potenciómetros propósitos generales.
Figura 39: Detalle conexión, Positivo común en placa ArduPLC
Figura 40: Detalle conexión, RS485 en placa ArduPLC.
Figura 41: Detalle conexión, modo SOFT RS485 en placa ArduPLC.
Figura 42: Detalle conexión, activación buzzer en placa ArduPLC.
Figura 43: Detalle conexión, zocalo tarjeta uSD en placa ArduPLC
Figura 44: Detalle conexión, RTC en placa ArduPLC
Figura 45: Detalle conexión, BUS de Expansión en placa ArduPLC
Figura 46: Detalle jumpers en placa ArduPLC

- Figura 47: Detalle Shield Etherneten placa ArduPLC
Figura 48: Detalle resistencias puente y espacio para shield en placa ArduPLC
Figura 49: Detalle resistencias puente en placa ArduPLC
Figura 50: Shield GSM/GPRS
Figura 51: Shield RS485
Figura 52: Shield TFT 1,77
Figura 53: Shield Wifly
Figura 54: Shield for Arduino MRF24J40MA
Figura 55. Programador AVR MKII.
Figura 57. Conversores RS232-RS485.
Figura 58: Driver con salida diferencial balanceada (RS 485)
Figura 59. Red RS485 a 2 hilos.
Figura 60: Red RS 485 a 4 hilos.
Figura 61: Instantánea de pruebas en Laboratorio, resistencias Pull-up.
Figura 62: RS 485 oscilloscope screenshots (pantallazo señales de comunicación Standard)
Figura 63: Señales de comunicación Standard en laboratorio a través de osciloscopio.
Figura 64: Instantánea de pruebas en Laboratorio (ref: Video de pruebas en presentación)
Figura 65: Componentes del sensor 5TE
Figura 66: Cable estéreo.
Figura 67: configuración de las conexiones en una placa Arduino UNO
Figura 68. Grafico funcionamiento electroválvula.
Figura 69. Instantánea tipo electroválvula.
Figura 70: Esquema de conexión de la electroválvula motorizada
Figura 71. Ventilador Lotec
Figura 72. Filtro AG12U Lotec.
Figura 73. GSM-SIM 800.
Figura 74. Entorno desarrollo IDE-Ejemplo código comunicación RS485.
Figura 75: Imagen Programa Labview.
Figura 76: Imagen Interfaz Labview.
Figura 77: Aspecto de la fuente S8VK-S06024
Figura 78: Esquema eléctrico de la fuente de alimentación S8VK-S06024
Figura 79: Representación gráfica de un cortocircuito
Figura 80: Partes de un magnetotérmico
Figura 81: Características de la base Famatel 13950
Figura 82: Características de la base Temper 10808
Figura 83: Efectos de la corriente eléctrica en el ser humano en función de la intensidad y el tiempo
Figura 84: Aspecto de un interruptor diferencial
Figura 85: Esquema de funcionamiento de un diferencial
Figura 86: Esquemas de interruptor diferencial controlado con toroidal, relé diferencial y bobina de disparo
Figura 87: Interruptor magneto térmico MUN510 de Hager
Figura 88: Interruptor diferencial CDC748M de Hager
Figura 89: Principio de funcionamiento de la ventilación forzada
Figura 90: Principio de funcionamiento de la aireación

Figura 91: Principio de funcionamiento del refrigerador

Figura 92: Cuadro principal.

Figura 93: Detalle de cableado y etiquetado en proceso de trabajo.



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Conexiones entre células y caja de sumas.

Tabla 2: Equivalencia en codificación de conexiones entre células de carga de 4 hilos y caja de sumas.

Tabla 3: Equivalencia en codificación de conexiones entre células de carga de 6 hilos y caja de sumas.

Tabla 4: Conexiones entre caja de sumas y visualizador con cable a 4 hilos.

Tabla 5: Conexiones entre caja de sumas y visualizador con cable a 6 hilos.

Tabla 6. Equivalencia entre las E/S de ArduPLC vs Arduino.

Tabla 7: Tipo de tarjetas y velocidades.

Tabla 8: Instrucciones Modbus disponibles en el SWIFT.

Tabla 9: Funciones del SWIFT disponibles en la comunicación Modbus.

Tabla 10: Características de la electroválvula motorizada CWX-15N-CR02.

Tabla 11: Declaración Variables.

Tabla 12: Tabla Estados del Proceso.

Tabla 13: Modelos disponibles de la fuente S8VK-S de Omron.

Tabla 14: Características de la fuente S8VK-S06024.

Tabla 15: Tipo de curvas de disparo de un magnetotérmico y sus aplicaciones.

Tabla 16: Consumo de las fuentes de alimentación utilizadas.

Tabla 17: Secciones según Interruptor utilizado.

Tabla 18: Tabla comparativa de magnetotérmicos.

Tabla 19: Tabla comparativa de diferenciales.



1. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

La medición de la humedad del suelo, como concepto, nada tiene que ver con la lisimetría. Podemos hacer la siguiente diferenciación.

El contenido en humedad de un suelo medido de forma correcta debería ser una vez se haya drenado el sobrante de forma natural. Con esto conseguimos saber el contenido en agua que queda retenida, que al fin y al cabo, parte de esa agua es la que las plantas van a utilizar en sus procesos. Este contenido en humedad se puede medir fácilmente por un tensiómetro, o sonda de humedad que nos puede dar mediciones puntuales en el tiempo con la frecuencia que se estime.

Sin embargo el lisímetro es mucho más complejo en los datos que ofrece. El agua en un suelo sufre cambios y procesos físicos de todo tipo como ya vimos en los anteriores artículos. El lisímetro, gracias a su principio de funcionamiento puede registrar las salidas de agua en el suelo. Como entradas principalmente en una parcela agrícola podemos tener 2 que son las precipitaciones y el riego que nosotros le podamos dar. Esto lo medimos fácilmente con pluviómetros, caudalímetros etc.

Y como salidas podemos tener el drenaje, la evapotranspiración (si hay cubierta vegetal) y el agua que se queda en el suelo. Con un tensiómetro conseguimos conocer la humedad del suelo en un momento dado que en teoría debe ser cuando el agua de drenaje ya ha pasado. Lo que no es fácil es determinar en qué momento ocurre eso en el suelo. El lisímetro consigue medir la cantidad que se pierde por evapotranspiración y drenaje por tanto, también podemos conocer el volumen de agua que queda en el suelo.

La evapotranspiración es una medida muy utilizada ya que permite conocer el consumo hídrico de los cultivos y por tanto nos da exactamente las necesidades hídricas a aportar en forma de riego. El lisímetro puede calcularlo de forma directa previa calibración y validación.

Existen diferentes tipos de lisímetro para según qué uso se le quiera dar. Podemos tener lisímetros que nos calculen el agua de drenaje del suelo y el balance hídrico y otros en los que podemos recuperar la solución del suelo para determinar la composición de la solución del suelo y ver posibles contaminantes, exceso o falta de nutrientes para el cultivo etc. Son los llamados lisímetros de succión, lisímetro volumétrico, lisímetros de relleno o lisímetros de pesada, entre otros.

El lisímetro de pesada está compuesto por un recipiente de grandes dimensiones relleno de suelo que reposa sobre una báscula. Todo el conjunto se halla instalado en una arqueta subterránea que permite el acceso a su interior para su mantenimiento y calibración. El suelo del lisímetro se halla a ras de tierra, por lo que a simple vista, resulta imperceptible distinguirlo del resto del cultivo que lo rodea, ya que está cubierta por dicho cultivo.

Tomando como referencia el funcionamiento de los lisímetros subterráneos, se ha diseñado un lisímetro exterior adaptado para una maceta. El motivo que ha llevado a dicho desarrollo es realizar un estudio acerca de las variaciones de peso que

puede experimentar un cultivo en su fase de crecimiento con distintas técnicas de cultivo.

El lisímetro exterior diseñado se utiliza para soportar la planta erguida y a la vez para determinar su peso. Dicho soporte albergará una(s) célula(s) de carga para medir las diferencias de peso experimentadas por la planta y realizar un profundo estudio acerca del desarrollo experimentado por la planta con los datos obtenidos.

Debido al tipo de clima que tenemos en la zona de Levante, sobre todo en la región de Murcia que se caracteriza por ser seco y árido, hace complicado el desarrollo de una agricultura eficiente, en términos de rentabilidad hídrica. La falta de lluvias hace que el riego de los cultivos sea prácticamente el único aporte de agua a las plantaciones.

Por ello, se hace imprescindible disponer de un sistema de riego que optimice cada gota de agua utilizada. Para conseguirlo debemos de conocer las necesidades de nuestro cultivo de la forma más exacta posible. Estudiando las necesidades de riego de nuestra plantación podremos establecer el momento del riego y la cantidad de agua necesaria.

La metodología aplicada para conocer el consumo de agua del cultivo, se basa en el balance hídrico de la maceta por lo que es necesario el conocimiento del término de “evapotranspiración” (ET).

La evapotranspiración (ET) es el proceso mediante el cual el agua en su estado líquido se evapora desde la superficie de la planta a la atmosfera, siendo una de las principales magnitudes hidrológicas.

La cuantificación de la ET es necesaria para el diseño y funcionamiento de los sistemas de riego, para llevar a cabo balances hídricos y para realizar análisis hidrológicos. Existen numerosos sistemas para determinar la ET, aunque la medida directa es generalmente difícil y costosa, ya que los procesos de evaporación y transpiración suceden de forma simultánea, y no existe un método sencillo para diferenciarlos.

La medida de la ET más habitual y efectiva se obtiene utilizando métodos basados en el balance de agua, mediante la utilización de lisímetros.

1.2. Evolución histórica

1.2.1. Concepto e historia de la lisimetría.

El termino lisímetro tiene su origen en los vocablos griegos lysis y metros que significan disolver y medir, respectivamente. Por ello, en general este término se puede aplicar a cualquier dispositivo que se utilice para estudiar la velocidad, cantidad y composición del agua que percola a través de un medio poroso. Dicho de otro modo, los lisímetros son instrumentos que contienen suelo y que reciben agua a través de la lluvia y el riego, estando provistos de dispositivos para recibir y medir la percolación.

Han sido numerosas las definiciones que a lo largo de los años se han hecho de estos instrumentos. Definición el lisímetro como “un bloque de suelo, con vegetación o sin ella encerrado en un recipiente adecuado y expuesto a las condiciones naturales del campo, que permite la determinación de uno de los términos de la ciencia del ciclo hidrológico cuando los otros términos son conocidos”.

La FAO es la agencia de las Naciones Unidas que lidera el esfuerzo internacional para poner fin al hambre define los lisímetros como “recipientes grandes llenos de suelo” o (encerrados en una masa de suelo), ubicados en el campo para representar sus condiciones naturales, de superficie desnuda o con cubierta vegetal (cultivos o césped), utilizados para determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento o con cubierta vegetal de referencia.

La historia de la Lisimetría se inició, como comente anteriormente en el apartado de “Introducción a la Lisimetría”, en el siglo XVII. Los lisímetros se utilizaron en un principio para la realización de diversos estudios sobre la. Existen diversas revisiones de los usos, diseños y manejos a lo largo de la historia

Diversos estudios se han empleado a estos instrumentos. Desde, lixiviación de sales y relaciones de Agua- Suelo- Planta. Hasta la fertilización de los cultivos.

Al comienzo del siglo pasado se empezó a utilizarlos para estudios relacionados con la ET y el agua para el riego. Hay lisímetros instalados por todo el mundo y de tipos muy diversos. Gracias a la electrónica, la ingeniería, la ciencia del riego, la fitotecnia y la micrometeorología, en las cinco últimas décadas se ha producido un gran avance en el estudio y el uso de estos instrumentos.

1.2.2. Introducción a los lisímetros de pesada.

300 años han pasado desde que se inició el estudio de la lisimetría por el francés De la Hire (1688) , matemático y meteorólogo, luego a la conclusión utilizando un recipiente de plomo con contenido de suelo franco arenoso, que se evaporaba más agua en los lisímetros cubiertos de césped que de suelo desnudo.

En un principio los lisímetros se utilizaron para investigar sobre la velocidad y la cantidad de agua que fluye a través de materiales porosos en nuestro caso será el tipo de arena que incorporemos en la maceta. Posteriormente se realizaron análisis químicos de esta solución. Es a partir de mediados del siglo XX, cuando los lisímetros perfeccionan y sufren una serie de cambios importantes; se construyen en números centros de investigación de todo el mundo, se utilizan principalmente para realizar estudios de evapotranspiración (ET) y para el calibrado de las formulas empíricas y semi-empíricas empleadas en el cálculo de la ET

1.2.3. Uso de los lisímetros en España.

Como bien se ha comentado en este estudio anteriormente los lisímetros de pesada se originaron para medir la evapotranspiración en el cultivo de estuca. A raíz de estos estudios originales se empezó a desarrollar en diferentes cultivos y en el

mismo cultivo en diferentes países, todos para valorar las necesidades de los cultivos a cada país y climatología de estos.

En España estos estudios o trabajos se realizan por medio de diferentes universidades, especializándose en diversos cultivos, dependiendo de la zona climática y características de cada zona.

Mencionando algunos de los trabajos que se han realizado en nuestro país en los últimos años, tenemos entre otros; Medida de las necesidades hídricas (o evapotranspiración) del maíz dulce utilizando un lisímetro de pesada. Realizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete. Universidad de Castilla la Mancha y el Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP). Realizando una alternativa de diversificación agrícola en las zonas de regadío.

Otro estudio Estrategias de gestión del riego en viñedos de vinificación. Realizado por la Universidad Politécnica de Madrid calculando el punto óptimo del inicio de riego en vid. La Universidad Politécnica de Cartagena está realizando diversos estudios en almendros, naranjos y albaricoqueros para implantar sistemas de riego automatizados, mediante lisímetros de pesada y Dendrómetros. Son sistemas que de forma autónoma suministran a la planta el agua necesaria, con criterios de mejora de la calidad del fruto. Estos estudios los realizan conjuntamente el grupo Agua-Suelo-Planta con la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

Diseño y construcción de un lisímetro de pesada en una plantación de almendros. Estudio realizado por la Universidad Politécnica de Córdoba, la conserjería de agricultura y pesca de la junta de Andalucía. Con el objeto de un manejo eficiente para la agricultura de regadío. Estos son solo unos ejemplos del desarrollo de los estudios de investigación a nivel nacional en pro de la sostenibilidad del riego en la agricultura. Gracias a la investigación, el desarrollo y a la fiabilidad de los valores obtenidos a través de los lisímetros de pesada.

1.3. Principio de funcionamiento de un lisímetro

Un lisímetro para albergar una maceta de variedad específica cuyo soporte en la base aloja una célula de carga en cada extremo para medir el peso de la planta y que garantiza la estabilidad de la planta gracias a su forma triangular, y una cuarta célula de carga para el depósito de drenaje. Además, puede disponer de una espaldera vertical de con ángulo regulable con el fin de mantener la planta erguida, garantizar su crecimiento y que permite estudiar la influencia de los ángulos de la espaldera en la evapotranspiración del cultivo.

Los lisímetros de pesada, una vez que se corrigen las variaciones en el peso por precipitación, riego y drenaje (en función de las medidas pluviométricas, y la medida proporcionada por el balance de masas del propio lisímetro), proporcionan una forma directa y exacta de medir los cambios en el contenido de agua del suelo.

Normalmente hay en el fondo del lisímetro un sistema de drenaje del agua con una balanza, donde la cantidad drenada de la misma equivale exactamente a la cantidad de agua evapotranspirada, que es igual a la capacidad de campo.

En los lisímetros los cambios de peso representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del lisímetro. El peso total de un lisímetro en un determinado momento (M_t) se puede expresar como:

$$M_t = M_o + P_{cv} - ET - D + R + P$$

Dónde: M_o es el peso inicial del lisímetro; P_{cv} es la acumulación de biomasa de la cubierta vegetal; ET es la pérdida de agua del lisímetro por evapotranspiración; D es el agua de drenaje; R es la cantidad de agua de riego; y P es la precipitación recibida por el lisímetro.

Uno de los requisitos más importantes en un lisímetro es que la vegetación en su interior se encuentre en condiciones similares a las del entorno inmediato.

Los lisímetros son dispositivos utilizados para determinar la velocidad, cantidad y composición del agua drenada en un medio poroso. Se define como un instrumento o dispositivo que contiene suelo y recibe lluvia natural o riego, y que se encuentra provisto de un sistema para recibir y medir el agua drenada.

Por lo tanto, la principal función del lisímetro es determinar la evapotranspiración de un cultivo en crecimiento.

El agua de drenaje de un cultivo se considera un componente importante del ciclo hidrológico, que se traduce en un aporte de agua subterránea y en la descarga de agua hacia los cauces naturales. El lisímetro se encarga de la medida volumétrica de todas las aguas que entran y salen de un recipiente que contiene una masa aislada de suelo.

La ecuación del balance hídrico del suelo representa las entradas y salidas de agua de un lisímetro en un periodo de medida:

$$P + R \pm ES = ET + D \pm \Delta w$$

Dónde: P es la precipitación (mm); R es el riego (mm); ES es la escorrentía hacia dentro o hacia fuera del lisímetro (mm); ET es la evapotranspiración (mm); D es el agua de drenaje recogida en el fondo del lisímetro (mm); Δw es la variación del contenido de agua en la masa de suelo encerrada en el lisímetro en un determinado periodo (mm).

1.4. Objetivos

El objetivo principal del proyecto va a consistir en la validación de un modelo de lisímetro de pesada para cultivo específico en maceta y efectuar las medidas de variaciones de peso para llevar a cabo el balance hídrico. Este proyecto tiene precedentes con otros prototipos de pesada, cuya finalidad ha sido siempre la optimización de costes y montaje, al igual que la finalidad de este proyecto.

El diseño se caracteriza por su tamaño reducido el cual le permite ser instalado en una parcela sin la necesidad de realización de obras adicionales mayores como podría darse para lisímetros subterráneos de gran escala.

En este proyecto se va a detallar la alternativa de diseño para el lisímetro exterior para montar maceta, mediante el desarrollo de hardware/software de bajo coste utilizando un ArduPLC v2 (de la familia Arduino) para el control y adquisición de datos.

ArduPLC se utilizado para desarrollar el código de adquisición de datos programado en el entorno IDE de Arduino necesaria para el control del balance hídrico a tiempo real del lisímetro de pesada por diferencia de pesos, a partir de la información obtenida de las células de carga montadas en la base del lisímetro, dicha información la recogemos a través de los dispositivos Swift de Utilcell montados en el cuadro, uno para el recipiente de cultivo, en nuestro caso la maceta para el cultivo específico que determinemos y otro para la obtención de valores del depósito de drenaje.

El ArduPLC se usa como hardware para adquisición de datos y control del sistema de riego, controlado por 2 electroválvulas anteriormente mencionadas. Se va a utilizar comunicación Modbus entre el ArduPLC v2 y los 2 Swift de Utilcell, y en paralelo utilizaremos LabVIEW como interface usuario para conocer el estado de dicha comunicación.

2.- Descripción y características del lisímetro vertical de pesada propuesta Prototipo LP3.

2.1. Descripción general del funcionamiento

Cabe destacar antes de nada el desarrollo de otros proyectos relacionados con lisímetros y medida de evapotranspiración, que han servido de base para la realización del prototipo de lisímetro del presente proyecto, LP3.

En el año 2008 se solicitó un proyecto de investigación coordinado a la Fundación Seneca para desarrollar un sistema comercial que sirviera de ayuda a la programación del riego, titulado “Desarrollo y Evaluación de un Sistema Inalámbrico de Monitorización de Cultivos Hortícolas. Aplicación a la Programación del Riego”. El Sistema se constituyó con una estación agroclimática gestionada por un controlador tipo Compact RIO, que recogía y procesaba la información de los sensores climáticos y de la red inalámbrica de sensores de humedad y salinidad del suelo, ubicada en las distintas zonas texturales de la parcela.

Los algoritmos de programación del riego implementados sirvieron de guía al técnico de la finca para gestionar los recursos hídricos disponibles, adaptándolos a las necesidades reales de los cultivos. Su aplicación permitió mantener la misma producción y calidad, con un ahorro de agua y energía de hasta el 40%. A pesar de las grandes ventajas del sistema, se observaron algunos inconvenientes que limitaban su aplicabilidad comercial por los numerosos fallos de calibración, y de gestión de los sensores de humedad de suelo. Por otro lado se constató que el

acceso desde internet al SCADA de gestión del riego embebido en el controlador compacto a través de conexión 3G, requería un gran consumo de datos, por lo que si no se dispone de red WIFI en la finca, es recomendable albergar el SCADA en un Hosting externo o un servidor propio.

Por otro lado, el alumno Jesús González Gómez realizó en 2015 el Trabajo de Fin de Grado “Diseño, implementación, verificación y puesta en marcha de un cuadro eléctrico de adquisición datos y control para el funcionamiento de una estación de lisimetría”, basado en los lisímetros exteriores instalados en macetas. En ese momento se escogió el lisímetro exterior, puesto que su coste era mucho más reducido, ya que no hace falta ningún tipo de obra civil, lo que permite además su transporte a cualquier lugar y en cualquier momento.

Este lisímetro de pesada es uno de los primeros prototipos desarrollados, y por lo tanto es la primera generación de las evoluciones de los lisímetros actuales, y en este se basa el Proyecto Fin de Grado de Alberto González Rodríguez “Rediseñar utilizando Eplan un cuadro de adquisición de datos y control de instrumentación electrónica de pesaje”, julio 2017, versión de lisímetro LP2.

Bien cabe destacar una de las últimas versiones de prototipo de lisímetros tipo LISITN AC-E1 desarrollado en el Trabajo Fin de Master de nuestro compañero Antonio Fuentes Sampere, junto con el equipo del Departamento de Agromónica y del Mar y Telenatura.

En la versión de Lisímetro LP3 del presente proyecto, podemos decir que es una fusión del lisímetro LISITN AC-E1®, el trabajo fin de grado de una estación de lisimetría, y del Diseño Implementación y Evaluación de un lisímetro para plantas de maceta.

El diseño y posterior integración de equipos y puesta en marcha del prototipo del presente proyecto se va a llevar a cabo en el modelo de lisímetro para plantas de macetas mencionado anteriormente y se caracteriza por su configuración de tres células de carga, está formado por una plataforma con una base triangular equilátera, las células de carga están situadas en cada uno de sus vértices y una estructura rígida que servirá de soporte de las células.

La conexión entre las células y la plataforma estará articulada para eliminar la transmisión de momentos a las mismas evitando posibles perturbaciones en las medidas del peso.

Por encima de la plataforma triangular y unida rígidamente a ella, se coloca una estructura porticada formada por perfiles de aluminio, para dar soporte a una espaldera de 1200x1000 milímetros, de forma que esta se pueda colocar libremente desde una posición vertical hasta tener una inclinación de 45 grados.

Para recoger el agua circula en el interior de la maceta disponemos de un recipiente de forma ovoide que envuelve la parte inferior de la misma y dispone en su parte más baja de un conducto que atraviesa la plataforma y que termina en un recipiente el cual está suspendido de otra célula de carga. El agua que llega al

recipiente de drenaje, el cual tiene forma esférica, puede ser pesado por dicha célula. El recipiente dispone de dos electroválvulas, una a la entrada del mismo, que está normalmente abierta y otra, a la salida, normalmente cerrada de forma que se puede controlar la cantidad exacta de agua que recorre el interior de la arena de la maceta.

A modo de ejemplo se muestran a continuación algunas imágenes en 3D del diseño y de un prototipo de lisímetro para plantas de maceta, no en este pero si en una versión similar que se encuentra en el laboratorio de Agromótica ubicado en el Edificio ELDI situado en la UPCT, se han llevado a cabo las pruebas del presente proyecto:



Figura 1: Vistas 3D Prototipo Lisímetro de pesada.



Figura 2: Lisímetro de Pesada Vertical

3. Dimensionado del sistema de pesaje

3.1. Células de carga: descripción, funcionamiento, esquemas eléctricos. (Ref. Hoja de Verificación de Célula de Carga y manual Swift)

3.1.1. Descripción.

Una célula de carga es un transductor que convierte la fuerza mecánica en señales eléctricas.

Hay muchos tipos de células de carga que operan de forma diferente, pero la célula de carga más utilizada hoy en día es la basada en galgas extensiométricas. Como su nombre indica, estas células de carga utilizan una matriz de galgas para medir la deformación de un componente de una estructura y convertirla en una señal eléctrica.

Existen diferentes tipos de carga como puede ser de fuerza a tracción, compresión, flexión o cizalladura. También existen combinaciones de varias de ellas, en función del tipo de célula.

Vamos a hacer una pequeña descripción del tipo de células de carga que podemos encontrar en el mercado actualmente. Podemos dividir las células de carga en distintos grupos:

Células Monoplato:

También llamadas monocélula. El sistema interno de trabajo de las bandas

extensiométricas es a flexión. Son las que se utilizan en balanzas y pequeñas plataformas con platos de dimensiones inferiores a los 800 x 800 mm. Las capacidades oscilan entre los 4 kg y los 1000 kg. Se monta una sola célula por báscula o balanza, normalmente en el centro de la misma. Algunos ejemplos de este tipo de células de carga podría ser los modelos Célula de carga MNB, Célula de carga MNC, Célula de Carga MN6, Célula de Carga MN8, Célula de Carga MN10



Figura 3. Célula de carga monoplato MN10.

Células de cortadura simple:

Se acostumbra a montar en básculas de 2 o más células de carga. El funcionamiento interno es a cortadura. En este caso soportan capacidades más grandes, hasta los 5000 kg. Las células se conectan entre ellas mediante la caja suma, de la que sale un solo cable al indicador de peso. Estas células, con los correspondientes módulos de pesaje antivuelco también se montan en silos, tolvas, depósitos, etc.



Figura 4. CTA1 con módulo de pesaje antivuelco.

Algunos ejemplos de estos tipos de células de carga pueden ser los modelos Célula de carga CTA1, Célula de carga CT1 y CT2, Célula de carga de fuelle FLE1 y FLE2.



Figura 5. Célula de carga cortadura CT1A.

Célula de Carga de Doble Cortadura

Es el mismo caso que las anteriores, para básculas multicélula; con la diferencia de que pueden soportar cargas mayores. Internamente montan el doble de bandas extensiométricas, permitiendo hasta cargas de 50000 kg. Por ejemplo tenemos la Célula de carga DC1, y la Célula de Carga DC2 También se pueden montar con módulos antivuelco.



Figura 6. Célula de carga DC1 Y DC2.

Células de Tracción - Compresión:

Este tipo de células, también llamadas S, funcionan tanto a tracción como a compresión. Internamente acostumbran a funcionar a cortadura y se pueden encontrar en capacidades entre 30 kg y 10000 kg. Las aplicaciones típicas son desde su montaje en cilindros, ganchos, tirantes, etc. Como ejemplo tenemos: Célula de carga SX1, Célula de carga SX2 y SX3.



Figura 7. Célula de carga SX3.

Células de compresión de alta capacidad:

A partir de 10000 kg las células idóneas para trabajar en compresión son las de compresión de alta capacidad, que pueden alcanzar los 60000 kg. Este es el caso de la célula de carga C150 . Internamente no funciona con bandas extensiométricas de cortadura, sino con unas especiales de compresión. A este tipo de células de carga también se las llama de columna, por su forma interna.



Figura 8. Célula de carga C150 a compresión.

3.1.2. Funcionamiento

En primer lugar se muestra el circuito básico basado en un puente de Wheatstone y galgas extensiométricas, y posteriormente se completa el circuito para una célula

de carga real, que requiere de una circuitería adicional para obtener un sensor de alta precisión.

Circuito equivalente de una célula de carga:

Una célula de carga se basa en un circuito eléctrico llamado puente de Wheatstone.

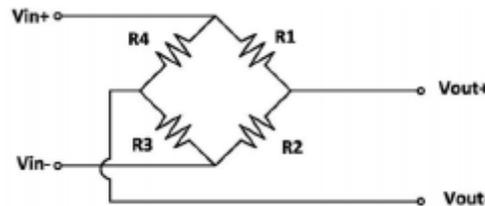


Figura 9: Circuito equivalente de una célula de carga

Siendo V_{in} la tensión de alimentación del puente o excitación de entrada (V) y V_{out} la señal de salida (mV).

Esta disposición permite medir pequeños cambios de resistencia ΔR que se producen en las galgas extensiométricas dispuestas en los brazos del puente: R1, R2, R3 y R4.

Las galgas extensiométricas son sensores de deformación que van pegados al cuerpo elástico de la célula. Su funcionamiento se basa en el efecto piezoresistivo, propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se someten a ciertos esfuerzos. Un esfuerzo que deforme a la galga producirá un cambio ΔR en el valor nominal de su resistencia R_g . Esta pequeña variación de la resistencia de cada galga se magnifica con el desequilibrio resistivo que se produce en el puente de Wheatstone, y así se obtiene una señal de salida proporcional a la fuerza aplicada.

Cuando la célula no tiene carga, las cuatro galgas están en reposo y tienen el mismo valor óhmico, el valor nominal de la galga R_g :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_g$$

Entonces la señal de salida V_{out} , diferencial entre V_{out+} y V_{out-} , es 0 voltios (cero de la célula).

Cuando cargamos la célula, las galgas extensiométricas cambian su valor de resistencia en una pequeña proporción ΔR :

$$R_1 = R_g - \Delta R \quad ; \quad R_2 = R_g + \Delta R \quad ; \quad R_3 = R_g - \Delta R \quad ; \quad R_4 = R_g + \Delta R$$

Entonces, obtendremos una señal de salida V_{out} , que es proporcional a la variación de la resistencia de las galgas extensiométricas. Esta es, a su vez, proporcional a la deformación del cuerpo elástico de la célula, y por ende a la fuerza aplicada. Con ello obtenemos un transductor de fuerza con una señal eléctrica de salida proporcional a la fuerza aplicada.

Nótese que este circuito resistivo también es proporcional a la tensión de alimentación de la entrada, por lo que la salida de una célula de carga se suele expresar en mV/V (milivoltios por voltio de alimentación).

3.1.3. Esquemas Eléctricos

Para fabricar una célula de carga real de alta precisión, se necesita toda una circuitería adicional a las galgas extensiométricas, destinada al ajuste fino de la señal de salida a diferentes cargas y a las compensaciones térmicas que hay que realizar individualmente durante su proceso de fabricación. El siguiente esquema eléctrico nos permite identificar diferentes etapas, que a continuación describiremos.

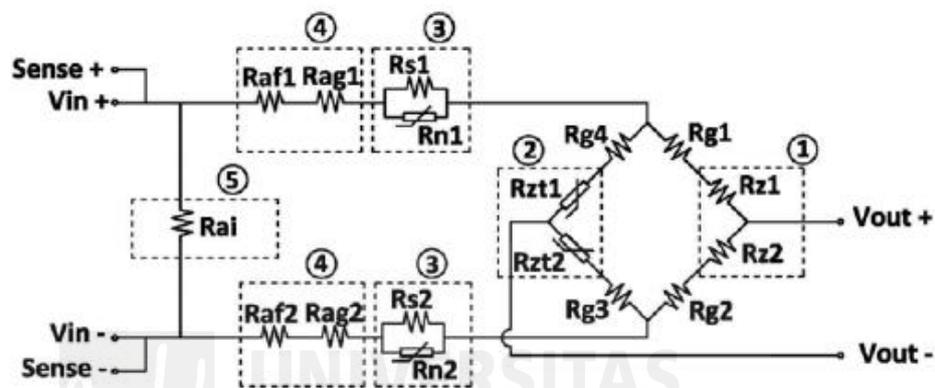


Figura 10: Circuito completo de una célula de carga de alta precisión

1) Rz1 y Rz2

Resistencias de Balance de cero. Permiten un ajuste fino de la señal de salida sin carga (cero de la célula) para obtener un valor muy cercano a los 0mV.

2) Rzt1 y Rzt2

Resistencias de compensación del cero con la temperatura. Permiten ajustes finos con pequeñas resistencias de compensación térmica para que la señal de cero se mantenga estable con la temperatura.

3) Rs1, Rn1 y Rs2, Rn2

Resistencias de compensación de la ganancia con la temperatura. Las resistencias Rn1 y Rn2, varían su valor nominal de resistencia con la temperatura, y son ajustadas con sus resistencias en paralelo Rs1 y Rs2 para compensar inversamente los cambios que produce la temperatura en la elasticidad mecánica del cuerpo de la célula y obtener una ganancia total estable con la temperatura.

4) Raf1, Rag1 y Raf2, Rag2

Resistencias de ajuste de ganancia. Se utilizan para realizar el ajuste grueso (Rag) y el ajuste fino (Raf) del valor de la sensibilidad nominal (Sn) de cada célula en mV/V.

5) Rai

Resistencia de ajuste de impedancia de entrada. Se utiliza para que la resistencia de entrada de la célula quede dentro de una banda de especificaciones.

Por último, cabe destacar que estas células de alta precisión presentan 2 terminales más, como se puede apreciar en el esquema. Se trata de las señales SENSE+ y SENSE-. Estas señales se conectan a la entrada, puenteadas respectivamente con Vin+ y Vin-, con el objetivo de medir la tensión de alimentación real del puente, de forma que se pueda actuar sobre posibles caídas de tensión provocadas por la longitud del cable, la temperatura, posibles inestabilidades de la fuente, etc.

Si la señal de alimentación está siendo proporcionada por el indicador de pesaje, como es nuestro caso, las señales SENSE se pueden introducir a dicho indicador para que detecte las variaciones con respecto a la señal “teórica” de alimentación y la equilibren cuando se produzca una diferencia. Por lo tanto, las células de carga pueden tener 4 o 6 hilos, en función de si incorporan los conductores para el feedback de la señal de alimentación.

3.2. Dimensionado del sistema de pesaje del recipiente de cultivo y depósito de drenaje (selección de las células de carga teniendo en cuenta el rango, resolución necesaria, etc.).

A continuación se procede a realizar el cálculo de la capacidad nominal de las células utilizadas, tanto en el recipiente de cultivo, como en el depósito de drenaje.

Calculo células del recipiente de cultivo

Vamos a tomar como referencia para como valor de peso para la maceta un valor de 4Kg

El peso del contenido dependerá de la densidad del suelo, la cual es variable en función del material que forma el suelo, dando lugar a una textura y estructura determinada. La densidad de la mayoría de suelos suele estar comprendida entre 1,3 y 2,5 Tn/m³.

Tipo de terreno	Porosidad n (%)	Indice huecos e	Humedad natural ? (%)	Densidad seca ?d (T/m3)	Densidad húmeda ?(T/m3)
Arena suelta	43	0,76	29	1,51	1,94
Arena densa	32	0,47	17	1,80	2,12
Zahorra	22	0,30	12	2,05	2,28
Arcilla muy blanda	60	1,67	62	1,08	1,34
Arcilla blanda	55	1,55	55	1,22	1,76
Arcilla semi-compacta	45	0,90	35	1,47	1,92
Arcilla compacta	43	0,87	32	1,45	1,89
Arcilla muy compacta	40	0,74	27	1,61	2,01
Arcilla dura	33	0,61	22	1,80	2,13
Loes yesífero	-	0,87	-	1,35	-
Turba	82	14	1.650	0,040	1,04
Hormigón	10-2	-	-	-	-
Margas	34	-	-	-	2,33

Figura 11: Características y densidad de diferentes tipos de terreno

Se va a considerar para el estudio un terreno formado por una mezcla de arcillas compactas, adecuada para todo tipo de cultivos. Si consideramos un terreno humedecido por el riego, que llena por completo el recipiente, en el peor de los casos podemos contar con una densidad de aproximadamente 1'90 Tn/m³, como se aprecia en la Figura 11.

Así, obtenemos que la masa de la tierra contenida en el recipiente se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Masa del Agua} = \text{Densidad} \times \text{Capacidad}$$

Se va a tomar como peso total del depósito y el contenido como máximo de unos 4 kg.

Para dimensionar la capacidad de las células que necesitamos, utilizamos la expresión:

$$L_n = \frac{k \times \text{Peso Bruto}}{n}$$

Dónde:

k = Factor de sobredimensionamiento (=1'25 - 2'2)

n = no de apoyos

Para cargas descentradas, como es el caso, se coge k = 2. Por otro lado, el número de apoyos es de 3 en este caso. Con esta fórmula calculamos la capacidad de las células y no daría un valor por debajo de lo que la célula sería capaz de soportar:

$$L_n = (2 * 4)/3 = 2.66Kg$$

El modelo escogido es el de capacidad nominal igual a 30 kg, puesto que además este tipo de células suelen presentar una carga límite de hasta el 200%, e incluso mayor. De este modo el modelo de 30 kg es capaz de soportar hasta 60 kg, en el caso de que todo el peso de la carga recayera en la esquina donde este montada, lo cual es prácticamente imposible.

Cálculo célula del depósito drenaje

Como referencia de modelos anteriores de lisímetros verticales, tomaremos como valor de peso 2Kg.

El agua que se deposita en este recipiente contiene una cantidad alta de partículas en suspensión. Se trata del agua residual del sistema, que a pesar del proceso de filtrado que sufre en un paso intermedio, sigue conteniendo un determinado grado de salinidad por el arrastre de partículas.

La densidad en este tipo de aguas puede variar entre 1'02 y 1'06 T/m³. Tomaremos la densidad máxima de 1.06 Kg/m³, por seguridad. Así, obtenemos que la masa del agua contenida en el recipiente se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Masa del Agua} = \text{Densidad} \times \text{Capacidad}$$

Se va a tomar como peso total del depósito y el contenido como máximo de unos 2 kg.

Para dimensionar la capacidad de las células del depósito de drenaje que necesitamos, utilizamos la expresión:

$$L_n = \frac{k \times \text{Peso Bruto}}{n}$$

Dónde:

k = Factor de sobredimensionamiento (=1'25 - 2'2).

n = no de apoyos

Calculamos la capacidad de la célula del depósito. Cogemos k = 1'5, utilizado en aplicaciones de tanques y silos. En este caso nos daría un valor por debajo de la capacidad de la célula.

$$L_n = (2 * 2)/1 = 4Kg$$

De este modo, escogemos una célula de carga de 10 kg de capacidad nominal, puesto que como hemos comentado su carga límite es del 200%, aguantando hasta 20 kg.

A este respecto, cuanto menor sea la capacidad de la célula, mayor será su resolución. Se desea que la resolución sea lo más grande posible, pues en este caso la precisión en la medida es muy importante, ya que se trata de detectar cantidades muy pequeñas de agua consumida por el sistema. Por lo tanto, una célula de carga de 10 kg con 10.000 divisiones nos daría una resolución de:

$$\text{Resolución} = \text{Capacidad Nominal} \times N^{\circ} \text{ de Divisiones} = 10\text{Kg}/10000 = 1\text{gr.}$$

En este caso, por el pequeño tamaño del recipiente, será suficiente con el montaje de una sola célula de carga de 10 kg..

3.3. Verificación de las células de carga. (incluir las fichas con los datos de cada célula de carga)

3.3.2. Calibración de las células de carga

El modelo de las células de carga escogido fue el 108TA del fabricante Vetek, del cual se instalaron 3 células de 30 kg para medir el peso de la planta y una célula de 10 kg para medir el peso del agua drenada recogida por el depósito.



Figura 12: Célula de carga Vetek 108TA

Una de las tareas fundamentales para el funcionamiento de los lisímetros es el ajuste de pesada o calibración. El primer paso consiste en comprobar que la relación entre la tensión en mV que nos proporciona la célula de carga, y la lectura del visor en kilogramos a través del display, es lineal. En segundo lugar, se debe comprobar que la tensión de salida del visor en mV, que es la que nos va a llegar a nuestro ArduPLC y la que se almacena en la memoria, mantiene una relación lineal con el peso que aparece en la pantalla del visor.

Se debe crear una recta de calibración lineal para cada célula, ya que los parámetros que determinan su funcionamiento varían de una a otra y, por tanto, cada recta de calibración es diferente en cualquier célula. Dichos parámetros son:

$$P = S * V + B_z$$

Dónde:

- "P" es el Peso resultante de la medición de la célula (Valor en Voltios).
- "S" es la Sensibilidad de Salida (Output Sensitivity). Nos determina los voltios de salida en función de los voltios de alimentación que conectemos a la célula (mV/V).

En ensayos realizados previamente, el valor resultante fue de 1,96 por lo que por cada voltio de entrada, obtendremos proporcionalmente 1,96 mV de salida.

- "V" Tensión de salida de la célula. Es el valor en voltios resultante de la variación resistiva del puente de Wheatstone que compone la célula de carga.

Con los parámetros anteriores, se procedió a realizar un ensayo de pesada, sometiendo al lisímetro a diferentes pesos. Los resultados fueron los siguientes:

Para llevar a cabo la primera tarea se realizó una comprobación de peso con pesas de 10Kg hasta un total de 30 Kg, colocando cada una de las pesa en los vértices de la báscula de pesada de la maceta, y con la opción de SPAN del Swift sacamos la pendiente de nuestra recta de calibración. A partir de este punto entra en juego el propósito de la instalación del sumador en el lisímetro, con el cual vamos a ir ajustando los valores de cada una de las células hasta disminuir el error de pesada en prácticamente 0, aproximadamente 5gr. Este ajuste se realiza ajustando cada uno de los potenciómetros correspondientes a cada una de las células de carga de nuestro equipo.

Finalmente se llevó a cabo un proceso de calibración de ajuste de la sensibilidad. Para realizar esta tara hemos colocado sobre el lisímetro un peso total de 75 Kg y como asumimos que la sensibilidad está correctamente calculada le metemos este valor en el SPAN del Swift otra vez posteriormente se retiró el peso y se realizó de nuevo la tara, indicando al visualizador que el peso era de 0 Kg.

Una vez realizada esta operación, de nuevo se colocó una pesa de 10Kg sobre la báscula, para comprobar que el error estaba dentro del margen aceptado, primeramente en el centro y posteriormente en cada uno de los extremos de la báscula. Este paso es necesario realizarlo hasta conseguir que el error sea adecuado. Nos dio un valor de diferencia de 5gramos para cada una de las células.



Figura 13: Instalación del lisímetro en campo

4. Instrumentación electrónica de pesaje

4.1. Sumadores electrónicos: descripción, funcionamiento, esquemas eléctricos.

Las cajas de sumas se utilizan para conectar un conjunto de varias células de carga a un indicador electrónico, obteniendo una señal analógica que es resultado de la suma de la carga de cada célula. Los potenciómetros de precisión internos permiten un ajuste fino de la lectura obtenida en cada punto de apoyo. Existen modelos para la conexión de 4,6 u 8 células.

Dentro de la oferta de sumadores electrónicos que ofrece UTILCELL se ha escogido el más económico de cuatro células (ref 89053), ya que este modelo cumple con los requisitos mínimos de protección y sensibilidad requeridos. El funcionamiento es sencillo, la sensibilidad de cada célula es ligeramente diferente, por lo que la caja de sumas dispone de un ajuste fino por potenciómetro, que compensa los desajustes de sensibilidad entre las diversas células. Cada célula de carga individual se conecta en su correspondiente conexión de 4 hilos + G y el

resultado de la suma se conecta a través de un cable de 6 hilos + G con el indicador de pesada.

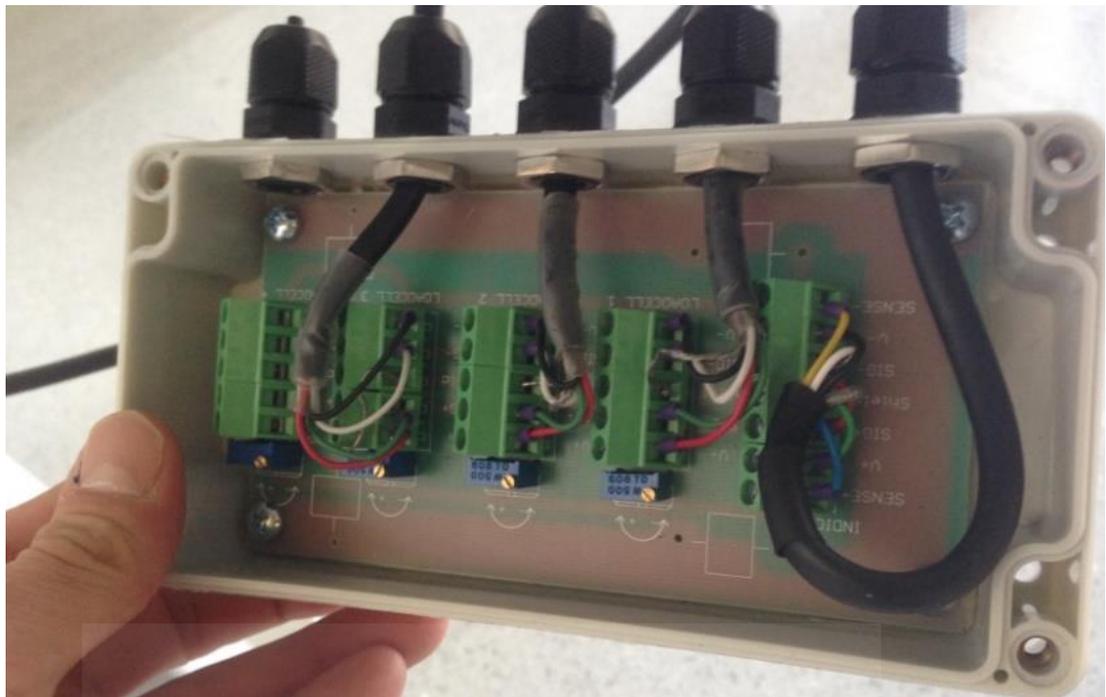


Figura 14. Sumador electrónico de 4 células.

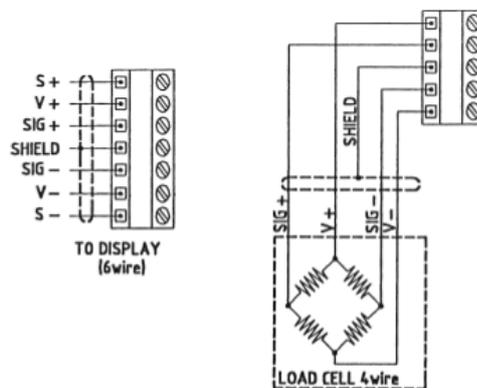
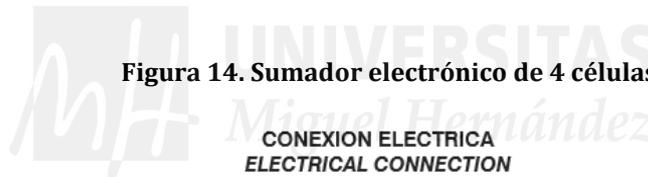


Figura 15. Conexión eléctrica del sumador.

4.1.1. Principio de funcionamiento.

Se emplean para sumar o unificar fuerzas, cuando se cuenta con diferentes puntos de medida dispersos. Esta configuración permite aumentar el peso o fuerza máxima a medir, ya que las cargas de cada sensor se van sumando. Esta es una aplicación típica en silos, tanques o plataformas, donde se cuenta con varias células de carga, dispuestas a lo largo de la plataforma o soporte.

El funcionamiento es sencillo. La sensibilidad de cada célula varía ligeramente, tanto por motivo mecánico, como por efecto de la tolerancia de la calibración de las células de carga, o por efecto de temperatura. La caja de sumas permite un ajuste fino por potenciómetro, que compensa los desajustes de sensibilidad entre células. El circuito consiste en un potenciómetro en serie por cada célula de carga, mientras que cada célula se conecta en paralelo.

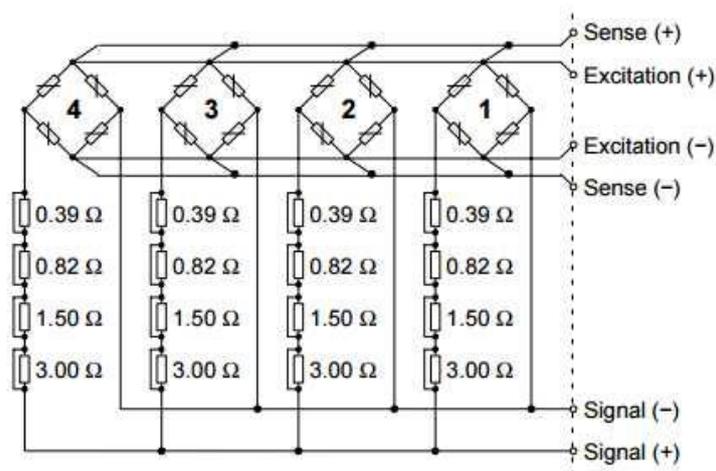


Figura 16: Circuito de una caja de sumas conectada a 4 células de carga de 6 hilos

La señal de salida de la caja puede ser analógica en mV/V, pero también existen versiones digitales que nos permiten conectar la caja a un bus, por ejemplo a RS-485.

4.1.2. Conexión de las células de carga a una caja de sumas

La conexión de las células de carga se efectúa en unos bornes marcados como LOAD CELL, numerados para cada célula. La conexión al indicador estará marcada como TO DISPLAY.

Terminal	Descripción	Color
V+	Tensión de Alimentación Positiva	Verde
V-	Tensión de Alimentación Negativa	Negro
SIG+	Señal de Salida peso positiva	Rojo
SIG-	Señal de Salida peso negativa	Blanco
SHIELD	Malla/pantalla	Malla
S+	Sense/Referencia Positiva	Azul
S-	Sense/Referencia Positiva	Amarillo

Tabla 1: Conexiones entre células y caja de sumas

Es muy recomendable utilizar cable de 6 conductores apantallado desde la caja de sumas hasta el indicador electrónico, siempre que el indicador disponga de esta conexión a 6 hilos.

Por otro lado, es necesario realizar las conexiones a tierra en un único punto de toma de tierra: el terminal de tierra de la caja suma (si dispone), el terminal de

tierra del indicador y la estructura metálica de la báscula. Para ello se recomienda lanzar un cable de toma de tierra desde la báscula al indicador para equilibrar potenciales. En caso de utilizar cable apantallado, la propia malla se puede utilizar para establecer las conexiones de tierra entre los dispositivos.

A continuación se muestra el esquema general de conexionado entre una caja de sumas, una célula de carga y un indicador:

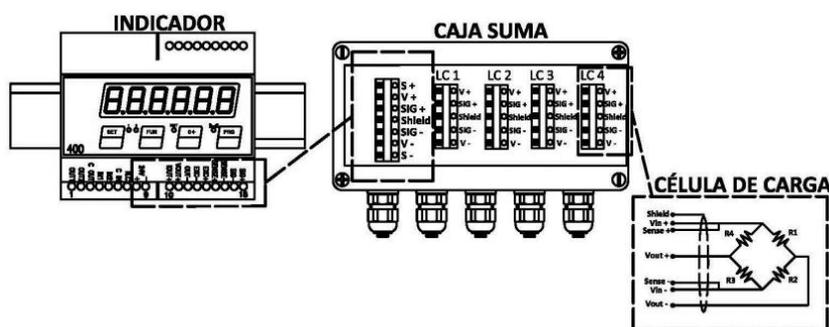


Figura 17: Conexión entre célula de carga, caja de sumas e indicador de pesaje

Conexión de una célula de carga de 4 hilos a la caja suma

Esta es la conexión más sencilla, ya que es directa, sin necesidad de realizar puentes entre los terminales de la célula, tal y como se indica en la Figura 22.

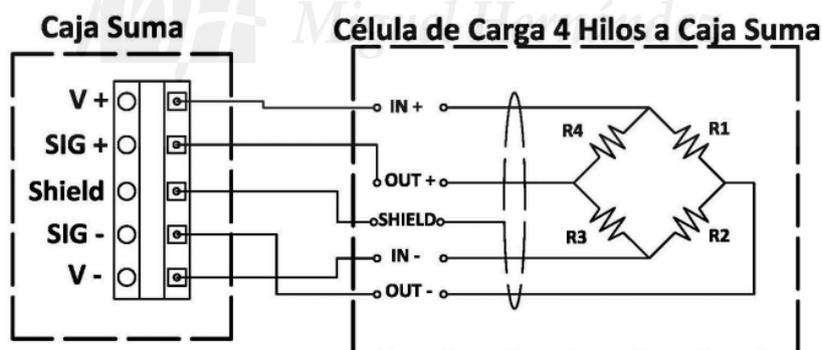


Figura 18: Esquema de conexión entre una célula de 4 hilos y la caja de sumas

El siguiente cuadro muestra la equivalencia entre los terminales y colores de cable de una célula de carga y los terminales de la caja suma.

Terminal Caja de Sumas	Terminal Celula de Carga 4 hilos	Color/ Celula de Carga
V+	IN+	Verde
V-	IN-	Negro
SIG+	OUT+	Rojo
SIG-	OUT-	Blanco
SHIELD	SHIELD	Malla

Tabla 2: Equivalencia en codificación de conexiones entre células de carga de 4 hilos y caja de sumas

Este tipo de conexión es el aplicado en el sistema de pesaje del recipiente de cultivo, ya que las células seleccionadas son a 4 hilos.

Conexión de una célula de carga de 6 hilos a la caja suma

El conexionado de una célula de carga de 6 hilos a una caja de sumas lo debemos realizar tal y como se indica en la Figura 17, teniendo en cuenta que, tenemos que hacer un puente entre la señal IN+ y SENSE+, y conectarlos al pin V+ de la caja de sumas. Realizar la misma operación entre IN- y SENSE-, conectándolos al pin V- de la caja de sumas. Sense, son dos hilos adicionales que se utilizan para mantener constante la alimentación de la célula, se utilizan para cables de gran longitud.

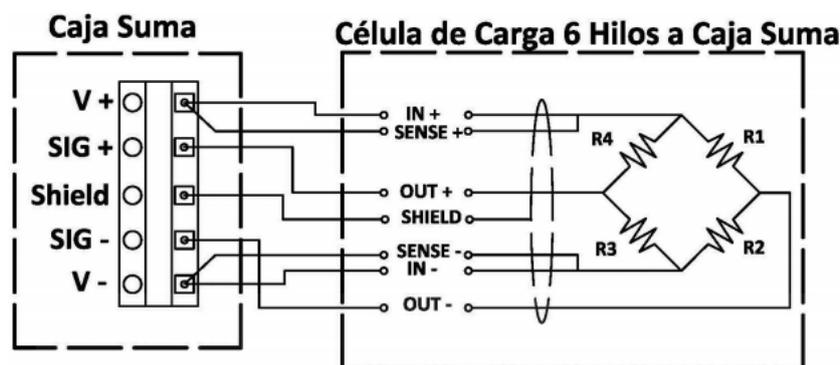


Figura 19: Esquema de conexión entre una célula de 6 hilos y la caja de sumas

El siguiente cuadro muestra la equivalencia entre los terminales y colores de cable de una célula de carga y los terminales de la caja de sumas.

Terminal Caja de Sumas	Terminal Celula de Carga 4 hilos	Color/ Celula de Carga
V+	IN+	Verde
V+	SENSE+	Azul
V-	IN-	Negro
V-	SENSE-	Amarillo
SIG+	OUT+	Rojo
SIG-	OUT-	Blanco
SHIELD	SHIELD	Malla

Tabla 3: Equivalencia en codificación de conexiones entre células de carga de 6 hilos y caja de sumas

4.1.3. Conexión de un indicador a la caja de sumas

Como se verá en el siguiente punto, se ha optado por escoger un visualizador SWIFT de la casa UTILCELL que integra todas las conexiones, funciones y conectividades remotas necesarias para la aplicación del lisímetro, entre algunas más.

En el siguiente esquema, correspondiente al marcado de la caratula del equipo, se muestran todas las señales de entrada y de salida del indicador SWIFT.

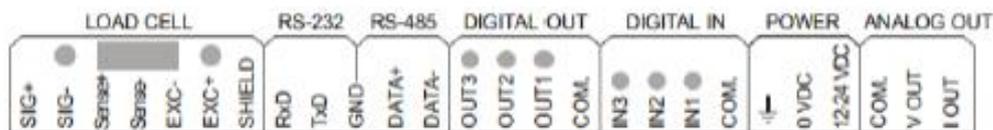


Figura 20: Marcado de la carátula del visualizador SWIFT con las señales de entrada y salida

Vemos que las señales están distribuidas en familias. En primer lugar tenemos las señales LOAD CELL correspondientes a las señales provenientes de la caja de sumas o de una célula de carga individual, es decir, son nuestras señales de entrada. A continuación se encuentran las señales para conexión RS-232 y RS-485, que nos permiten extraer los valores medidos para mostrarlos en otros sistemas o tratarlos en bases de datos (tal y como se ha comentado), pero también permiten dar órdenes al dispositivo, configurarlo o forzar algunas de las salidas digitales o analógicas. A continuación tenemos salidas digitales, concretamente salidas a relé, que se pueden utilizar como señales de alarma.

Las entradas digitales sirven para realizar cambios de consigna o establecer condiciones para el escalado interno de la señal a valores de ingeniería. A continuación están las señales para alimentación del dispositivo. Las salidas analógicas nos permiten obtener señales estándares de 4-20mA y 0-10V, en función de cómo realicemos la conexión (disponibles en función del modelo). En el siguiente capítulo se estudiarán de forma más precisa las funciones y la configuración del visualizador SWIFT.

La conexión de la caja de sumas al visualizador suele ser a 6 hilos, aprovechando la funcionalidad de los indicadores para compensar las caídas de potencial, aunque también es posible conectar una caja de sumas de 4 hilos. De hecho, al indicador también se pueden conectar células de carga a 4 o 6 hilos directamente, como es evidente. Dependiendo de esto, la conexión a realizar variará como se muestra a continuación.

Conexión de caja de sumas a indicador usando células a 4 hilos

Para la conexión con cable de 4 hilos se deben unir EXC+ con SENSE+ y EXC- con SENSE- en las bornas del indicador SWIFT, tal y como se muestra en la siguiente tabla, y conectarlos a las salidas de la caja de sumas +V y -V, respectivamente.

Señal de entrada del Swift	Señal de Salida de Caja de sumas	Codificación Colores
SIG+	SIG+	Rojo
SIG-	SIG-	Blanco
SENSE +	SENSE+	Azul
SENSE -	SENSE-	Amarillo
EXC-	V-	Negro
EXC+	V+	Verde
SHIELD	SHIELD	Malla

Tabla 4: Conexiones entre caja de sumas y visualizador con cable a 4 hilos

Conexión de caja de sumas a indicador usando células a 6 hilos

A continuación se muestran las conexiones necesarias utilizando células a 6 hilos. Para una simplificación en el cableado, la caja de sumas seleccionada debe tener una salida a 6 hilos + malla. Por lo tanto la conexión que llevaremos a cabo será la representada en este caso.

	Señal de entrada del Swift	Señal de Salida de Caja de sumas	Codificación Colores
SIG+	SIG+	SIG+	Rojo
SIG-	SIG-	SIG-	Blanco
Sense+	SENSE +	Verde (puente con EXC+)	-
Sense-	SENSE -	Negro (puente con EXC+)	-
EXC-	EXC-	V-	Negro
EXC+	EXC+	V+	Verde
SHIELD	SHIELD	SHIELD	-

Tabla 5: Conexiones entre caja de sumas y visualizador con cable a 6 hilos

4.1.4. Ajuste de la caja de sumas

El ajuste de la caja de sumas permite la calibración de las células de carga, compensando las posibles desviaciones en la medida, causadas por diferencias mecánicas, eléctricas o de temperatura en las 4 células de carga. La calibración se debe de llevar a cabo en conjunto con el indicador de pesaje, ya que este es el que proporciona la alimentación a la caja y las células, y además debemos realizar las lecturas de calibración en su pantalla.

A continuación se detallan los diferentes procedimientos realizados para la calibración de las células de carga, mediante el ajuste de la caja de sumas, tanto en el depósito de agua, como en el recipiente de cultivo.

Antes de nada, se debe realizar la verificación, mediante el test facilitado por el fabricante, a cada una de las 5 células de carga que componen el sistema, asegurando que estén en perfectas condiciones.

En segundo lugar, se realizan las conexiones entre las células, la caja y el indicador, según las indicaciones del punto anterior.

Los parámetros de la célula y del proceso de configuración se introducen en el software SWIFT PC, como se indicara en el punto correspondiente al indicador de pesaje.

4.2. Indicadores de pesada

Como se ha comentado el visualizador seleccionado para la aplicación del sistema electrónico de pesaje es el modelo SWIFT 84451 de la casa UTILCELL.

El SWIFT es un indicador de pesaje y transmisor de alta velocidad ideal para aplicaciones de pesaje estático y dinámico. Sus versiones para montaje en carril

DIN o panelado lo hacen especialmente indicado para aplicaciones de pesaje en procesos industriales y maquinaria para el sector industrial y agrícola. Las diversas posibilidades de transmisión de datos, sus entradas y salidas digitales, permiten una fácil conexión a PLC, PC y sistemas remotos, usando los principales estándares de comunicación industrial.

Concretamente el SWIFT 89451 seleccionado es el modelo para montaje en carril DIN y con opción de comunicación serie, gracias a sus puertos RS-485 y RS-232. De igual modo posee 3 entradas digitales y 3 salidas a relé. También hay disponibles versiones con salidas analógicas a tensión y corriente. Esta versión no dispone de salidas analógicas puesto que no son necesarias para nuestra aplicación, debido a que se va a utilizar el protocolo Modbus para interconectar ambos indicadores y el ArduPLC, mediante su puerto RS-485. Tampoco se utilizan en esta aplicación las entradas digitales, ya que las funciones de “tara” y “cero” se realizarán directamente con los pulsadores del SWIFT.



Figura 21. Indicador de pesada Swift

Las aplicaciones a las que se dirige este dispositivo son, evidentemente, del campo de la medida de peso, aunque dentro de este encontramos una gran cantidad de variantes que podemos llevar a cabo:

- Pesaje y medida de nivel en tanques y silos.
- Maquinaria de dosificación y llenado.
- Basculas Check-Weighers.
- Basculas Pesa-animales.
- Maquinaria de ensayos.
- Basculas clasificadoras hortofrutícolas.
- Basculas multi-cabezal.
- Transmisión del peso a PC/PLC.
- Conexión de varios indicadores en Bus.
- Control de sobrecargas en grúas.

CARACTERISTICAS TECNICAS (referencia de Manual SWIFT Utilcell)

Conexión célula de carga:

Rango de señal de entrada.....	±3.9 mV/V
Resolución.....	ADC 24 bits; 16.700.000 cuentas internas. Display -99 999...999 999
Frecuencia de medida.....	Interna: 2400 medidas por segundo. Transmisión: 600 medidas por segundo
Error de linealidad.....	≤0.01 % del rango de medida
Estabilidad térmica.....	Cero: 150 nV/°C máx. Ganancia: 3.5 ppm/°C máx.
Tensión de excitación.....	5.0 V DC
Resistencia mínima del transductor.....	43 Ω (8 células de 350 Ω, 16 células de 700 Ω)

Entradas y Salidas:

Comunicaciones Serie.....	RS-232 bidireccional
.....	Protocolos: propio, ModBus (RTU y ASCII)
.....	Velocidad de transmisión: 4800...115200 bauds seleccionable
Entradas salidas lógicas.....	3 entradas optoaisladas con LED de estado
.....	3 salidas a relé máx. 125 V AC - 30 V DC, 100 mA, con LED de estado
Salida analógica (Versión SWIFT RS+ANALOG).....	separación galvánica, DAC de 16 bits
.....	Salida tensión: 0-10 V
.....	Salida corriente: 0/4 - 20 mA (<500 W)
Comunicaciones Profibus (Versión PROFIBUS).....	Profibus DP-V0 (Esclavo)
Comunicaciones Profinet (Versión PROFINET).....	Profinet I/O Realtime (Class A)
Comunicaciones Ethernet/IP (Versión Ethernet/IP).....	Ethernet/IP

Alimentación, condiciones de funcionamiento y datos mecánicos:

Tensión de Alimentación.....	10 V a 28 V DC
Potencia consumida.....	4 W (6 W para versión Profibus, Profinet y Ethernet/IP)
Rango de temperatura.....	-20 °C a 50 °C de operación; -25 °C a 60 °C de almacenaje
Protección.....	IP 40
Interface operario.....	... Display: 6 dígitos LED 10 mm; Teclado: 5 teclas

Se caracteriza también por la posibilidad de configuración y ajuste desde el PC mediante el software SWIFT PC, haciendo uso de un ordenador conectado al indicador.

4.3. Sistema de medida del recipiente de cultivo (selección del sumador, indicador de pesada, esquema eléctrico, tabla de conexiones, calibración, parametrización del Swift manual y mediante software del fabricante, etc.)

Para este sistema, tal y como se ha comentado anteriormente, es necesaria la utilización de un sumador electrónico que junte las señales de las tres células de carga y poder así conectar la suma al correspondiente indicador de pesada.

El modelo escogido para el sumador ha sido el 89053, caja en plástico hermética para cuatro células en conexión de 4 hilos sin descargadores para sobretensiones. Al escoger esta opción de sumador no es necesario realizar la conversión de 4 a 6 hilos ya que es implementada por el mismo.

Para la visualización y calibrado de las células de carga se ha optado por el modelo SWIFT Rail RS 89451 ya que estará instalado en un cuadro eléctrico sobre carril din. Hay una variante de este modelo que es el Rail RS + ANALOG con las mismas prestaciones que el anterior con el añadido de contar con una salida analógica que en este caso no es necesaria.

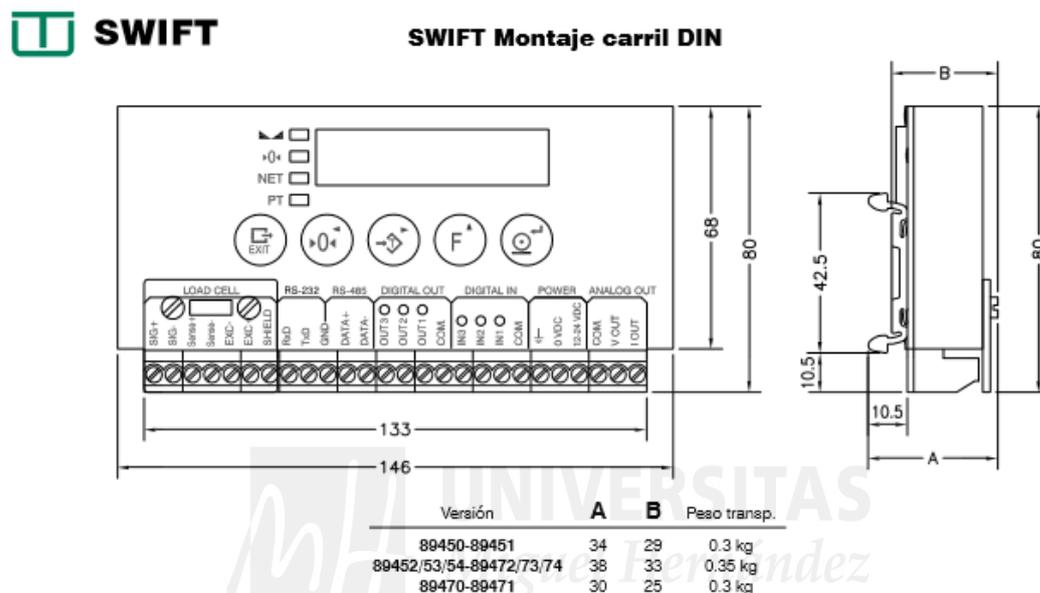


Figura 22. Dimensiones SWIFT

4.4. Sistema de medida del depósito de drenaje (indicador de pesada, esquema eléctrico, convertidor de cuatro a seis hilos, tabla de conexiones, calibración, parametrización del Swift manual y mediante el software del fabricante, etc.)

Este sistema a diferencia del anterior solo usa una célula de carga y no será necesario utilizar un sumador, pero se ha tenido que fabricar un convertidor de 4 a 6 hilos para la conexión con el indicador de pesada (figura 19). En este sistema se ha optado también por la utilización del modelo SWIFT Rail RS 89451, de modo que la conexión con el convertidor se realiza igual que en el sistema anterior. Se definió 10.000g de capacidad máxima, 10g de resolución, sin punto decimal, unidad en gramos y al igual que antes el resto de parámetros se dejan en sus valores predeterminados.

Al tratarse de solo una célula de carga la calibración resulta más sencilla, se establece el cero en el indicador de pesada estando la célula en reposo y luego se ajusta la recta de calibración mediante un peso conocido. Posteriormente se

prueban varios pesos conocidos y se confirma que la pendiente está bien ajustada, de lo contrario habría que repetir el proceso.



Figura 23. Conversor de 4 a 6 hilos.

5. Sistema de adquisición de datos.

Daremos una pequeña definición de lo que es un sistema de adquisición de datos: La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 24. Sistema de Adquisición de datos.

5.1. Equipos de adquisición de datos (ArduPLC).

La configuración del ArduPLC se caracteriza por ser un dispositivo microcontrolador que nos ofrece la posibilidad de conectar y controlar dispositivos

eléctricos o electrónicos directamente sin necesidad de componentes adicionales, básicamente es un Arduino con posibilidad real de control.

Gracias a su puerto RS485, se puede usar para aplicaciones distribuidas como domótica, conexión con PLCs industriales, control, etc.

Todas las entradas y salidas son accesibles a través de robustas bornas de tornillo. ArduPLC viene montado en una caja estándar para carril DIN lo cual nos facilita el montaje dentro de cuadros eléctricos para automatización, domótica, etc.



Figura 25. ArduPLC V2.00

5.1.1. Descripción.

Partiendo de la base de que nuestro ArduPLC se basa en la misma arquitectura hardware con Microcontrolador Atmel ATmega328P de Arduino, necesitamos que la placa conozca magnitudes del mundo real, como pueden ser de luz o temperatura, para que esta active una serie de actuadores, como pueden ser motores, electroválvulas o leds. Para ello las placas de ArduPLC cuentan con entradas analógicas con las que, a través, de sensores, medimos dichas magnitudes.

El microcontrolador de Atmel será el encargado de convertir las señales analógicas que queramos medir un convertidor Analógico/Digital ADC. Este conversor ADC puede tener varias entradas analógicas, que para este modelo ArduPLC cuenta con 4 de estas. Otros modelos como el ArduPLC Mega® puede tener hasta 6 entradas.

El tiempo de muestreo, es el tiempo que transcurre entre dos mediciones consecutivas, es fundamental para la adquisición de datos y se suele expresar en frecuencia. Siempre que midamos un sistema como puede ser el sonido, necesitamos que nuestra frecuencia de muestro sea superior a la frecuencia del

sistema, de no ser así, la representación que obtengamos con nuestro muestreo, del sistema, no será correcta.

Otro factor a tener en cuenta del ADC es su resolución, para ello hablamos de los bits de resolución que tiene, los bits no permiten hacer combinaciones, cuantos más tengamos mayor número de combinaciones podremos hacer, cada una de estas combinaciones muestra una medida del sistema analógico, la cantidad de medidas que tenemos serán 2 elevado al número de bits de resolución. Puesto que ArduPLC, tiene un ADC de 10 bits de resolución tendrá 1024 combinaciones.

Pero hay un segundo factor que interviene en la resolución, es el rango de medida, El rango de Voltaje de las placas Arduino por defecto es de 5v o 3.3v. Con esto sabemos que en voltios tenemos una resolución igual a;

$$\text{Resolución} = \frac{5\text{V}}{1024} = 4,88\text{mV}$$

Un ejemplo de resolución sería midiendo el voltaje en un potenciómetro, iremos girando las manecilla del potenciómetro y veremos que conversión da el ADC y a que corresponde en voltaje.

En nuestro caso para ArduPLC el rango de alimentación es más amplio, de 6.5V a 30V (Voltaje nominal de entrada es de 24 V).

5.1.2. Características principales.

- Microcontrolador Atmel ATmega328.
- 4 relés de salida con leds indicadores.
- 4 entradas digitales optoacopladas con leds indicadores.
- 4 entradas analógicas 0/10v, 0/5v o 0/20mA.
- Puerto de comunicaciones RS485 aislado.
- Puerto de comunicaciones USB.
- RTC con batería incluida.
- Conectores de expansión I2C en RJ12.
- Buzzer acústico.
- Dos potenciómetros de propósito general.
- Zócalo para tarjetas uSD.

- Zócalo para shields compatibles Arduino.
- Amplio rango de alimentación de 6.5 a 30 voltios (*) o USB (**).
- Regulador conmutado.
- Compatible con Arduino Duemilanove.
- Caja para carril DIN.

(*) Voltaje nominal de entrada 24VDC para el funcionamiento correcto de algunas características.

(**) Salida de 24V, para entradas digitales, no disponible en este modo de alimentación.

Como mencionábamos antes ArduPLC está basado en Arduino® y por consiguiente podremos utilizar cualquiera de los entornos de desarrollo Arduino para programar nuestro dispositivo.

Las equivalencias entre las E/S de ArduPLC y Arduino son las siguientes:

E/S ArduPLC	E/S Arduino
RELE 1	7
RELE 2	8
RELE 3	9
RELE 4	10
ENTRADA DIGITAL DIN1	3
ENTRADA DIGITAL DIN2	4
ENTRADA DIGITAL DIN3	5
ENTRADA DIGITAL DIN4	6
ENTRADA ANALÓGICA AIN1	A0
ENTRADA ANALÓGICA AIN2	A1
ENTRADA ANALÓGICA AIN3	A2
ENTRADA ANALÓGICA AIN4	A3
POTENCIOMETRO 1	A6
POTENCIOMETRO 2 A7	A7
BUZZER/LED L 13	13
INT0, DREADY, CS_SD 2	2
PUERTO USB Y HARD. 485 TX	0
PUERTO USB Y HARD. 485 RX 1	1
PUERTO SOFT. 485 TX	11
PUERTO SOFT. 485 RX	12

Tabla 6. Equivalencia entre las E/S de ArduPLC vs Arduino

A continuación veremos las distintas partes que componen la placa ArduPLC.

5.1.2.1. Alimentación:

ArduPLC incorpora un regulador conmutado de alta eficiencia para generar los 5V necesarios para el funcionamiento interno. Gracias a este regulador podemos alimentar la placa ArduPLC de forma externa desde 6.5VDC(*) hasta 30VDC sin riesgo de sobrecalentamiento.

También podemos alimentar ArduPLC desde el propio puerto USB (**). Para seleccionar entre alimentación USB o EXTERNA coloque el Jumper en el modo deseado:

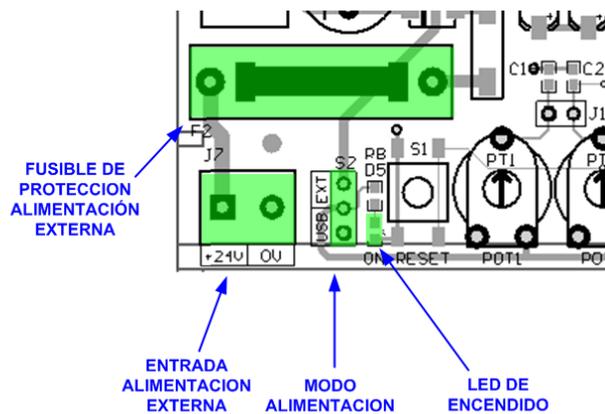


Figura 26: Detalle conexión, Alimentación en placa ArduPLC

5.1.2.2. Relés de salida:

Los relés de salida son del tipo normalmente abierto excepto el relé 4 que cuenta con salida normalmente abierto y normalmente cerrado. Todas las salidas cuentan con sus comunes totalmente independientes.

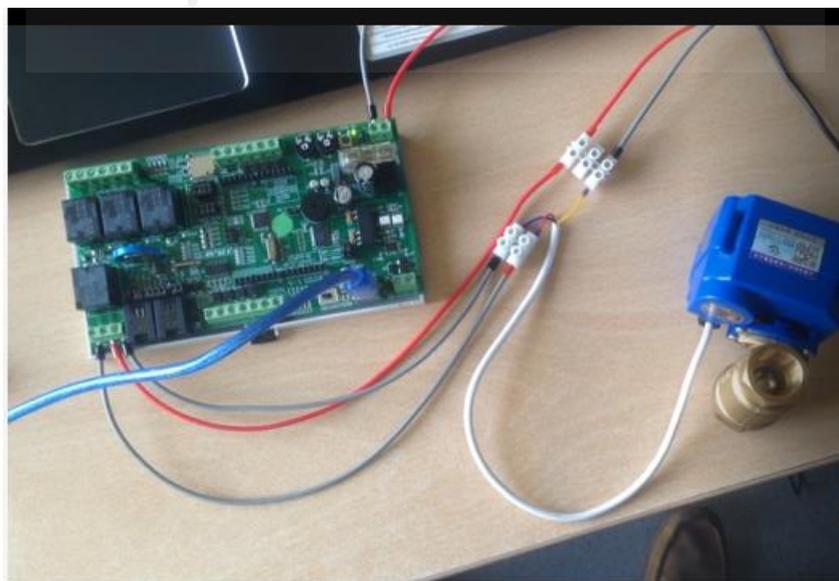


Figura 27: Pruebas en Laboratorio con Relés.

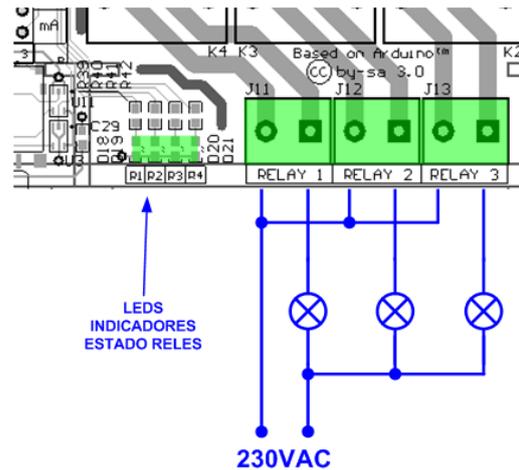


Figura 28: Detalle conexión, Relés de Salida en placa ArduPLC

5.1.2.3. Entradas digitales

Las entradas digitales se activan con niveles lógicos de 24VDC referenciado al pin N/P. De esta forma podemos activar las entradas en la forma POSITIVO COMÚN o NEGATIVO COMÚN.

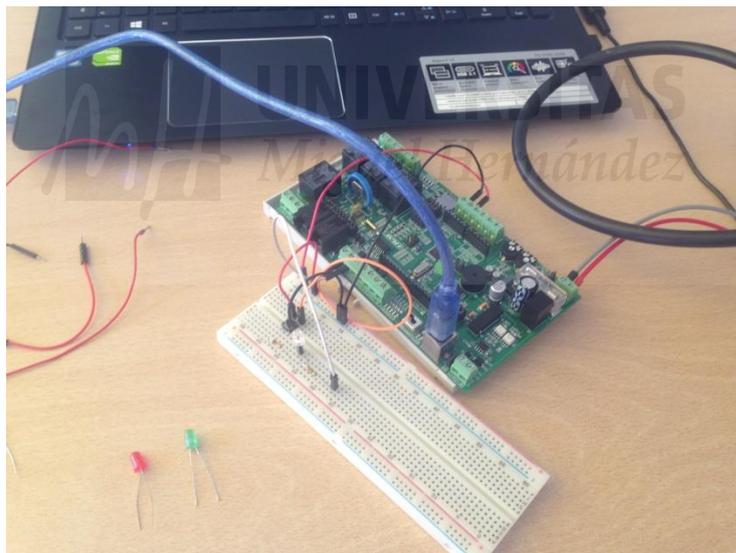


Figura 29: Pruebas en Laboratorio con salidas digitales.

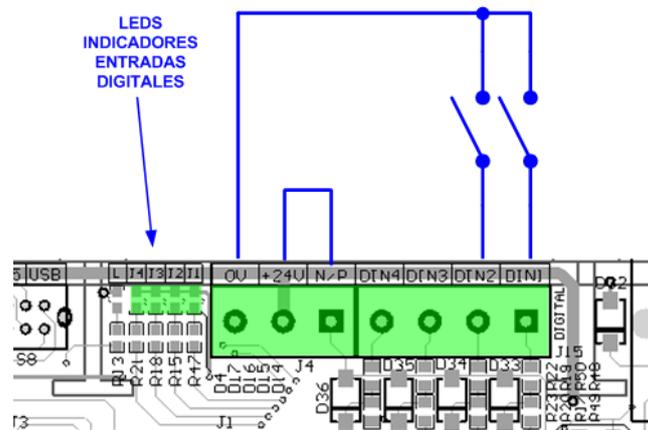


Figura 30: Detalle conexión, Positivo común en placa ArduPLC

5.1.2.4. Entradas analógicas.

ArduPLC dispone de 4 entradas analógicas que podemos configurar, independientemente, para uno de los siguientes rangos:

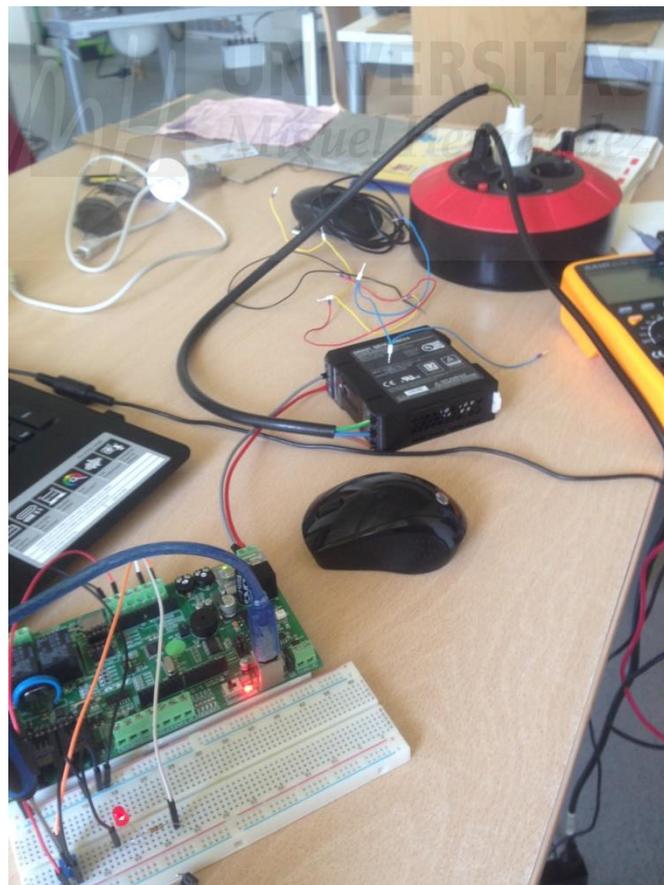


Figura 31: Pruebas en Laboratorio con salidas Analógicas.

- 0-10V: puentee los jumpers según se muestra:

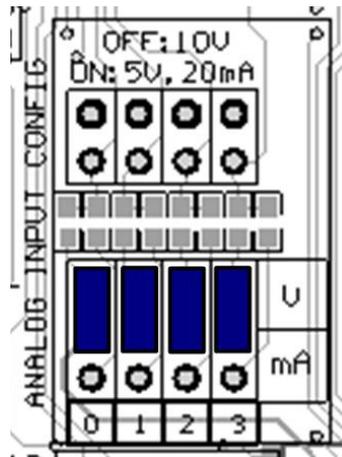


Figura 32: Detalle conexión, 0-10V.

- 0-5V: puentee los jumpers según se muestra:

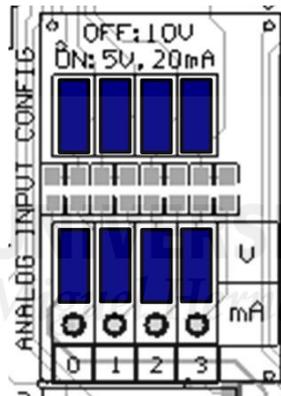


Figura 33: Detalle conexión, 0-5V.

- 0-20mA: puentee los jumpers según se muestra:

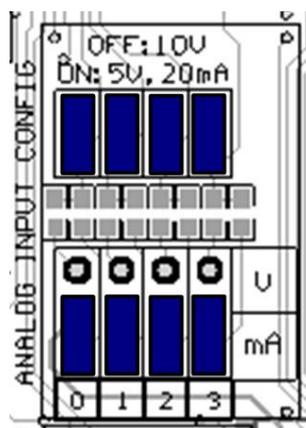


Figura 34: Detalle conexión, 0-20mV.

Un ejemplo de uso es el siguiente, donde se muestra la conexión con un potenciómetro:

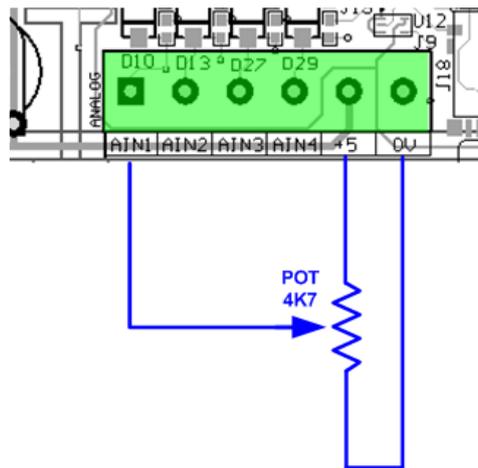


Figura 35: Detalle conexión, Potenciómetro.

Ejemplo de conexión para un transductor de presión 4/20mA a dos hilos:

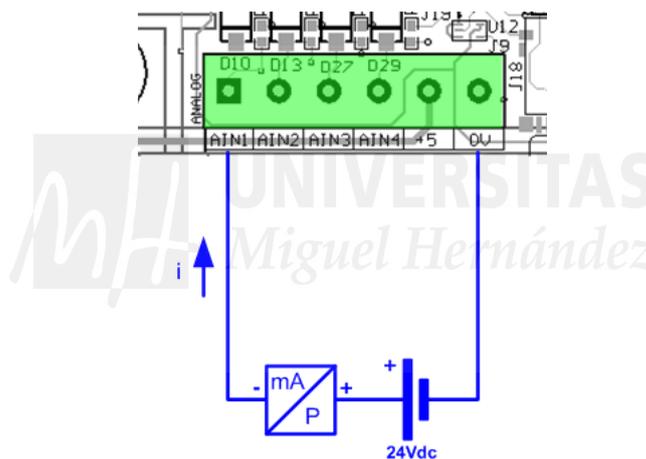


Figura 36: Detalle conexión, para transductor de presión 4/20mA.

Para el rango 0/20mA, los valores digitales de conversión son los siguientes:

Corriente	Valor digital de Conversión
0mA	0
4mA	204
20mA	1023

Figura 37: Valores digitales de conversión.

El ArduPLC dispone de dos potenciómetros para propósitos generales, como ajuste de tiempos, rangos, etc.:

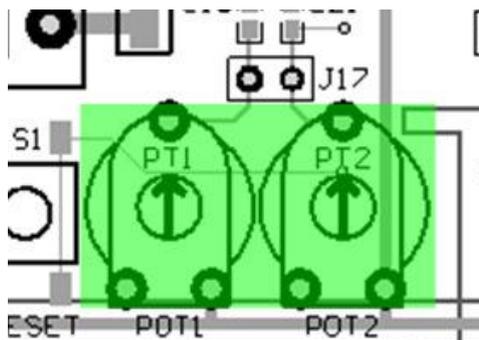


Figura 38: potenciómetros propósitos generales.

5.1.2.5. Puerto USB.

ArduPLC incorpora un puerto USB gestionado por el driver FT232RL (interface entre USB y UART) de la firma FTDI.

Ya que el interface UART hardware del microcontrolador está compartido con el puerto USB y RS485, tendremos que seleccionar previamente cuál de los dos puertos estará conectado a la UART del microcontrolador.

Para seleccionar el puerto USB hay que deslizar el interruptor S8 a la derecha:

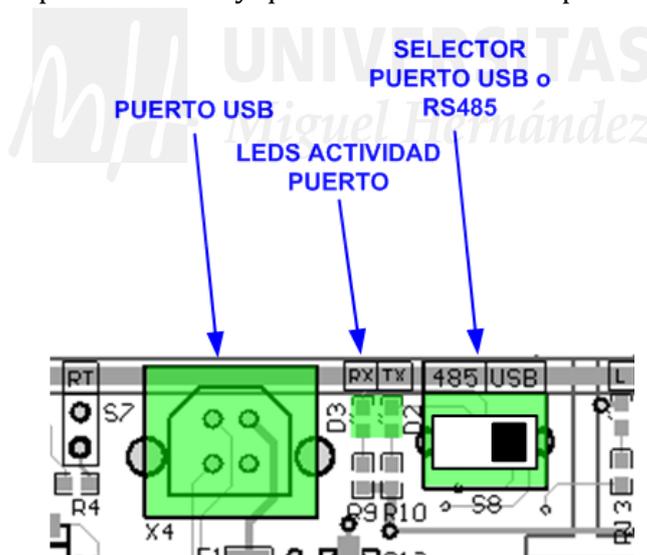


Figura 39: Detalle conexión, Positivo común en placa ArduPLC

Los diodos RX y TX nos muestran la actividad en el puerto seleccionado.

5.1.2.6. Puerto RS485.

A continuación mostramos la configuración en la placa del puerto con el que hemos estado trabajando, con el cual podemos implementar buses de comunicaciones basados en dos hilos como por ejemplo para Modbus.

Para usar el puerto hay que asegurarse que está correctamente seleccionado en el modo RS485. Para ello se desliza el interruptor S8 hacia la izquierda:

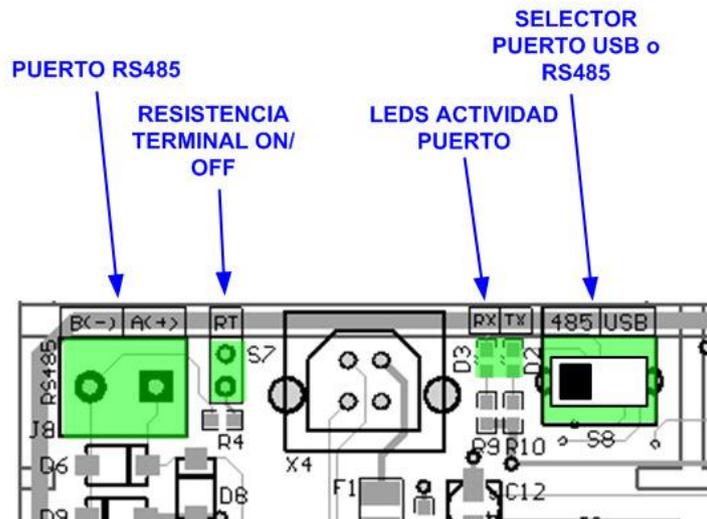


Figura 40: Detalle conexión, RS485 en placa ArduPLC.

En caso que fuera necesario la placa tiene la opción de poder activar o desactivar la resistencia terminal del bus con el jumper S7. Esta resistencia tiene un valor típico de 120 Ohm.

Las actividades de las comunicaciones del puerto se pueden ver con los parpadeos con los leds TX y RX.

Otra característica del puerto RS485 es que podemos asociarlo a un puerto UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, que controla los puertos y dispositivos serie) software del microcontrolador, colocando los jumpers S25 y S4 en modo SOFT. 485:

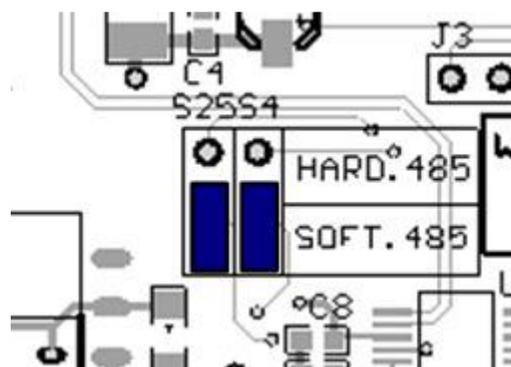


Figura 41: Detalle conexión, modo SOFT RS485 en placa ArduPLC.

5.1.2.7. Buzzer.

Activación del buzzer acústico, para ello se activa el Jumper S38:

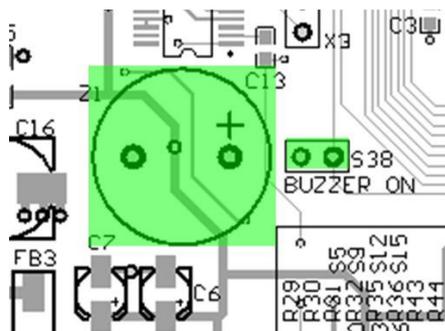


Figura 42: Detalle conexión, activación buzzer en placa ArduPLC.

5.1.2.8. Zócalo tarjeta uSD.

ArduPLC incorpora un zócalo para tarjetas compatibles uSD. Para usar tarjetas uSD se puede usar la librería estándar "SD" de Arduino. La tarjeta se introduce de la hasta que haga tope:

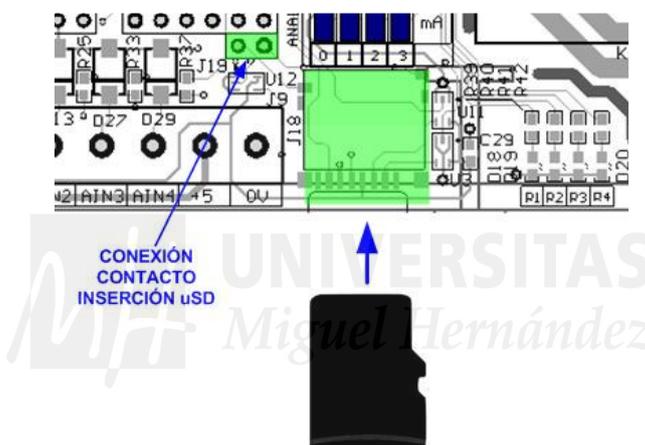


Figura 43: Detalle conexión, zocalo tarjeta uSD en placa ArduPLC

El contacto que indica cuando la tarjeta está insertada está disponible en el conector J19. En caso de que se necesitara usar hay que soldar una conexión y llevarla hacia un pin libre del microcontrolador.

5.1.2.9. RTC.

ArduPLC dispone de un reloj en tiempo real o RTC basado en el chip PCF8563T. Este chip es controlado mediante el bus I2C. Se puede usar la librería estándar "Rtc_Pcf8563" de Arduino para controlar este reloj.

Dispone de una pila integrada en la placa mantiene la hora y fecha en el reloj en ausencia de alimentación. La vida de esta pila está estimada en 10 años.

Se puede desactivar el bus I2C conectado al RTC quitando los jumpers S36 (SCL_RTC) y S37 (SDA_RTC). Por ejemplo, si interconecta dos ArduPLC a través del bus de expansión RJ12 deberá desactivar el bus I2C en uno de los dos ArduPLC.

El chip PCF8563 dispone de una señal de interrupción “INT” configurable para varios propósitos como por ejemplo señal de alarma. Se puede asignar esta señal de interrupción a un pin del microcontrolador activando el Jumper S3 (INT0) (*). Se deben activar la resistencia PULL UP para esta señal.

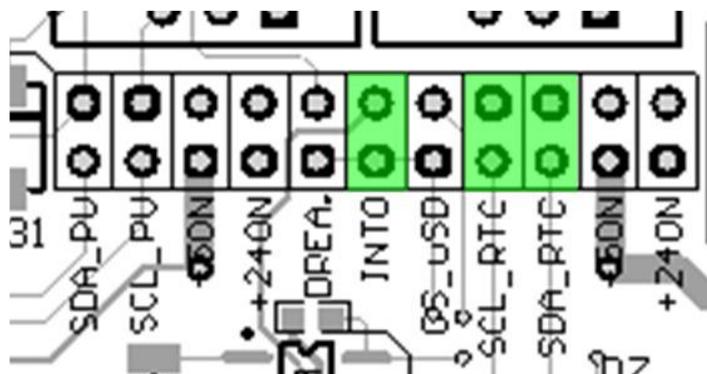


Figura 44: Detalle conexión, RTC en placa ArduPLC

Nota: Si se activa la señal “INT” del RTC no podrá usar la tarjeta uSD ya que comparten la misma señal.

5.1.2.10. Bus de expansión RJ12:

ArduPLC facilita la interconexión de otros dispositivos mediante el BUS de expansión RJ12 basado en el bus I2C.

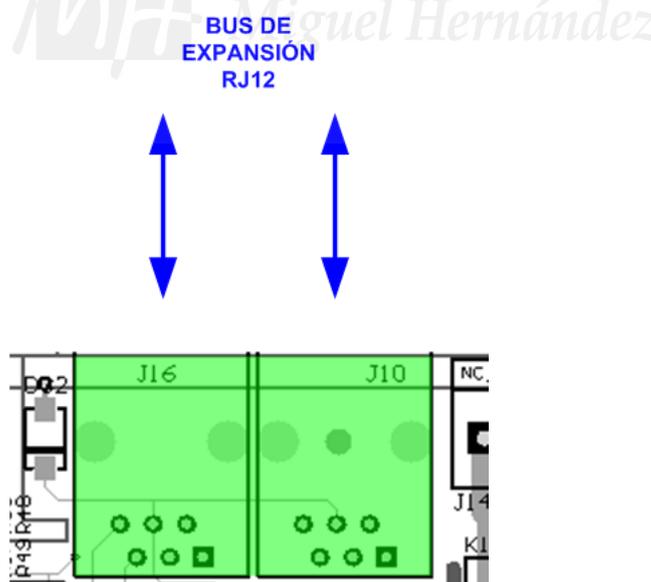


Figura 45: Detalle conexión, BUS de Expansión en placa ArduPLC

En este conector nos encontramos con las siguientes señales:

- Señales bus I2C.
- Alimentación 5VDC y 24VDC (o tensión de alimentación externa).
- Señal de interrupción DREADY.

Dependiendo del caso, puede que le interese desactivar alguna de estas líneas como por ejemplo las líneas de alimentación para que no tengan conflictos con otros dispositivos que también incorporen alimentación. Por ejemplo, si interconecta dos ArduPLCs, uno de ellos deberá tener la alimentación del bus desconectada.

Se detallan los jumpers para tal tarea nombrándolos de izquierda a derecha:

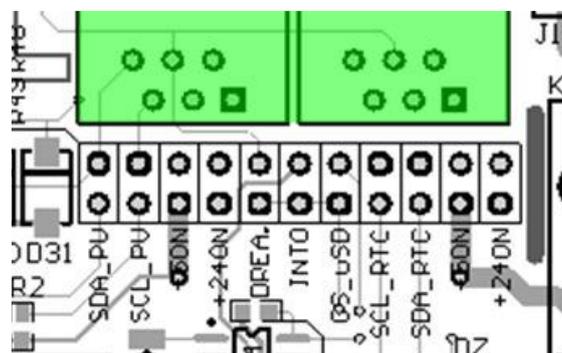


Figura 46: Detalle jumpers en placa ArduPLC

- SDA_PU: on/off resistencia pull-up línea SDA bus I2C
- SCL_PU: on/off resistencia pull-up línea SCL bus I2C
- +50N: on/off alimentación 5VDC bus conector izquierdo o J16.
- +240N: on/off alimentación 24VDC bus conector izquierdo o J16.
- DREA.: on/off señal de interrupción del bus hacia el microcontrolador.
- INTO: on/off señal interrupción RTC hacia el microcontrolador.
- SD_uSD: on/off señal “chip select” de tarjeta uSD hacia el microcontrolador.
- SCL_RTC: on/off bus I2C señal SCL del RTC.
- SDA_RTC: on/off bus I2C señal SDA del RTC.
- +50N: on/off alimentación 5VDC bus conector derecho o J10.
- +240N: on/off alimentación 24VDC bus conector derecho o J10.

5.1.1.1. Zócalo shield compatibles Arduino

Podemos “pinchar” un Shield compatible con Arduino en la placa ArduPLC siempre y cuando las medidas del Shield nos lo permitan, o bien prepararlas y ajustarlas con pines auxiliares.

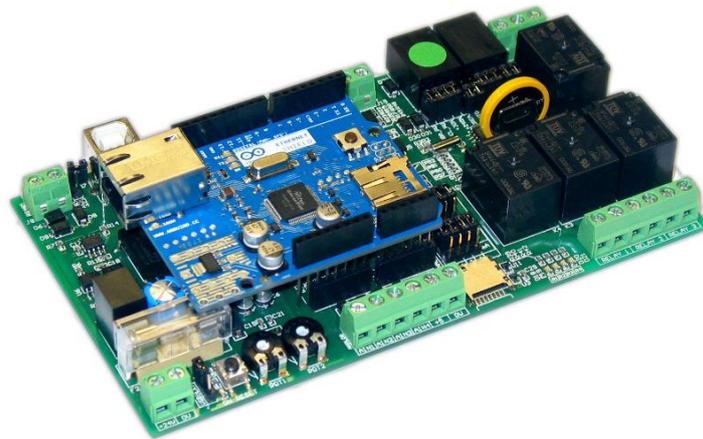


Figura 47: Detalle Shield Ethernet en placa ArduPLC

Debido a que ArduPLC utiliza pines específicos del microcontrolador para uso de sus propios recursos como relés, entradas digitales, entradas analógicas, etc., estos pueden entrar en conflicto con los pines asignados al Shield. Para ello, la placa ArduPLC, nos permite fácilmente desactivar la señal en conflicto con el Shield a cambio de anular el recurso de ArduPLC en conflicto.

Por ejemplo, si adquirimos el Shield Ethernet Arduino la señal CS utilizada en este Shield está ubicada en el pin 10. ArduPLC utiliza el pin 10 para el relé 4, con lo cual debemos anular este relé 4 si queremos usar correctamente el Shield.

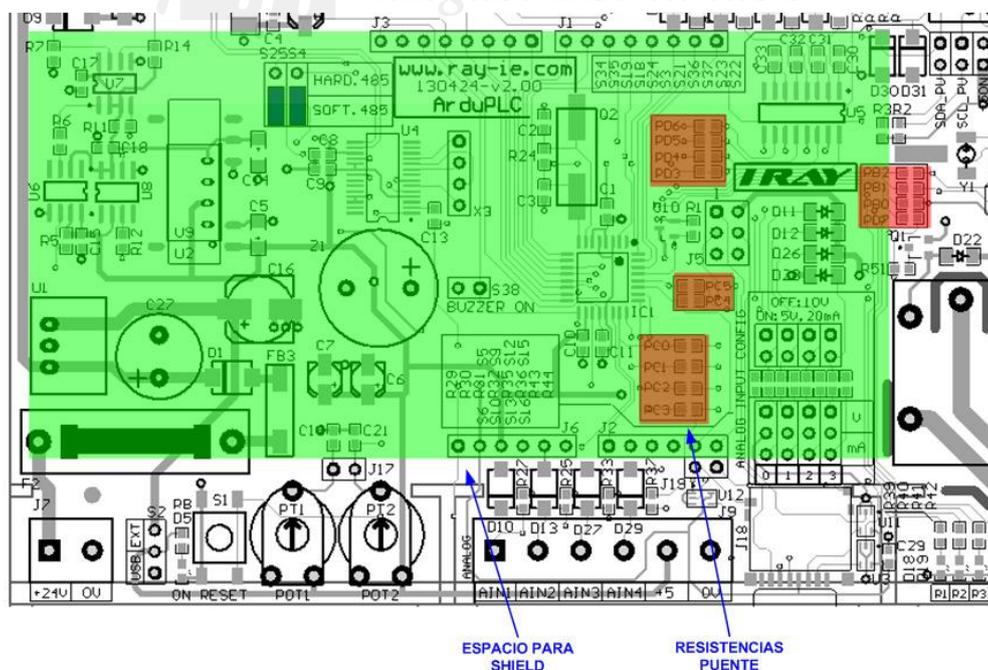


Figura 48: Detalle resistencias puente y espacio para shield en placa ArduPLC

El pin 10 está asignado al puerto PB2 del microcontrolador por lo que únicamente tenemos que buscar la resistencia-puente PB2 y desoldarla:

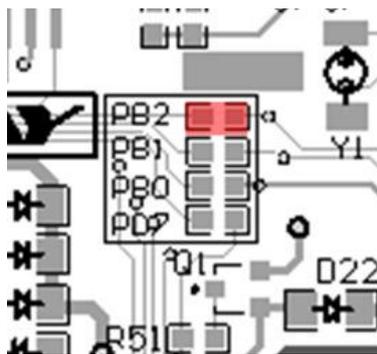


Figura 49: Detalle resistencias puente en placa ArduPLC

Nota: En el manual menciona que las patillas TX y RX son las equivalentes en Arduino a la 11 y la 12, pero realmente es a la inversa. Confirmado via mail con la casa RAY.

5.1.3. Especificaciones Técnicas

- Rango de alimentación: 6.5 a 30 VDC
- Protección de alimentación: inversión de polaridad
- Protecciones de sobretensión en: entradas analógicas, digitales y puerto RS485
- Consumo a 24VDC en reposo: 10mA (0.24W)
- Consumo a 24VDC máximo: 80mA (1.92W)
- Rango entradas analógicas: 0 /5VDC, 0/10VDC o 0/20mA
- Rango entradas digitales: 24VDC
- Máxima corriente salidas relé: 10A
- Máxima tensión salidas relé: 250VAC o 30VDC
- Máxima potencia salidas relé: 2500VA, 300W
- Puerto RS485: Aislado 3000V, ¼ unidad de carga, protección ESD +/- 15Kv, control automático de dirección de datos
- Temperatura de funcionamiento: -40 a +85 °C
- Ancho: 159 mm
- Alto: 90 mm
- Fondo: 58 mm
- Peso: 250 g.

5.1.4. Esquemáticos.

Sin entrar en detalle de los esquemáticos que componen la placa ArduPLC, detallo la referencia para poder verlos en caso de consulta. (<http://tienda.ray-ie.com/home/95-ArduPLC-v2.html>)

5.1.5. Selección

Se han hecho pruebas con diferentes modelos de ArduPLCs de Ray Ingeniería Electrónica. Y a modo de ejemplo se detallan los modelos de algunos de ellos, como

son el ArduPLC Mega, ArduPLCm, ArduPLC nano, cada uno con sus pro y sus contra, según el uso que se le quiera dar.

Se ha optado finalmente por el ArduPLC en el que se ha desarrollado la totalidad del trabajo. Todos ellos son dispositivos para sistemas de control en entornos industriales, ya que nos permiten controlar dispositivos eléctricos y electrónicos directamente sin componentes adicionales, y todos ellos se pueden programar desde el entorno IDE de Arduino

Como hemos comentado anteriormente, los diferentes modelos de ArduPLC que podemos encontrar en el mercado, son Arduinos basados en PLC controller.

Como mencionábamos anteriormente podemos “pinchar” un Shield compatible con Arduino en la placa ArduPLC siempre y cuando las medidas del Shield nos lo permitan, los que nos da juego para realizar otras acciones, como por ejemplo;

- Shield GSM/GPRS.



Figura 50: Shield GSM/GPRS

- Shield RS485, que en nuestro caso ya lo lleva integrado en la placa.



Figura 51: Shield RS485

- Shield TFT 1,77 lector SD.



Figura 52: Shield TFT 1,77

- Shield Wifly, permite la conectividad Wifi a tu Arduino de forma sencilla.



Figura 53: Shield Wifly

- Shield for Arduino MRF24J40MA.



Figura 54: Shield for Arduino MRF24J40MA

ArduPLC se puede programar fácilmente de dos formas:

1. Mediante un programador externo a través del conector ICSP. Esta es la forma nativa de programar los microcontroladores AVR de Atmel.

El programador más utilizado para este fin es el AVR MKII:



Figura 55. Programador AVR MKII.

Para programar el microcontrolador con este programador tenemos que acceder a la placa ya sea quitando la tapa superior o inferior de la caja DIN.

2. Mediante el puerto USB disponible y el bootloader (gestor de arranque del dispositivo) cargado en el microcontrolador, para reescribir el programa que se ejecuta inmediatamente antes ejecutar el programa que se encuentra en la memoria flash.

ArduPLC viene de serie con el bootloader de Arduino Duemilanove cargado por lo que solo necesitamos un cable USB conectado a nuestro ordenador para descargar programas desde el IDE de Arduino. Antes de cargar un programa asegúrese que el interruptor S8 está en modo USB.

5.2. Conversor RS232-RS485

La comunicación entre ArduPLC y los Swift de pesada se ha hecho a través de dos hilos de conexión mas puesta a masa, pero la conexión a través del puerto del PC se ha realizado por medio del conversor RS232-RS485 de Camtronics, después de haber probado con otras opciones de conversores como son, Sintchi conversor con USB-RS232.

Aun existiendo gran variedad de marcas y de tipos de conversores, todas las pruebas se han realizado por medio del modelo Camtronics que es el que mejores resultados ha dado para comunicar los distintos dispositivos.



Figura 57. Conversores RS232-RS485.

5.3. Tarjetas MicroSD, EPROM, etc., para almacenamiento de datos.

- **Los inicios de la tarjeta SD**

SD significa Secure Digital y hace referencia a un formato de tarjeta inventado por Panasonic, pero que ha sido desarrollado junto con SanDisk y Toshiba Corporation a través de la asociación fundada en el año 2000. La Asociación de Tarjetas SD fue creada con el objetivo de fijar los estándares de estas tarjetas de memoria para un mejor uso en dispositivos portátiles.

Las tarjetas SD comenzaron a llegar al gran público en 2001 utilizándose sobre todo en cámaras digitales, teléfonos móviles, ordenadores portátiles, videoconsolas, PDAs... Al combinar un tamaño pequeño (32 x 24 x 2,1 mm) con buena resistencia se han convertido en un instrumento muy práctico para almacenar datos.

Existen diferentes modelos en función de su tamaño: SD, miniSD o microSD. Esta última es la más pequeña y la que se usa habitualmente en smartphones. Luego entran en juego otras variables como su clase y su versión. La clase se indica mediante un número (2, 4, 6 o 10) dentro de una letra "C" (Class) y un número (1 o 3) dentro de una letra "U" (UHS) cada una con velocidades diferentes. Su versión viene definida por siglas, SDSC (standard capacity), SDHC (high capacity), SDXC (extended capacity) y SDIO (Input/Output).

- **Tarjeta microSD**

Se trata simplemente de una tarjeta SD en su tamaño más reducido (15 x 11 x 1 mm) y, por tanto, ideal para smartphones y otros de dispositivos electrónicos de pequeño tamaño. Su capacidad varía entre unos 128 MB y 128 GB. Pero lo realmente importante es la velocidad a la que pueden transmitir los datos.

- **Tarjeta SDHC**

Las siglas HC hacen referencia a "High Capacity", del inglés capacidad alta. Aparecieron en 2006 como la segunda generación (después de las SDSC) y actualmente son la mayoría de tarjetas que usamos a diario. Tienen una capacidad de hasta 32 GB. Su sistema de archivos tiene un formato FAT32, lo que quiere decir que el tamaño máximo de archivo que puede guardar es de 4 GB.

- **Tipos de velocidades**

Las tarjetas micro SD suelen tener un número, aparte de los gigas, y que nos da información sobre la velocidad de transferencia de datos, es la llamada clase. Esto es un valor muy importante incluso más que la capacidad. El número que encierra una "C" toma los pares de 2, 4, 6 o 10 y el de la "U" solo tiene 1 o 3. Se corresponde con la velocidad mínima garantizada de transferencia que soportan las tarjetas SDHC o SDXC.

Así por ejemplo, el 2 quiere decir que funciona a un mínimo de 2 MB por segundo, la clase 4 como mínimo a 4 MB/s y así sucesivamente. En la clase U1 la velocidad es de 10 MB/s y en U3 es de 30 MB/s. En el uso diario en Android es suficiente con una clase 6, aunque si tu terminal es capaz de grabar vídeo a 4K .

CATEGORIA/ CLASS	VELOCIDAD MÍNIMA DE TRANSMISIÓN	NIVEL DE VELOCIDAD	DE RECOMENDACIÓN DE USO
UHS 3	30 MB/s	Máxima	Grabación de vídeo 4K y 2K
UHS 1 / Class 10	10 MB/s	Alta	Grabación de vídeo HD, Full HD y rafa de fotos
Class 6	6 MB/s	Media	Grabación de vídeo HD, Full

			HD
Class 4	4 MB	Baja	Grabación de vídeo HD
Class 2	2 MB/s	Baja	Grabación de vídeo HQ

Tabla 7: Tipo de tarjetas y velocidades.

- **Elegir la tarjeta adecuada**

El principal factor a tener en cuenta es la capacidad de memoria para la microSD que soporta nuestro smartphone. Esto lo podemos conocer en las especificaciones del terminal. Por ejemplo el Moto G 2015 soporta una microSD de hasta 32 GB. Una vez conocido este dato lo mejor será comprar la tarjeta con la clase más alta posible para mejorar la rapidez a la hora de guardar o leer datos.

En resumen, la mayoría de dispositivos soportan una capacidad mayor a 16GB. La marca no importa mucho siempre que te mantengas entre las más fiables (SanDisk, Kingston, Samsung...). Elegir máxima capacidad (según el dispositivo) y la máxima velocidad posible, siempre que te alcance el dinero.

- **Cómo utilizar una tarjeta SD**

Solo tenemos que insertar la tarjeta en la ranura específica de nuestro smartphone y esperar hasta que el dispositivo la reconozca. Es aconsejable insertar y extraer la tarjeta con el smartphone apagado. No intentéis nunca forzar la entrada, solo se puede introducir en una posición.

En nuestra tarjeta SD podremos almacenar datos, imágenes, aplicaciones y cualquier dato, además ahora con Android Marshmallow hay soporte nativo para tarjeta microSD.

Si el dispositivo no os deja pasar aplicaciones a SD simplemente desde la opción de la aplicación se puede utilizar Link2SD (con root).

Nuestro ArduPLC se caracteriza por incluir una ranura para acoplar tarjetas Micro SD para almacenamiento de datos con los que queramos trabajar.

5.4. Comunicación industrial (RS232, RS422, RS-485, USB, etc.)

Las comunicaciones industriales con fines de automatización exigen un amplio conocimiento de los estándares de conexión local para equipos terminales que permitan la comunicación entre una computadora y sus periféricos, incluidos los sensores, actuadores y controladores lógicos programables.

Este tipo de comunicaciones brinda el escenario ideal para construir redes de baja cobertura y bajo costo, ya sea con conexiones de corriente o de tensión. En los circuitos de conexión en serie por corriente o bucle de corriente se emplea ésta característica para representar la información del sistema a través de un cable que una los equipos terminales emisor y receptor. Por otro lado, en los circuitos de

conexión por tensión o bucle de tensión es ésta señal eléctrica la que se emplea para representar la información a través del enlace establecido entre los dos conductores enlazados.

Las exigencias de velocidad y alcance de las redes locales industriales hacen que sea necesario llevar a cabo un gran esfuerzo en pro de la normalización; de tal manera que se han generado diversas recomendaciones internacionales propuestas por la EIA (Electronic Industries Association). A lo largo de los siguientes apartados se presenta el funcionamiento del bucle de corriente, el bucle de tensión así como las similitudes y diferencias entre los estándares RS-232, RS-422 y RS-485 teniendo en cuenta el tipo de conector, la fidelidad, la inmunidad ante la interferencia electromagnética, la velocidad de transmisión y la protección de los usuarios.

En el presente proyecto nos vamos a centrar en la comunicación RS485, por lo que haremos una pequeña reseña sobre su historia y algunas de sus principales características eléctricas y mecánicas;

Historia: Es una de las especificaciones de la norma RS449 publicada como estándar en 1983 en donde se especifican las características eléctricas de un circuito de comunicación digital de salida ya sea el estado "0" o "1" lógicos mediante una señal diferencial más una señal de alta impedancia o "tercer estado" con lo cual es posible conectar más de un emisor en la red, motivo por el cual, es muy útil en redes locales industriales a dos hilos. Actualmente conocido como la norma TIA-485-A.222 confirmada por la TIA (Telecommunications Industry Association) en 2003.

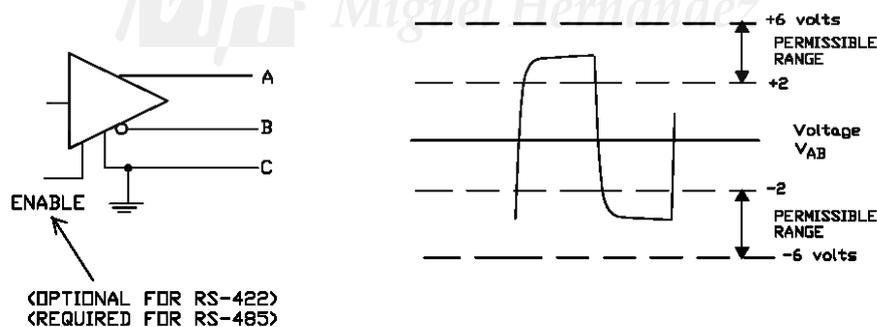


Figura 58: Driver con salida diferencial balanceada (RS 485)

Características Mecánicas:

El estándar define conexiones con cable de par de cobre trenzado y terminales RJ11 por lo cual existe mayor resistencia a la interferencia electromagnética y mayor velocidad de transmisión que otras normas como la RS232.

Permite la conexión de hasta 32 emisores con 32 receptores en transmisión doble simultánea full dúplex capaz de enlazar procesadores de comunicación principal (master) con procesadores subordinados (slaves) cuyo funcionamiento (acceso priorizado) está definido por los mismos arreglos topológicos de las redes de datos.

Características Eléctricas:

En la comunicación de la norma RS-485 se tiene que el emisor opera el "1" lógico a un voltaje de -1.5 a -5 Volt. el "0" lógico a la entrada del receptor en el rango de +0.2 a +12 Volt y la máxima tensión aplicada a la línea de salida es de -7 a +12 Volt.

El alcance de la transmisión está dado por la relación existente entre el volumen de los datos a transferir y el tiempo de la señal en la portadora determinado por la velocidad de transferencia de donde se obtiene que la longitud máxima del cable es de 1.200 m y la velocidad máxima de 10 Mbps que se obtiene en una distancia de 12 m.

Conexión de redes en RS 485

El estándar RS 485 se puede emplear para conexiones de tipo punto a punto, o bien para conexiones en bus de tipo multipunto con hasta 32 emisores-receptores. Realmente el estándar no define la configuración de las redes en sus especificaciones, por lo que el usuario puede emplear la configuración que mejor se adapte a las necesidades de su sistema. Existen dos tipos básicos de conexión multipunto empleados con 485:

- *Conexión a 2 hilos* (figura 29). Aprovechando la capacidad de los drivers de tipo 485 de permanecer en modo triestado, es posible emplear un único par de hilos que será común a todos los driver de transmisión y de recepción. Es recomendable conectar las líneas de masa para evitar tensiones en modo común elevadas y conseguir una mayor inmunidad al ruido. Por supuesto, tan sólo uno de los dispositivos podrá estar transmitiendo (línea enable habilitada), mientras el resto permanecen a la escucha. El modo de acceso más común en estos casos es de tipo maestro-esclavo; uno de los dispositivos hace las veces de maestro y va consultando cíclicamente al resto (esclavos), que tan sólo podrán transmitir a petición del maestro. En este caso la comunicación es de tipo semidúplex, por tratarse de un medio compartido.

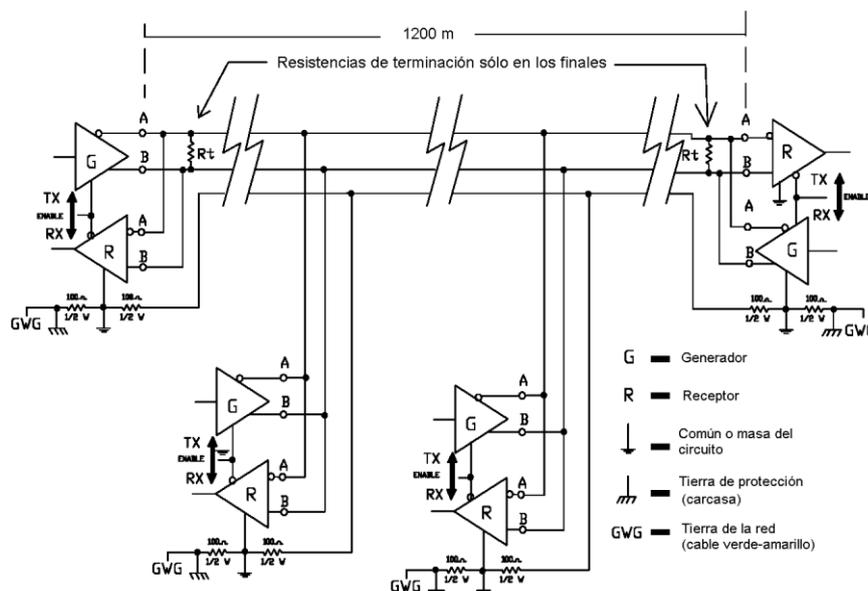


Figura 59. Red RS485 a 2 hilos.

- **Conexión a 4 hilos** (figura 60). Es una configuración típica para sistemas maestros esclavo, en la que se emplean dos hilos para el driver de transmisión del maestro, a los que se conectarán todos los de recepción del resto de dispositivos (esclavos). Un segundo par de hilos se emplean para conectar el driver de recepción del maestro, a los que se conectan todos los drivers de emisión de los esclavos. De esta manera, y empleando la mecánica de comunicación antes descrita, el maestro puede mantener una comunicación en modo dúplex completo con cada uno de los esclavos secuencialmente (el resto de drivers de transmisión deberán estar en alta impedancia).

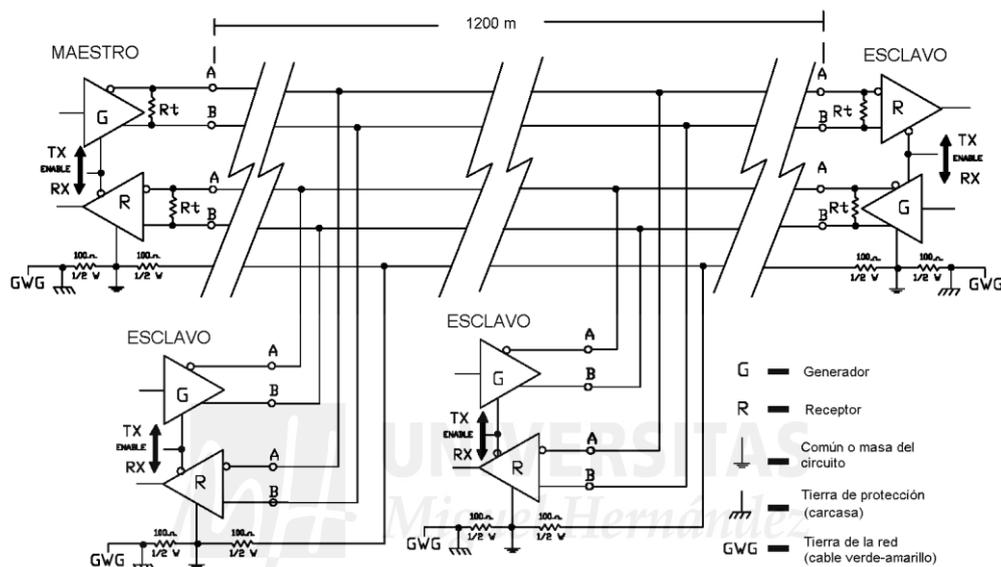


Figura 60: Red RS 485 a 4 hilos.

Conclusiones:

Los drivers RS-485 son la mejor alternativa para redes locales industriales y para las aplicaciones multiterminales debido a su protección térmica y amplio soporte de transceptores de carga.

El bucle de tensión ha desplazado progresivamente al bucle de corriente en el diseño de redes industriales gracias a la flexibilidad y potencia obtenidos en el desarrollo de conceptos eléctricos de mayor complejidad sobre los cuales se estructura.

Los materiales de fabricación de la portadora así como la distancia de transporte de datos impactan de manera inversamente proporcional a la capacidad y a su velocidad de transferencia.

El futuro de las redes locales industriales demanda diariamente de estándares que sean capaces de manejar un mayor número de equipos master y proporcionalmente una mayor cantidad de terminales slaves para cumplir con las exigencias del mundo productivo moderno.

5.5. Protocolos de comunicaciones: ModBus

El protocolo es el lenguaje con el que se comunican los dispositivos en la red. Es la forma en la que los dispositivos de una red intercambian información. Pueden estar implementados en hardware (tarjetas de red), software (drivers), o una combinación de ambos.

Por tanto se puede definir como: un conjunto de convenciones relacionadas con el formato de datos, métodos de transmisión, topología de red, accesos de bus y procedimientos de control en general necesarios para la comunicación entre dos o más equipos o servicios.

Algunas de las funciones que debe cumplir un protocolo son:

- Detección de la conexión física sobre la que se realiza la conexión.
- Pasos necesarios para comenzar a comunicarse (Handshaking).
- Negociación de las características de la conexión.
- Como se inicia y como termina un mensaje. Formato de los mensajes.
- Que hacer con los mensajes erróneos o corruptos (corrección de errores).
- Como detectar la pérdida inesperada de la conexión, y que hacer en ese caso.
- Terminación de la sesión de conexión.
- Estrategias para asegurar la seguridad (autenticación, cifrado).

Protocolo Modbus

Será el que vamos a utilizar para comunicar los equipos del sistema de adquisición de datos, es decir, el ArduPLC con los indicadores de pesada Swift.

Modbus es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado. Puede comunicarse con una o varias Estaciones Remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la supervisión y control de un proceso.

La Interfaz de la capa física puede estar configurada en RS-232, RS-422 o RS-485. Este protocolo permite interconectar múltiples dispositivos (clientes) a un dispositivo (servidor), aunque como se ha comentado el SWIFT solo puede trabajar como cliente. El cliente es capaz de interactuar individualmente con ellos a través del canal RS-485. Existen dos formatos diferentes para la comunicación Modbus, ASCII y RTU, ambos soportados.

El modo de comunicación es semi-duplex, ya que no es necesario transmitir y recibir al mismo tiempo. Este semi-duplex se realiza a 2 hilos (más tierra) por motivos de seguridad, evitando el cruce de datos, aunque gastemos un cable más.

Configuración del protocolo Modbus en el SWIFT

Las instrucciones disponibles del protocolo Modbus para el indicador SWIFT son:

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
01(0X01)	Leer Salida (1bit)
02(0X02)	Leer Entrada (1bit)
03(0X03)	Leer Registro Holding (16bit)
04(0X04)	Leer Registro de entrada (16bit)
05(0X05)	Escribir Salida
06(0X06)	Escribir un solo Registro
07(0X07)	Escribir multiples Salidas
08(0X08)	Escribir multiples Registros

Tabla 8: Instrucciones Modbus disponibles en el SWIFT

Con estas instrucciones se lleva a cabo la programación para realizar el traspaso de información y para realizar algunas funciones concretas, como las siguientes, entre otras.

CÓDIGO	FUNCIÓN
1	Cero
2	Tara Automatica
3	Tara prefijada (antes hay que escribir el valor de tara en el registro)
6	Salir Tara
7	Imprimir Eqtiqueta (si RS232 está configurado para impresión)
30	Resetear Dispositivo
32	Guardar los Registro modificados en NVM (memoria no volatil)
1100	Cancelar Función

Tabla 9: Funciones del SWIFT disponibles en la comunicación Modbus

Los holding register se utilizan para la configuración, por ejemplo para realizar la calibración, para parametrizar la conectividad RS-232 y RS-485, la salida analógica, las salidas a relé, etc.

Cada uno de los parámetros tiene asignado un registro, cuya dirección hay que tomar de una tabla disponible para poder acceder al dato en el almacenado, o para escribir, cuando se trate de un parámetro configurable. El registro puede ocupar 1 o 2 palabras (8 o 16 bits). Hay que tenerlo en cuenta la hora de realizar el programa de conexión o la lectura de los registros.

El valor que deseemos meter en cada parámetro (registro) se corresponde con un código. En los manuales existen tablas de equivalencia, donde aparece el significado de cada bit del registro y sus valores disponibles. Estos son los que se introducen en el registro en cuestión.

Toda la programación correspondiente a las peticiones de información sobre los indicadores SWIFT, se realiza con un código introducido en el ArduPLC, como veremos en el siguiente apartado.

Resistencia terminal de línea

La norma RS-485/422 establece que deben colocarse resistencias de terminación en ambos extremos de la línea de transmisión-recepción, y de igual impedancia que la de dicha línea (resistencia de 120 ohm. a 150 ohm. como norma). Esto se hace para evitar reflexiones o ecos indeseados que puedan interrumpir o deformar la información.

En el modo RS-485 (Half Duplex) se colocan resistencias en ambos extremos de la línea, mientras que en el modo RS-422 (Full Duplex), se coloca una en cada extremo receptor.

La decisión de colocar, o no, una resistencia de terminación de línea para la red RS-485 depende de la longitud del cable, de los equipos conectados y de la velocidad de transmisión. No obstante hay dos casos para la toma de esta decisión:

- No serán necesarias en instalaciones con longitudes de cable inferiores a 20 o 30 metros, y velocidades de transmisión inferiores a 115 kilo-baudios.
- Son necesarias cuando la longitud del cable es superior a los 100 o 200 metros.

Si se hace necesaria su instalación no debe de haber más de 2 resistencias de terminación de línea, una en cada extremo.

En nuestro caso no es necesaria la resistencia terminal en la instalación, puesto que, tanto los indicadores como el ArduPLC se montan dentro del mismo cuadro, las distancias de cables serán muy pequeñas y la resistencia necesaria es prácticamente nula. Además, la velocidad de transmisión utilizada es de 19200 baudios, muy por debajo de los 115 kilo-baudios.

Aun así, se estuvieron haciendo pruebas añadiendo resistencias Pull-up a la línea de comunicación, para ver si podíamos obtener una mejor señal de comunicación y poder verla en nuestra interfaz LabVIEW.

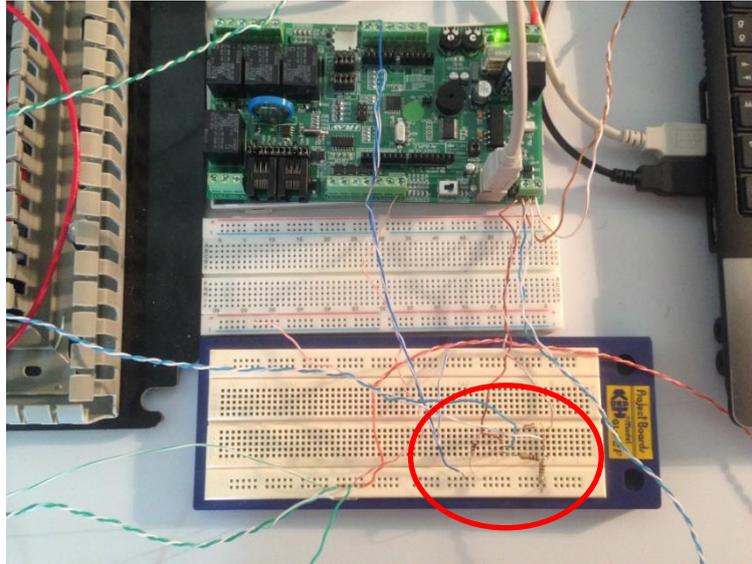


Figura 61: Instantánea de pruebas en Laboratorio, resistencias Pull-up.

5.6. Comunicación ArduPLC V2 con los indicadores de pesada.

La configuración del ArduPLC se puede realizar vía software de Arduino, usando un lenguaje basado en Lenguaje de programación en C, que nos da acceso a la programación mediante un conjunto de instrucciones aceptadas por el compilador del sistema.

Se van a mostrar ambos métodos de configuración, aunque tanto la configuración de las comunicaciones Modbus, como la configuración de la adquisición de datos, se han realizado mediante líneas de código.

La comunicación llevada a cabo entre nuestro ArduPLC y los indicadores de pesada Swift, mediante protocolo RTU de MODBUS con estándar RS485 como hemos mencionado antes.

Las características principales de este tipo de comunicación se mencionan en el apartado anterior (5.5).

Centrándonos en términos específicos de nuestra comunicación entre ArduPLC y los indicadores de pesada comentaremos la configuración de protocolo Modbus necesaria.

Nota: Una de las características del ArduPLC es que se puede configurar de tal modo que podamos tener la comunicación Serie del PC y la RS485 a la vez, pero en nuestro caso el dispositivo no la trabaja. Este problema fue transmitido vía mail a la casa RAY, y me comentaron que si fuera cambiarían el dispositivo sin problema.

- **Configuración del protocolo Modbus en el ArduPLC.**

Para poder llevar a cabo la comunicación entre el ArduPLC y los Swift de pesada, se ha realizado un checklist, (se puede ver en el anexo I) de los pasos principales a seguir para poder llevar a cabo dicha comunicación.

A continuación se muestra a modo de ejemplo la señal RS485 que medida a través del osciloscopio y sus características principales de la señal, medida a través del Osciloscopio, y se tienen que dar estas condiciones para obtener una señal optima de comunicación;

1. Entre telegramas constantemente > 1 V (B es más alto que A, / RX- / TX es más alto que RX-TX). Flanco ascendente en la diferencia de voltaje al comienzo del telegrama.
2. CH1 y CH2 se mueven en direcciones opuestas.
3. Oscilaciones significativas solamente en los bordes.
4. Amplitud de la diferencia de voltaje $>$ pico pico de 2 V

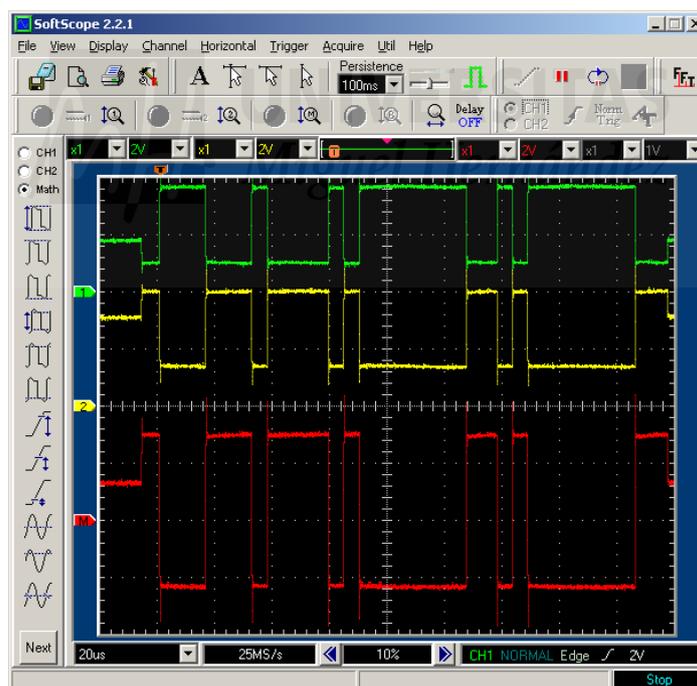


Figura: 62: RS 485 oscilloscope screenshots (pantallazo señales de comunicación Standard)

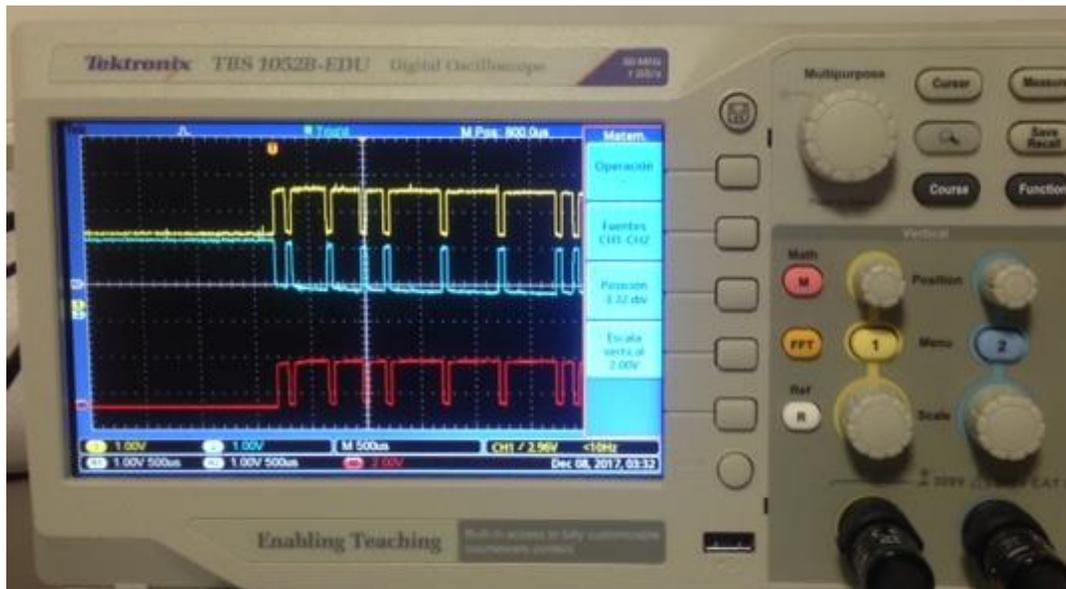


Figura 63: Señales de comunicación Standard en laboratorio a través de osciloscopio.

En este punto hay que señalar que la Comunicación Modbus con ArduPLC ha sido un trabajo algo tedioso, debido a la gran cantidad de pruebas que se han tenido que llevar a cabo para poder comunicar los dispositivos, ArduPLC, Swift y PC.

En un principio se andaba a ciegas sin poder ver dicha comunicación, finalmente se logró ver la comunicación a través del software de NI, LabView, utilizando como programa de comunicación MB Serial Port Slave, donde se han hecho la mayoría de pruebas.

Se han probado otros softwares como por ejemplo Advanced Serial Port Monitor, donde se estuvieron haciendo diferentes pruebas, y donde se podía ver la trama de la comunicación enviada a través de ArduPLC.

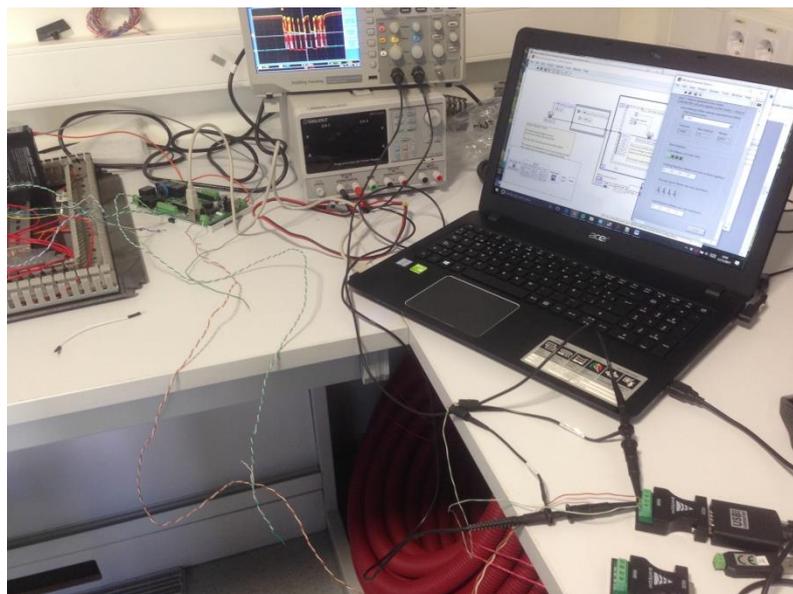


Figura 64: Instantánea de pruebas en Laboratorio.

Mencionar que los tiempos de respuesta en la interface de LabVIEW para ver alguna de las instrucciones mandadas desde ArduPLC, no bajaban de 10 segundos, tiempo algo excesivo para dicha comunicación, un contra para el sistema.

Tras muchas pruebas en el proceso de comunicación me puse en contacto con NI directamente vía mail para ver que podría ocurrir, y me respondieron que quizás LabVIEW no era la mejor herramienta para sniffing del tráfico de la comunicación y que estaba pensado para ser master o Slave directamente. Por lo que quizás habría que valorar otras opciones como interface.

Otras propuestas de software para ver la comunicación pueden ser Realterm o RSMonitor, las cuales no han podido ser probados aún.

5.7. Puerto SDI-12 (Este punto se incluirá como mejora).

Se puede incluir como ejemplo de aplicación el Sensor 5TE de la compañía Decagon Devices es capaz de medir el contenido de agua, la conductividad eléctrica y la temperatura de la tierra, todos los datos que recibe y envía el sensor se envían a través del protocolo serie de comunicación SDI-12 que puedes trabajar con una gran cantidad de sensores a 1200 baudios.

La temperatura es medida mediante un termistor, el volumen de agua se mide mediante la obtención de la permisividad eléctrica del medio que rodea al sensor y por último la conductividad eléctrica se mide transmitiendo una corriente eléctrica entre los dos tornillos que incorpora el sensor. Se debe tener cuidado de no ensuciar estos tornillos ni de que la superficie del sensor reciba luz solar pues esto podría alterar las mediciones de conductividad eléctrica y de temperatura, respectivamente.

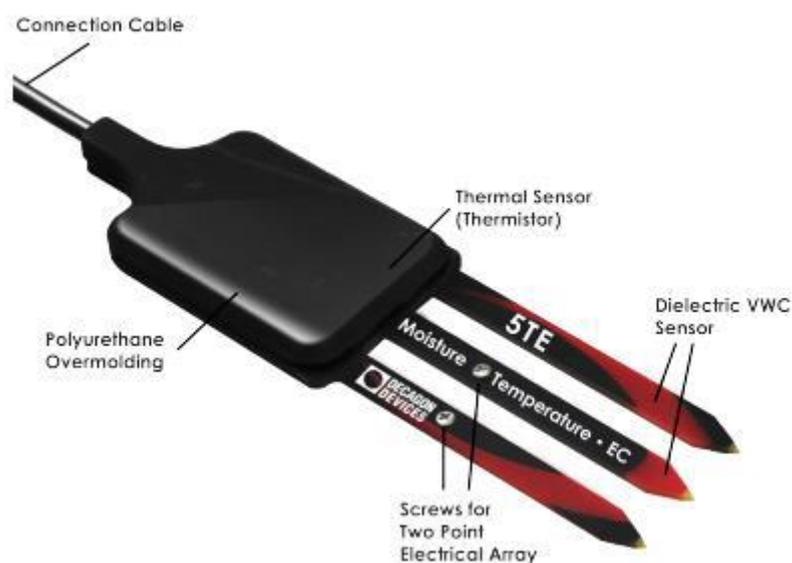


Figura 65: Componentes del sensor 5TE

Los datos serán manejados mediante la placa ArduPLC v2 de la compañía Ray Ingeniería Electrónica, la cual está basada en Arduino.

- Información relativa al sensor:

El sensor 5TE debe ser alimentado con 3.6-15 VDC, como la placa alimenta todos los pines con 5VDC esta será la tensión de alimentación que utilizaremos.

En cuanto a las conexiones, el sensor viene con un conector estéreo de 3.5mm, cuyas salidas son las siguientes:



Figura 66: Cable estéreo.

Con respecto a la placa ArduPLC tiene dos formas de alimentación, mediante cable USB o mediante fuente de alimentación externa (6.5V-30V), según si queremos una u otra deberemos modificar la configuración del jumper S2 para asegurarnos de que la alimentación está conectada en el lugar deseado. Como se puede observar en la Figura 30.

- Procedimiento para la conexión:

Para un proceso simple y de prueba, alimentaremos la placa ArduPLC mediante la conexión usb, debemos tener en cuenta que al usar este tipo de alimentación la salida de +24V cercana a las entradas digitales no se puede utilizar, así pues, para alimentar el sensor podemos usar la salida de +5V DC de las entradas analógicas o poner en alto alguna de las salidas digitales. Debemos conectar los tres cables del sensor a sus respectivos pines. La tierra (amarillo) a cualquier pin de la placa con la denominación 0V, el de alimentación (blanco) al pin de +5V y por el último el cable de datos (rojo) debe ser conectado a la entrada digital 1 o 2 (pines 3 y 4 en una placa Arduino Duemilanove), solo estos dos pines nos sirven para comunicarnos con el sensor ya que el pin al que conectemos los datos debe ser un pin que acepte interrupciones.

Debido a que las entradas digitales están optoacopladas, no debemos olvidarnos de conectar a tierra el pin N/P de la placa.

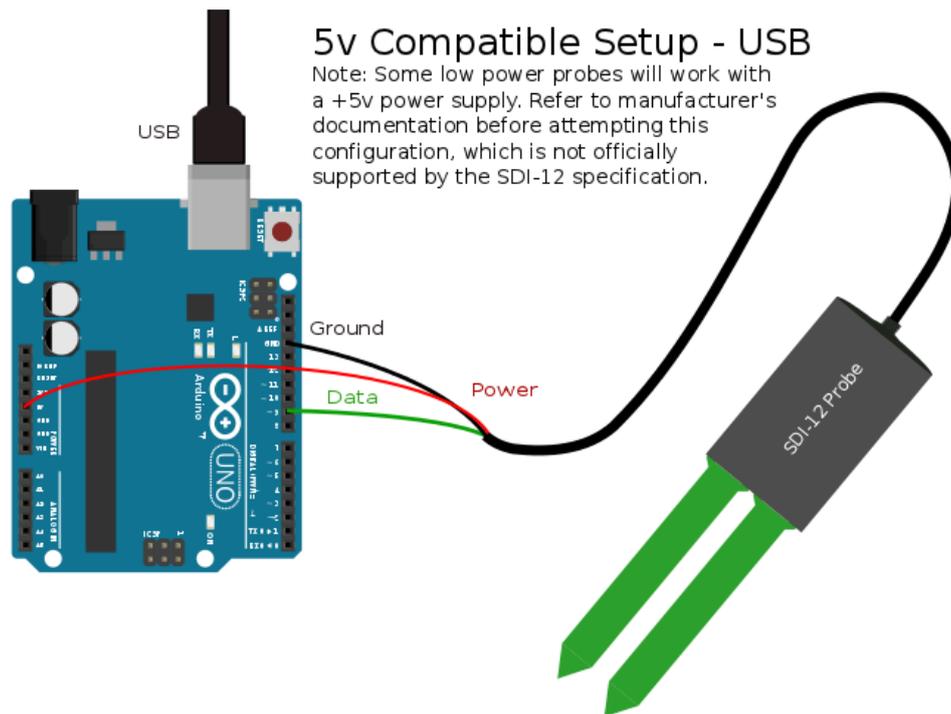


Figura 67: configuración de las conexiones en una placa Arduino UNO

Como la ArduPLC está basada en Arduino y es compatible con Arduino Duemilanove las conexiones serán las mismas que haríamos en una placa Arduino.

Una vez realizada las conexiones pertinentes proseguimos a cargar en el entorno Arduino el sketch que vamos a utilizar, como se explicó antes utilizaremos la librería SDI-12-serial-master para poder transmitir los datos al sensor siguiendo el protocolo SDI-12.

El sketch que nos permite revisar qué dirección tiene el sensor y cambiarla por otra las adjuntamos como anexo II.

6. Sistema de control

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.

3. Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.
- Actuador. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

6.1. Arduino como equipo de control. ArduPLC V2: salidas digitales por transistores y por relés, salidas pwm, salidas analógicas, etc.

Nuestro sistema de control se inicia en el indicador SWIFT que será el encargado de mandar las señales previamente fijadas con nuestro ArduPLC, a partir del cual incorpora salidas digitales, salidas analógicas, salidas pwm y relés.

Con las partes mencionadas anteriormente llevaremos a cabo el control del proceso de nuestro sistema.

Existen dos equipos de control básicos de salidas digitales:

- El relé, dispositivo electromagnético que, estimulado por una corriente eléctrica muy débil, abre o cierra un circuito en el cual normalmente se disipa una potencia mayor que en el circuito estimulador. Se caracterizan por su robustez, aislamiento entre circuito de control y de potencia, baja frecuencia de conmutación, bajo coste.
- El transistor bipolar de puerta aislada (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor) es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia. Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT. Se caracterizan por sus altas velocidades de conmutación, pueden manejar tensiones y corrientes elevadas y no requiere de corriente de base para mantenerse en conducción, a diferencia de otros transistores. Estos podemos manejarlos con las salidas digitales o analógicas ArduPLC. Tenemos un “contacto eléctrico” entre los terminales de cátodo y ánodo, en el que podemos regular la cantidad de electricidad que fluye entre ambos actuando sobre el tercer terminal.

6.2. Relés y contactores.

En nuestro sistema los relés utilizados en otras versiones de lisímetros, vienen incorporados en la propia placa del ArduPLC, como se puede ver en la descripción de las características de ArduPLC en el punto 5.Ç

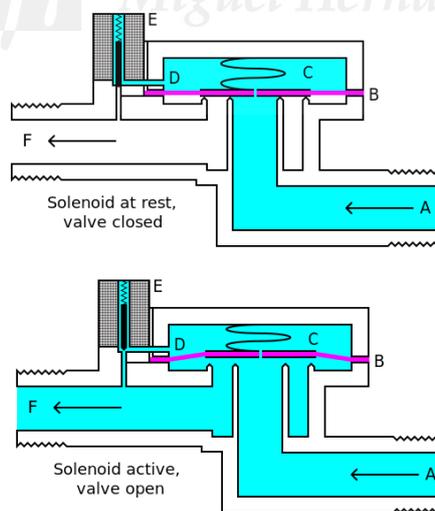
6.3. Actuadores: Electroválvulas. (descripción, funcionamiento, selección)

Descripción:

Una electroválvula es una válvula electromecánica, diseñada para controlar eléctricamente el paso de un fluido por un conducto o tubería. Generalmente tiene dos posiciones: abierto y cerrado. Las electroválvulas se usan en multitud de aplicaciones para controlar el flujo de todo tipo de fluidos. Tienen dos partes fundamentales: el solenoide y la válvula. El solenoide convierte la energía eléctrica en energía mecánica para accionar la válvula, aplicando el mismo principio de funcionamiento que los relés.

Funcionamiento:

Existen varios tipos de electroválvulas, en algunas el solenoide actúa directamente sobre la válvula dando la energía necesaria para su movimiento.



- A- Entrada
- B- Diafragma
- C- Cámara de presión
- D- Conducto de vaciado de presión
- E- Solenoide
- F- Salida.

Figura 68. Grafico funcionamiento electroválvula.

También es posible construir electroválvulas biestables que usan un solenoide para abrir la válvula y otro para cerrar o bien un solo solenoide que abre con un impulso de corriente y cierra con el siguiente. Estas tienen dos contactos eléctricos, de modo que al cambiar de posición la válvula abre uno de ellos y cierra el otro.

Para la consecución del proyecto se han utilizado dos electroválvulas de tipo directo, estas pueden ser cerradas en reposo (normalmente cerradas) lo cual quiere decir que cuando falla la alimentación eléctrica quedan cerradas o bien pueden ser del tipo abiertas en reposo (normalmente abiertas) que quedan abiertas cuando no hay alimentación.

Es decir, en el primer caso la válvula se mantiene cerrada por la acción de un muelle y el solenoide la abre venciendo la fuerza del muelle.

Esto quiere decir que el solenoide debe estar activado y consumiendo energía mientras la válvula está abierta. Las normalmente abiertas tienen el mismo funcionamiento cambiando el consumo de energía a cuando la válvula está cerrada.



Figura 69. Instantánea tipo electroválvula.

El control de las electroválvulas se lleva a cabo gracias a la función creada con código IDE del ArduPLC.

El proceso comienza cuando se detecta un peso igual o superior a 4 kg en el recipiente de cultivo, iniciándose la secuencia de apertura y cierre de las electroválvulas. Una vez que el peso desciende de los 2 kg el proceso se detiene para el vaciado del depósito de drenaje y se realiza mediante dos electroválvulas colocadas a la entrada y a la salida del depósito de drenaje.

El proceso de control se inicia en el indicador SWIFT, mediante la comunicación Modbus, que en función de los valores obtenidos haremos activar el los relés, incorporados en nuestro ArduPLC, relacionados con cada una.

Al activar el relé en cuestión, se cierra el circuito de alimentación de la bobina de excitación de otro relé externo, provocando el cierre de su contacto, el cual se

encuentra en el mismo circuito que la electroválvula, provocando la apertura o cierre (en función de su estado normal, NC o NA).

Se ha optado por este sistema de control debido principalmente a 3 factores:

- Las salidas a relé de los indicadores SWIFT solo soportan cargas con una intensidad máxima de 3'3 A, lo que no es suficiente, teniendo en cuenta los picos de intensidad generados en los escalones de subida y de bajada.
- Limitar la carga soportada por los relés del indicador SWIFT. En caso de rotura, para su reparación sería necesario desinstalar todo el indicador, lo cual se traduciría en una parada completa de la máquina. Sin embargo el bajo coste de un relé externo nos permite tener a mano varias unidades para su rápida sustitución.
- Aislar la maniobra y el circuito de fuerza de las electroválvulas. Los picos de tensión comentados también pueden ser peligrosos si se introducen en el sistema de instrumentación, produciendo transitorios que llevarían a obtener valores erróneos. Utilizaremos los relés incorporados en nuestro ArduPLC, con lo que conseguiremos otra barrera adicional para evitar que se introduzcan dichas perturbaciones.

Por lo tanto se procede a estudiar las características, de las electroválvulas seleccionadas:

Selección de las electroválvulas:

Para la selección de las electroválvulas se han tenido en cuenta una serie de factores:

- Ambas electroválvulas deben de ser de 2 vías, esto significa, que posean una entrada y una salida. En su defecto se pueden usar válvulas de 3 vías, las cuales presentan 1 entrada y 2 salidas, pero en este caso se debe de taponar una de las salidas.
- Internamente deben de ser electroválvulas de bola, tecnología muy fiable y ampliamente utilizada en procesos de aguas limpias o no muy sucias, como es el caso, que se antoja la forma más sencilla y económica para nuestra aplicación.
- El material de la electroválvula puede ser latón. Se trata de un material económico, utilizado en aplicaciones donde el fluido no alcanza una temperatura muy alta, y en este caso el agua va a estar a temperatura ambiente.
- Ambas electroválvulas serán de un tamaño mínimo (DN25 o inferior), pero que permita una evacuación relativamente rápida del depósito, cuando este se llene. De este modo conseguimos que su instalación no sea dificultosa en

el pequeño espacio disponible, y una reducción en el coste de adquisición. En cualquier caso, no será necesario evacuar una gran cantidad de agua.

- Las electroválvulas deben permitir una alimentación a 24 VDC, mediante su conexión a una de las fuentes de alimentación.

Finalmente se ha optado por utilizar unas electroválvulas motorizadas de la casa TF Fluid Control System. Concretamente el modelo CWX-15N-CR02, que posee una bobina que permite un rango de tensiones de alimentación desde 9 a 30 VDC, permitiendo su conexión a la fuente de 24 VDC mencionada.

Este modelo será el utilizado tanto a la entrada como a la salida del depósito de drenaje: debido a que se trata de una EV motorizada, permite funcionar con un estado NA o NC, en función de la conexión eléctrica que se lleve a cabo en sus cables.

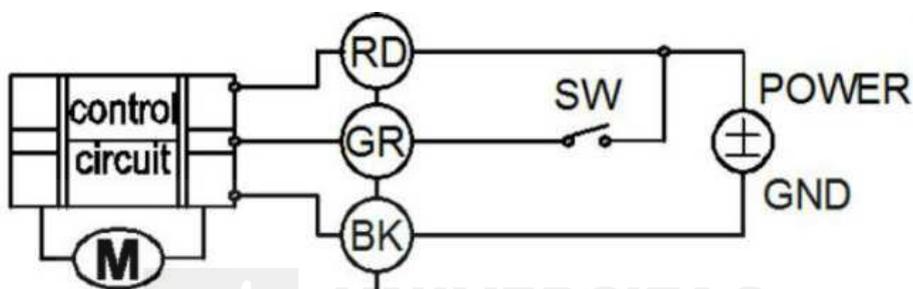


Figura 70: Esquema de conexión de la electroválvula motorizada

Como se puede observar en la Figura 70, esta electroválvula posee tres hilos de conexión. La alimentación a 24 VDC se realiza mediante los hilos rojo y negro. El cable verde se utiliza como maniobra de la electroválvula: mediante el uso de un relé podemos conmutar el estado de la EV. De esta forma, cuando el contacto del relé está cerrado (conexión directa a +24 VDC) la electroválvula se abre, mientras que si abrimos el contacto del relé le EV se cerrara.

Por el modo de funcionamiento descrito podría suponerse que la EV debe estar alimentada continuamente, ya sea para mantener el estado abierto o cerrado. Sin embargo no es así, ya que posee un mecanismo interno de tipo final de carrera, que al detectar el cierre completo o la apertura completa, provoca el corte de alimentación, quedando en esa posición hasta que el contacto del cable verde no cambie de nuevo su estado.

En la Tabla 10 se observan las principales características de la electroválvula seleccionada.

Diámetro Nominal	DN25
Conexión a proceso	1" NPT
Rango de presiones	0 - 10 Bar
Tipo de válvula	De bola
Material	Latón
Rango temperatura de fluido	0° a +90°C

Tiempo de apertura /cierre	5 segundos
Grado de protección	IP65
Peso	600 g
Alimentación	9 - 30 VDC
Corriente máx.	80 mA
Consumo	1'92 W (a 24 VDC)
Coste	60

Tabla 10: Características de la electroválvula motorizada CWX-15N-CR02

6.4. Sistema de control para la gestión del depósito de drenaje.

Este sistema consta de datos aportados por el sistema de pesaje del depósito de drenaje, de varios equipos de control (relés), de varios actuadores (electroválvulas) y de un equipo de adquisición de datos ArduPLC, que es el encargado de ejecutar las acciones pertinentes dependiendo de las premisas. Como ya se ha comentado con anterioridad el depósito de drenaje tiene una capacidad de 2.5 litros y pesa 1200gr, con el propósito de evitar un desbordamiento del mismo se ha tomado la premisa de vaciarlo cuando alcance los 2 Kg y para no incurrir pérdida de tiempo durante la evacuación del agua se ha tomado como valor mínimo 4 Kg de peso de valor para la maceta.

Funcionamiento:

Para que el depósito de drenaje cumpla con los valores establecidos se decidió instalar una electroválvula normalmente abierta a la salida del recipiente de cultivo que coincide con la entrada del depósito de drenaje y otra electroválvula normalmente cerrada a la salida del depósito de drenaje, ambas controladas por relés. Cuando nuestro ArduPLC reciba una señal procedente del SWIFT indicando que el depósito de drenaje pesa más de 2kg vía comunicación Modbus activara el relé que opera la electroválvula normalmente abierta y la cierra, un instante después reciba la señal del SWIFT para activar el relé correspondiente a la electroválvula normalmente cerrada, abriéndola e iniciando así la descarga. Si nuestro ArduPLC recibe la señal indicando que el depósito de drenaje pesa menos de 1Kg este ordena al SWIFT desactivar el relé de la electroválvula normalmente cerrada y un instante después lo propio con la electroválvula normalmente abierta, quedando así una vez más en el estado de reposo.

6.5. Actuadores: ventiladores para cuadros eléctricos

Debido a la evolución tecnológica de los equipos eléctricos y electrónicos instalados dentro de los cuadros eléctricos (sobre todo en instalaciones industriales con una gran automatización) se requiere una gestión térmica más exigente para un control eficaz de la temperatura. Componentes cada vez más pequeños, aumento del uso de la electrónica, aparición de nuevos productos basados en la electrónica de potencia, hacen de la gestión de la temperatura una

necesidad que es preciso tener en cuenta cada vez con mayor frecuencia en la creación de los cuadros eléctricos.

Los riesgos que se corren al no disponer de una solución térmica adecuada son muchos, afectando a la vida de los componentes y al rendimiento de las instalaciones, incluso pudiendo provocar un paro en la producción. Al igual que los grados de protección IP/IK, también existen diversos equipos de refrigeración adecuados a cada instalación dependiendo de las condiciones ambientales, la naturaleza de los componentes del cuadro eléctrico, etc. En algunos casos es suficiente sobredimensionar el tamaño del armario, utilizar ventiladores o intercambiadores aire/aire. En otros más extremos en los que la temperatura ambiente sea más elevada, es preciso utilizar los intercambiadores de calor aire/agua o equipos de climatización. Para consecución de este proyecto se ha decidido utilizar ventilación forzada mediante ventiladores y filtros ya que es una opción económica que se adecua a los requisitos: fácil instalación y mantenimiento, temperatura homogénea en todo el cuadro eléctrico, IP elevado, y evacuación de calor media. El ventilador escogido ha sido el D12B05HWS Z00 24 DC con un consumo de 0,32 A del fabricante Lotec con su correspondiente rejilla (150mm diagonal).



Figura 71. Ventilador Lotec

Los filtros utilizados son dos AG12U del fabricante lotec. El ventilador y uno de los filtros estarán situados en el lateral derecho del cuadro, en la zona superior, mientras que el otro filtro se situará en el lateral izquierdo del cuadro, en la zona inferior.



Figura 72. Filtro AG12U Lotec.

6.6. Cálculo de la fuente de alimentación de las EV y el ventilador.

6.6.1. Consumo de las electroválvulas

La bobina de excitación de las electroválvulas debe de funcionar a 24 VDC, como el resto de dispositivos. Por lo tanto, la salida de esta fuente de alimentación será a 24 VDC.

El consumo de las bobinas de 24 VDC es de 1'92 W para los 2 casos, puesto que ambas electroválvulas y sus bobinas son idénticas.

6.6.2. Consumo del ventilador

Se ha escogido un ventilador de 120 x 120 mm a 2800 rpm.

Se trata del modelo D12B05HWS de la casa Lotec, que proporciona un caudal de aire de 178 m³/h. Su alimentación es a 24 VDC, y la potencia consumida por el mismo es de 7'7 W.

Por lo tanto, la potencia máxima total requerida a la fuente es de:

$$P1 = (2 \times P_{ev}) + P_{ventilador} = (2 \times 1,92) + 7,7 = 11.54 \text{ W}$$

7. Sistema de telemetría.

7.1. Telemetría y telecontrol.

Haremos una introducción a la Telemetría pero éste apartado será propuesto como líneas de futuro y mejoras del sistema.

La telemetría es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema. La

palabra telemetría procede de las palabras griegas tele, que quiere decir a distancia, y la palabra metrón, que quiere decir medida. El envío de información hacia el operador en un sistema de telemetría se realiza típicamente mediante comunicación inalámbrica, aunque también se puede realizar por otros medios, como pueden ser teléfono, redes de ordenadores, enlace de fibra óptica, entre otros. Si los sistemas de telemetría reciben las instrucciones y los datos necesarios para operar desde un centro de control, se está hablando de telecontrol.

El telecontrol consiste en el envío de indicaciones a distancia mediante un enlace de transmisión (nombradas anteriormente), utilizando órdenes enviadas para controlar un sistema o sistemas remotos que no están directamente conectados al lugar desde donde se envían las ordenes. La palabra viene de dos palabras griegas tele, que significa distancia, y la palabra control. El telecontrol se puede llevar a cabo tanto en tiempo real como no, dependiendo de las circunstancias.

La telemetría es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema. La palabra telemetría procede de las palabras griegas tele, que quiere decir a distancia, y la palabra metrón, que quiere decir medida. El envío de información hacia el operador en un sistema de telemetría se realiza típicamente mediante comunicación inalámbrica, aunque también se puede realizar por otros medios, como pueden ser teléfono, redes de ordenadores, enlace de fibra óptica, entre otros. Si los sistemas de telemetría reciben las instrucciones y los datos necesarios para operar desde un centro de control, se está hablando de telecontrol.

El telecontrol consiste en el envío de indicaciones a distancia mediante un enlace de transmisión (nombradas anteriormente), utilizando órdenes enviadas para controlar un sistema o sistemas remotos que no están directamente conectados al lugar desde donde se envían las ordenes. La palabra viene de dos palabras griegas tele, que significa distancia, y la palabra control. El telecontrol se puede llevar a cabo tanto en tiempo real como no, dependiendo de las circunstancias.

Un sistema en que se monitorean a distancia sus variables y a la vez se pueden dar comandas a distancia para controlar sus actuadores es un sistema de telemetría y telecontrol. Como ejemplo se puede observar el sistema de telemetría de la figura XX, si en él se le añadiera la opción al dispositivo móvil de mandar la acción por ejemplo de accionar una bomba de aporte de agua se estaría hablando de un sistema de telemetría y telecontrol.

7.2. Módulos de comunicaciones para Arduino/ArduPLC V2.

En este apartado se hará mención únicamente de uno de los tipos de módulos de comunicaciones que pueden ser integrados en la placa ArduPLC. Podemos ver más detalles en el apartado 5.1.

7.3. Shield GSM/GPRS SIM800L.

Este shield es una parte importante del proyecto, es el encargado de realizar la comunicación con un servidor propio alojado en internet. Se encargará de enviar y recibir datos para establecer una comunicación. De esta manera podremos monitorizar y actuar de forma remota.

Este shield generará una conexión a internet a través de una tarjeta SIM que añadiremos. De esta manera no necesitaremos conectarnos a una red local que exista por las proximidades. Esto es una ventaja si se quiere instalar en un área sin acceso a ninguna red.

Podremos conectarnos a la red GSM y enviar o recibir mensajes SMS, realizar o recibir llamadas o enviar datos a servidores a través de la red de teléfono. Aunque actualmente ya existen placas con similar funcionamiento, esta es la considerada oficial desarrollada entre el equipo de Arduino y la compañía Telefónica.

Según indican en la página oficial, es compatible con los modelos UNO, MEGA y Leonardo.



Figura 73. GSM-SIM 800.

La librería GSM.h la utilizaremos a la hora de realizar el código. Esta placa la usaremos para conectarnos como cliente a un servidor donde interactuamos con los datos del programa. Se podrá enviar un mensaje de texto de manera que sea un sistema de alarma, por lo que recibiremos un sms a nuestro teléfono si se cumplen unas características fijadas por los autores del proyecto.

Otra de las librerías que podemos usar es la Adafruit-Fona Master, y por otro lado hacer mención al manual de comandos de comunicación para GSM.

Se muestra código en entorno IDE para establecer la comunicación con la tarjeta SIM800L:

```
#include <SoftwareSerial.h>

//SIM800 TX is connected to Arduino D8
#define SIM800_TX_PIN 3

//SIM800 RX is connected to Arduino D7
#define SIM800_RX_PIN 2

//Create software serial object to communicate with SIM800
SoftwareSerial serialSIM800(SIM800_TX_PIN,SIM800_RX_PIN);

void setup() {
  //Begin serial communication with Arduino and Arduino IDE (Serial Monitor)
  Serial.begin(9600);
  while(!Serial);

  //Being serial communication with Arduino and SIM800
  serialSIM800.begin(9600);
  delay(1000);

  Serial.println ("Setup Complete!");
  Serial.println ("Sending SMS...");

  //Set SMS format to ASCII
  serialSIM800.write("AT+CMGF=1\r\n");
  delay(1000);

  //Send new SMS command and message number
  serialSIM800.write("AT+CMGS=\"609731774\"\r\n");
  delay(1000);

  //Send SMS content
  serialSIM800.write("TEST");
  delay(1000);

  //Send Ctrl+Z / ESC to denote SMS message is complete
  serialSIM800.write((char)26);
  delay(1000);

  Serial.println("SMS Sent!");
}

void loop() {
}
```

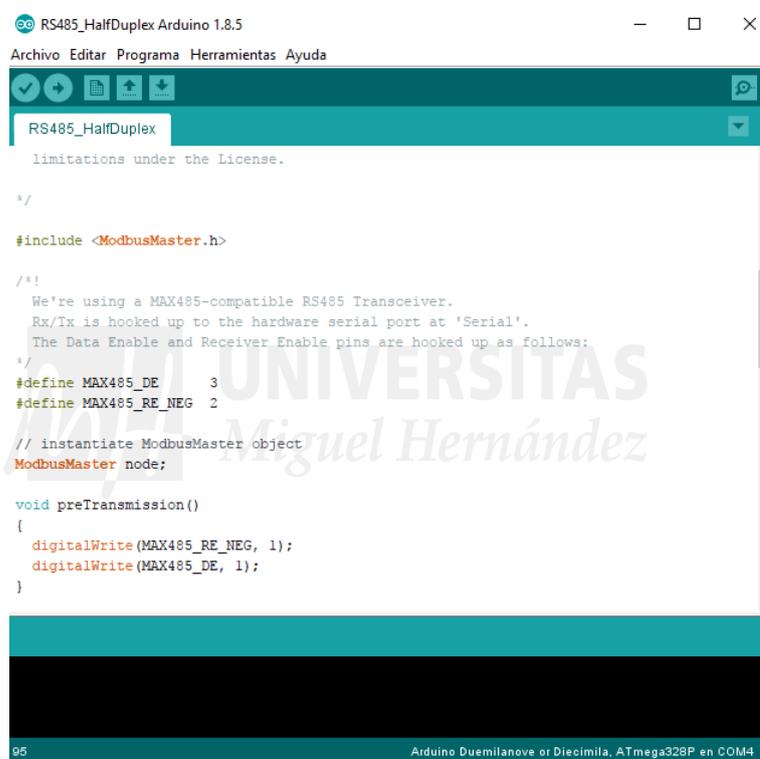
8. Software de adquisición de datos y control

8.1. IDE Arduino para ArduPLC V2.

8.1.1. Entorno de desarrollo.

Para programar la placa es necesario descargarse de la página web de Arduino el entorno de desarrollo (IDE), la última versión de Arduino es la 1.8.5.

Se dispone de versiones para Windows y para MAC, así como las fuentes para compilarlas en LINUX. En la siguiente figura se muestra el aspecto del entorno de programación.



```
RS485_HalfDuplex Arduino 1.8.5
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
RS485_HalfDuplex
limitations under the License.
*/
#include <ModbusMaster.h>
/*
We're using a MAX485-compatible RS485 Transceiver.
Rx/Tx is hooked up to the hardware serial port at 'Serial'.
The Data Enable and Receiver Enable pins are hooked up as follows:
*/
#define MAX485_DE 3
#define MAX485_RE_NEG 2
// instantiate ModbusMaster object
ModbusMaster node;
void preTransmission()
{
digitalWrite(MAX485_RE_NEG, 1);
digitalWrite(MAX485_DE, 1);
}
95 Arduino Duemilanove or Diecimila, ATmega328P en COM4
```

Figura 74. Entorno desarrollo IDE-Ejemplo código comunicación RS485.

Los usuarios de Arduino tienen la posibilidad de escribir sus propias bibliotecas. Ello permite disponer de código que puede reutilizarse en otros proyectos, mantener el código fuente principal separado de las bibliotecas y la organización de los programas construidos es más clara.

En el presente proyecto como librería principal a partir de la cual se ha desarrollado el código de control ha sido, la librería <ModbusMaster.h>, pero también hacer reseña de otras librerías necesarias para los distintos algoritmos de control del sistema como son <SD>, <SoftwareSerial>, <Wire>, <GSM> entre otras tantas que se pueden usar para desarrollo de código, <Ethernet>, <LiquidCrystal> <Servo>.

Lo primero que tenemos que hacer para comenzar a trabajar con el entorno de desarrollo de Arduino es configurar las comunicaciones entre la placa Arduino y el PC. Para ello deberemos abrir en el menú "Tools" la opción "Serial Port". En esta opción deberemos seleccionar el puerto serie al que está conectada nuestra placa. En Windows, si desconocemos el puerto al que está conectado nuestra placa podemos descubrirlo a través del Administrador de dispositivos (Puertos COM & LPT/ USB Serial Port).

8.1.2. Estructura básica de programa.

La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes: setup y loop. Setup() constituye la preparación del programa y loop() es la ejecución. En la función Setup() se incluye la declaración de variables y se trata de la primera función que se ejecuta en el programa. Esta función se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el pinMode (p. ej. si un determinado pin digital es de entrada o salida) e inicializar la comunicación serie. La función loop() incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.).

8.1.3. Declaración de variables.

Como introducción mencionar que una variable debe ser declarada y opcionalmente asignada a un determinado valor. En la declaración de la variable se indica el tipo de datos que almacenará (int, float, long)

Una variable puede ser declarada en el inicio del programa antes de setup(), localmente a una determinada función e incluso dentro de un bloque como pueda ser un bucle. El sitio en el que la variable es declarada determina el ámbito de la misma. Una variable global es aquella que puede ser empleada en cualquier función del programa. Estas variables deben ser declaradas al inicio del programa (antes de la función setup()).

Se detallan los principales puntos de la instalación a partir de los cuales se crearán las principales variables del código.

- Recipiente de cultivo (Peso de referencia)
- Depósito de Drenaje (Peso de Referencia)
- Válvula Motorizada Depósito de Drenaje N/A, en la entrada, no permitirá entrada de más agua hasta que se vacíe el depósito de drenaje.
- Válvula Motorizada depósito de Drenaje N/C, se abrirá cuando el depósito de Drenaje se llene al máximo (peso de Referencia).

- Las Válvulas Motorizadas las pondremos en marcha mediante los relés del ArduPLC.
- Un tercer relé lo utilizaremos para el control del ventilador del Armario.
- SWIFTs – 3 Células de Carga Recipiente de Cultivo + 1 Célula de Carga Deposito Drenaje.

1) Declaración de constantes y variables;

Como en cualquier programa, es necesario en primer lugar declarar las constantes y las variables utilizadas en el programa.

Tabla de variables y constantes:

Descripción Nombre	Nombre Variable	Tipo Variable	Valor	Uso
Peso Recipiente de Cultivo	Peso_RC	float		Variable que recoge el valor del peso de RC
Peso Deposito de Drenaje	Peso_DD	float		Variable que recoge el valor del peso de DD
Lecturas Swift	LSwift	int	{1,2}	Array que guarda los datos leídos del SWIFT
Activación/ Desactivación EVNA	MV_1	bool		Variable que muestra la activación o desactivación Válvula Motorizada NA (RC-DD)
Activación/ Desactivación EVNC	MV_2	bool		Variable que muestra la activación o desactivación Válvula Motorizada NC (DD)
Estado de la EVNA	Salida_MV_1	bool		Estado de la salida activada/desactivada
Estado de la EVNC	Salida_MV_2	bool		Estado de la salida activada/desactivada
Referencia esclavo Swift Recipiente de cultivo	Swift_RC-->RC	int	A+/B	Entrada SWIFT peso RC, Comunicación RS485
Referencia esclavo Swift Deposito de Drenaje	Swift_DD-->DD	int	A+/B	Entrada SWIFT peso DD, Comunicación RS485
Referencia esclavo Swift PC (Labview)	PC	int	A+/B	Entrada Serial Port PC, Comunicación RS485
Peso referencia máximo 4000	Pref_RC máximo	float		Peso de Referencia RC
Peso referencia mínimo 2000	Pref_DD mínimo	float		Peso de Referencia DD
No utilizadas	Peso_RC_ant	float	-1	Variable que recoge el último valor de peso RC, para realizar la actualización en caso de cambio sustancial
No utilizadas	Peso_DD_ant	float	-1	Variable que recoge el último valor de peso RC, para realizar la actualización en caso de cambio sustancial

Tabla 11: Declaración Variables

8.1.4. Funciones

Una función es un bloque de código identificado por un nombre y que es ejecutado cuando la función es llamada. La declaración de una función incluye en primer lugar el tipo de datos que devuelve la función (e.j. int si lo que devuelve es un valor entero). Después del tipo de datos se especifica el nombre de la función.

En nuestro caso se pretende crear las siguientes funciones principales para el sistema de adquisición de datos:

Programa principal

Se trata de un bucle en el que se ejecutan periódicamente las siguientes funciones:

- **Función 1:** Se leen los valores de temperatura.
- **Función 2:** Se leen los valores de peso del recipiente de cultivo y del depósito de drenaje.
- **Función 3:** Se ejecuta el programa de control del ventilador del cuadro. Si la temperatura es mayor de 55°C se pondrá en marcha, y si es menor de 50°C se desactiva. Como veremos más adelante, la temperatura admitida en el cuadro no debe de exceder los 40 grados. Sensor de Temperatura... Para realizar el control del ventilador, en primer lugar se consulta el estado del ventilador al SWIFT (es el estado del relé 1 del ArduPLC del recipiente de cultivo).

A continuación se compara la temperatura con los valores fijados como constantes, y se actúa en consecuencia activando o desactivando el relé del ArduPLC (escribiendo en la salida correspondiente).

- **Función 4:** Se ejecuta el programa de control de las electroválvulas del depósito de drenaje. Se trata de un programa secuencial. En primer lugar se definen los estados de las EV, y al ser 2 EV se obtienen 4 combinaciones posibles.

A continuación se establece la comparación con el peso máximo, a partir del cual se activa el proceso de vaciado. Si el peso es mayor se cierra la electroválvula NA situada a la entrada del depósito, pasando al Estado 2. A continuación se abre la válvula NC (a la salida del depósito), pasando al estado 3. Se permanecerá en este estado hasta que el peso del depósito sea inferior al límite inferior fijado, volviendo a cerrar la válvula NC, estableciendo el estado 4. Por último, se desactiva la válvula NA y se vuelve a abrir, lo que las deja a ambas EV en su estado de reposo, que es el estado 1. En este caso, se consulta el estado de las EV (estados de los relés 2 y 3 del SWIFT del depósito de drenaje), y se actúa en consecuencia.

- **Función 5:** En esta parte se hacen las llamadas a cada una de las tablas de datos creadas antes.

8.2. Algoritmo de adquisición y almacenamiento de datos

Con este algoritmo lo que se pretende es la toma de datos a tiempo real de los valores de pesos del recipiente de cultivo y depósito de drenaje, almacenar el valor de temperatura del cuadro y el estado del ventilador.

Para ello utilizaremos la tarjeta uSD del ArduPLC.

La idea principal era la creación de las siguientes tablas;

- almacenar los valores de peso tanto del recipiente de cultivo como del depósito de drenaje, guardar los pesos máximo y mínimos de ambos pesos, y el estado del depósito si se encuentra en estado de llenado o vaciado. Se crearían tres tablas más para almacenar valores cada 10 min, cada 30 min y cada hora, respectivamente.
- Se crearía una quinta tabla para almacenar valores de temperatura del cuadro, cada 10 min.

Con el siguiente sketch (código ejemplo dentro del entorno Arduino) se puede leer y escribir un archivo en nuestra tarjeta de SD:

En este caso se utilizaría una shield de Ethernet que incorporaría una ranura para incorporar la tarjeta SD, con el comando `SD.begin` direccionado al pin 4 como pin CS. Con el comando `SD.open` se abre un nuevo archivo, nombrado como "example.txt". Con `FILE.WRITE` habilitamos el acceso a escritura y lectura en el archivo empezando desde el final. Con el comando `myfile.close()`, con el comando `SD.exists()` comprobamos que el archivo existe, y con `SD.remove` lo eliminaríamos.

SD card read/write

This example shows how to read and write data to and from an SD card file

The circuit:

* SD card attached to SPI bus as follows: **Comunicación Serie Periferica=comunicación asincrona de comunicación.**

** MOSI - pin 11- Dato de salida desde el master

** MISO - pin 12- Dato de salida desde el esclavo

** CLK - pin 13 - Señal de reloj

** CS - pin 4 (for MKRZero SD: SDCARD_SS_PIN) esclavo seleccionado.

created Nov 2010

by David A. Mellis

modified 9 Apr 2012

by Tom Igoe

This example code is in the public domain.

```
*/  
  
#include <SPI.h>  
#include <SD.h>  
  
File myFile;  
  
void setup() {  
  // Open serial communications and wait for port to open:  
  Serial.begin(9600);  
  while (!Serial) {  
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only  
  }  
  Serial.print("Initializing SD card...");  
  if (!SD.begin(4)) {  
    Serial.println("initialization failed!");  
    while (1);  
  }  
  Serial.println("initialization done.");  
  
  // open the file. note that only one file can be open at a time,  
  // so you have to close this one before opening another.  
  myFile = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);  
  
  // if the file opened okay, write to it:  
  if (myFile) {  
    Serial.print("Writing to test.txt...");  
    myFile.println("testing 1, 2, 3.");  
    // close the file:  
    myFile.close();  
    Serial.println("done.");  
  } else {  
    // if the file didn't open, print an error:  
    Serial.println("error opening test.txt");  
  }  
  
  // re-open the file for reading:  
  myFile = SD.open("test.txt");  
  if (myFile) {  
    Serial.println("test.txt:");  
  
    // read from the file until there's nothing else in it:  
    while (myFile.available()) {  
      Serial.write(myFile.read());  
    }  
    // close the file:  
    myFile.close();  
  } else {  
    // if the file didn't open, print an error:  
    Serial.println("error opening test.txt");  
  }  
}  
  
void loop() {  
  // nothing happens after setup  
}
```

UNIVERSITAS
Miguel Hernández

8.3. Algoritmo de control del depósito de drenaje.

Este algoritmo de control realiza el control de las electroválvulas del depósito de drenaje y recipiente de cultivo.

Como se menciona en la descripción de la Función 4, al tener 2 electroválvulas tendremos cuatro estados:

Estados	EVNA	EVNC	EVNA2	EVNC3
Estado 1	0	0	Abierta	Cerrada
Estado 2	1	0	Cerrada	Cerrada
Estado 3	1	1	Cerrada	Abierta
Estado 4	1	0	Cerrada	Cerrada

Tabla 12: Tabla Estados del Proceso.

En primer habría que comprobar el estado de las electroválvulas, y plasmarlo en la variable que le corresponda. Estos valores se obtienen mediante la comunicación Modbus entre ArduPLC y los Swift.

El comando que se usa para saber los valores de peso (Librería Modbus) sería el de "readInputRegisters(x, x)".

Una vez obtenidos estos valores, y según si el valor está por encima o por debajo de los límites marcados, en nuestro caso "int peso_min = 2000;" que es el peso mínimo de para cierre de la electroválvula normalmente cerrada EVNC, que sería el proceso de llenado y por otro lado "int peso_max = 4000;" que es el peso mínimo apertura de la electroválvula normalmente cerrada EVNC, que es el proceso de vaciado.

El proceso se iniciaría en Estado 1, EVNA activa y la EVNC activa, es decir las electroválvulas estarían abierta y cerrada respectivamente.

La transición al Estado 2 se cumpliría cuando el valor medido con el Swift del depósito de drenaje, sobrepasa el valor máximo del peso fijado, cerrándose la EVNA, para posteriormente abrirse la EVNC, pasando al Estado 3, y comenzando el proceso de vaciado. Nos mantendremos en este estado hasta que el peso del depósito de Drenaje sea inferior al fijado, volviendo a cerrar la EVNC, entonces nos encontramos en el Estado. Finalmente la EVNA se desactiva pasando a su estado inicial, abierta, por tanto nos encontramos otra vez en el Estado 1, la EVNA, abierta y la EVNC cerrada. En este momento se vuelven a consultar el estado de los relés de las EV, pines 7 y 8 de nuestro ArduPLC, comenzando el proceso otra vez.

A continuación se muestra skecth para algoritmo de control de las electroválvulas en depósito de drenaje

```
#include <ModbusMaster.h> /**LIBRERÍA DE ARDUINO PARA COMUNICACION MODBUS**//

ModbusMaster pc, RC, DD; //Definición de los dispositivos a comunicar

int EVNA = 7; // Rele en el pin 7 de la EV RC Entrada NA, Recipiente de Cultivo
int Rele_ventilador = 8; // Rele en el pin 8 Ventilador ON/OFF
int EVNC = 10; // Rele en el pin 10 de la EV DD Salida NC, Deposito de Drenaje
int peso_min = 2000; // Peso minimo apertura EVNC, llenado
int peso_max = 4000; // Peso minimo apertura EVNC, vaciado

int PesoDD // Peso del Deposito de drenaje.
int PesoRC // Peso del recipiente de cultivo.
int PesoDD&RC // Peso minimo apertura EVNC, vaciado

void setup()
{

Serial.begin(19200);

pc.begin(2, Serial);
RC.begin(3, Serial);
DD.begin(4, Serial);

pinMode(EVNC, OUTPUT);
pinMode(Rele_ventilador, OUTPUT);
pinMode(EVNA, OUTPUT);
digitalWrite(EVNC, LOW); //EV DepositoDrenaje
digitalWrite(EVNA, HIGH); //EV RecipienteCultivo
}

void loop()
{
static uint32_t i;
uint8_t j, result;
//uint8_t LecturaRC, LecturaDD;
uint16_t data[6];
i++;

/**F2; Función Lectura Registros_LECTURA PESOS***/
/*Lectura_Peso_Slave 3 (RC) y Slave 4 (DD)*/
//void Lectura Pesos()!!!

/*Lectura Peso_Recipiente de Cultivo(maceta)_Slave 3 (RC) */

RC.clearResponseBuffer();
result=RC.readInputRegisters(12,2);
while (result>0){
result=RC.readInputRegisters(12,2);
}

if (result == RC.ku8MBSuccess){
data[0]=RC.getResponseBuffer(0);
data[1]=RC.getResponseBuffer(1);
Serial.print(RC.getResponseBuffer(0x00)/100.0f);
/*result=RC.getResponseBuffer(0x0D) +
```

```
node.getResponseBuffer(0x0E) << 16)/100.0f);*/

}else{
    data[0]=i;
    data[1]=i;
}

pc.clearTransmitBuffer();
pc.setTransmitBuffer(0,data[0]);
pc.setTransmitBuffer(1,data[1]);
result=pc.writeMultipleRegisters(0,2);
while(result>0){
    result=pc.writeMultipleRegisters(0,2);
}

/*Lectura Peso_Deposito Drenaje_Slave 4 (DD)*/

DD.clearResponseBuffer();
result=DD.readInputRegisters(12,2);
while (result>0){
    result=DD.readInputRegisters(12,2);
}

if (result == DD.ku8MBSuccess){
    data[0]=DD.getResponseBuffer(0);
    data[1]=DD.getResponseBuffer(1);
}else{
    data[0]=i;
    data[1]=i;
}

pc.clearTransmitBuffer();
pc.setTransmitBuffer(0,data[0]);
pc.setTransmitBuffer(1,data[1]);
result=pc.writeMultipleRegisters(2,2);
while(result>0){
    result=pc.writeMultipleRegisters(2,2);
}

/**F4; Funcion Activación VALVULAS MOTORIZADAS***/
/*Activación Coils*/
/*_RELE1_EVNA(llenado)_Slave 3*/

result=pc.writeSingleCoil(1,false); //Activa coil en PC LabVIEW
while(result>0)
{
    result=pc.writeSingleCoil(1,false);
}

result=pc.writeSingleCoil(1,true);
while(result>0)
{
    result=pc.writeSingleCoil(1,true);
}
delay(500);

result=RC.writeSingleCoil(1,false); //Activa coil en Swift RC
while(result>0)
{
```

```
    result=RC.writeSingleCoil(1,false);
  }

  result=RC.writeSingleCoil(1,true);
while(result>0)
{
  result=RC.writeSingleCoil(1,true);
}

/*Activación Coils_RELE2_EVNC(vaciado)_Slave 4*/

result=DD.writeSingleCoil(1,false); //Activa coil en Swift RC
while(result>0)
{
  result=DD.writeSingleCoil(1,false);
}

  result=DD.writeSingleCoil(1,true);
while(result>0)
{
  result=DD.writeSingleCoil(1,true);
}
}

void vaciado (int result)
{
if(result>15000){
digitalWrite(EVNC,HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(EVNA,LOW);
delay(3000);
}
}
```

8.4. Algoritmo de control PID de temperatura del cuadro

Descripción:

Se ejecuta el programa de control del ventilador del cuadro. Si la temperatura es mayor de 55°C se pondrá en marcha, y si es menor de 50°C se desactiva. Como veremos más adelante, la temperatura admitida en el cuadro no debe de exceder los 40 grados. Para ello se utiliza el sensor SD18B20.

En primer lugar se consulta el estado del ventilador, (estado del relé que se encargará de la activación del ventilador a través del ArduPLC).

A continuación se compara el valor de la temperatura obtenida a través del ventilador y se compara con los valores fijados máximo y mínimo de las variables declaradas anteriormente, y según este valor se activará o desactivará el relé relacionado con el ventilador.

A continuación se muestra el sketch de activación del relé que pone en marcha el ventilador:

```
/**ACTIVACION VENTILADOR CUADRO**/  
  
/*Con este código se va a activar el relé relacionado con el ventilador del cuadro en el  
función  
en función de la temperatura que obtengamos con el Sensor SD18B20*/  
  
const int pin=9;  
  
const float Temp_min=50;  
const float Temp_max=55;  
bool state=0; //ventilador activo o inactivo  
  
float GetTemperature()  
{  
  return 20.0 //SUSTITUIR EN FUNCION DEL SENSOR EMPLEADO, SE HIZO LA PRUEBA CON EL  
  SENSOR SD18B20  
  //EN EL ANEXO III SE PUEDE VER EL SKETCH PARA LA ADQUISICION DE TEMPERATURA  
}  
  
void setup()  
{  
  pinMode(pin,OUTPUT); //definir pin como salida  
}  
  
void loop(){  
  
float currentTemperature=GetTemperature();  
if (state==0 && currentTemperature>Temp_max)  
{  
  state=1;  
  digitalWrite(pin,HIGH); // encender ventilador  
}  
  
if (state==1 && currentTemperature<Temp_min)  
{  
  state=0;  
  digitalWrite(pin,LOW); // apagar ventilador  
}  
delay(5000); // esperar 5 segundos entre mediciones  
}
```

8.5. SCADA PC para adquisición de datos.

Daré una breve explicación del programa de trabajo usado como interfaz de usuario, Labview.

Se ha utilizado para la comunicación uno de los ejemplos que trae el programa, para comunicación Modbus (MB Serial example Slave).

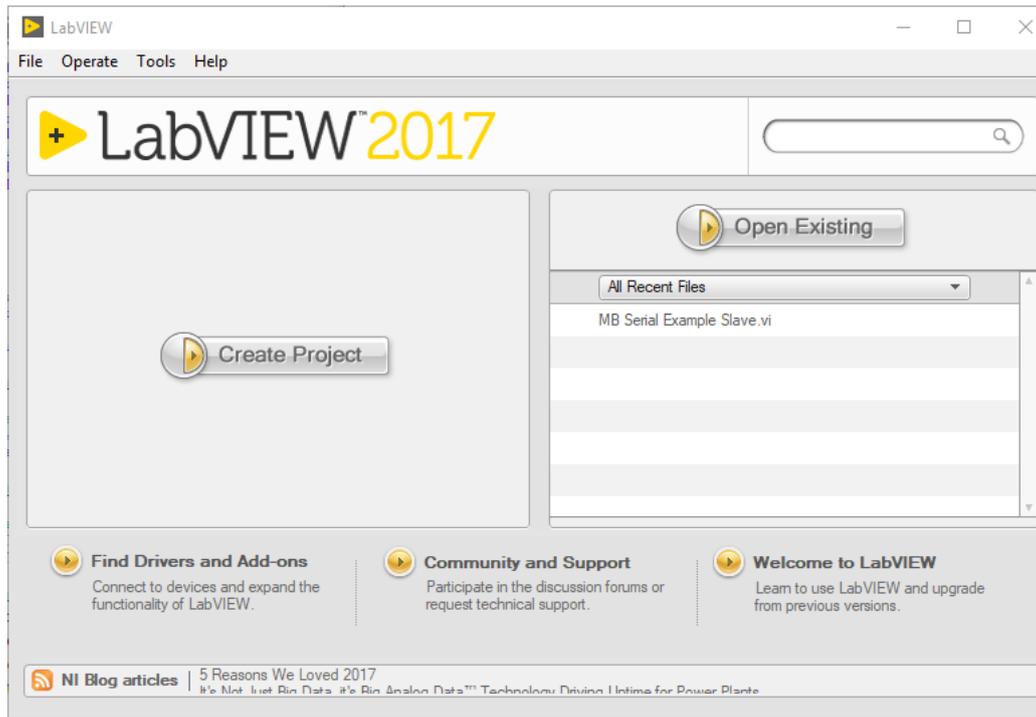


Figura 75: Imagen Programa Labview.

El programa que se muestra a continuación es el MB Serial Example Slave, para comenzar a comunicarse en modo Modbus lo primero que tenemos que hacer es configurar el puerto de comunicación, tanto en el PC como en el programa, lo primero que haremos es configurar la velocidad de comunicación en nuestro caso hemos utilizado 19200 baud, el segundo paso será direccionar el esclavo con el que queremos comunicarnos, en nuestro caso hemos usado tanto el puerto COM1 cuando nos hemos comunicado por el puerto RS232, o el COM6 cuando lo hemos hecho a través del puerto USB.

En el ejemplo que se muestra a continuación se pueden usar cuatro de las funciones principales para comunicación Modbus, "Write Coils", "Holding Registers", "Discrete Inputs", "Input Registers".

Para la lectura de pesos de las células de carga que recibimos a través de los Swift hemos utilizado la función "Read Input Register" cuyo código (0x04) (1 byte). Con esta función lo que hacemos es leer los dos bytes que recibimos de nuestro Swift y se muestran en pantalla.

Específicamente lo que hacemos con la interfaz es ver lo que está ocurriendo en la comunicación "Sniffing".

Con respecto a este punto se lanzó una consulta al suministrado del Software, National Instrument, por si se estaba pasando por alto algo que no permitiera que la comunicación fuera más fluida, y la respuesta fue que efectivamente el software no estaba elaborado para realizar este tipo de tareas de escucha de señales.

Aunque se logró la lectura de los datos que se quieren controlar los tiempos de respuesta son algo elevados.

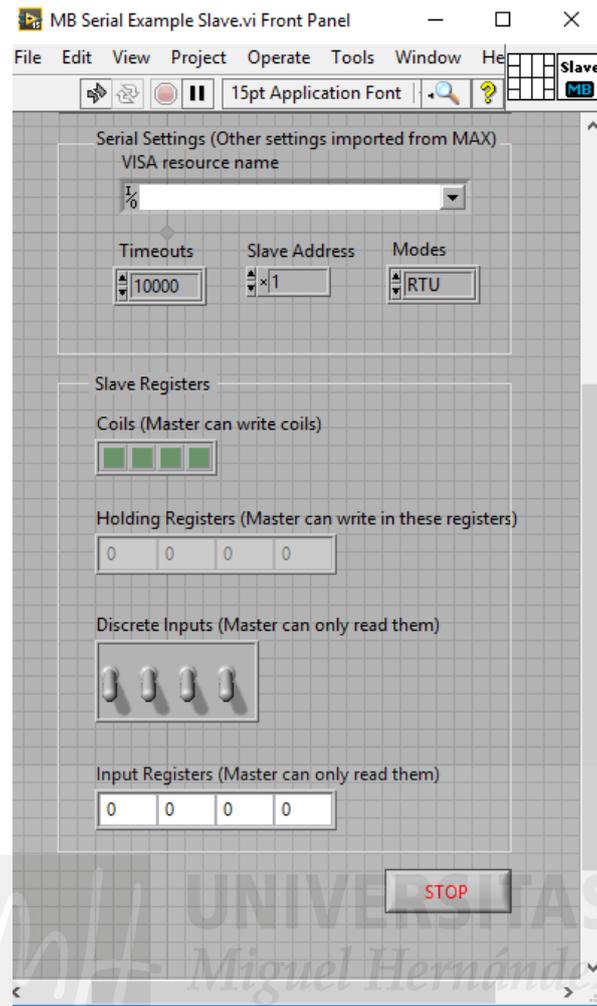


Figura 76: Imagen Interfaz Labview.

9. Diseño y cálculo del cuadro de adquisición de datos y control

Toda instalación eléctrica tiene que estar dotada de una serie de protecciones que la hagan segura, tanto desde el punto de vista de los conductores y los aparatos a ellos conectados, como de las personas que han de trabajar con ella.

Existen muchos tipos de protecciones que pueden hacer a una instalación eléctrica completamente segura ante cualquier contingencia, pero hay tres que deben usarse en todo tipo de instalación (alumbrado, vivienda, de fuerza, redes de distribución, circuitos auxiliares, etc.), ya sea de baja o alta tensión. Estas tres protecciones eléctricas son: protección frente a cortocircuitos, frente a sobrecarga y frente a contacto humano. Para realizar la protección frente a estos 3 efectos, en el caso de nuestro cuadro se van a utilizar 2 clases de dispositivos.

9.1. Consumo energético.

9.1.1. Cálculo de la fuente de alimentación para la instrumentación.

En la parte de la instrumentación tenemos los 2 SWIFT y el ArduPLC, a los que vamos a alimentar a 24 VDC. Las células de carga no se consideran a la hora de computar los consumos energéticos, puesto que estas son alimentadas directamente desde las salidas de los SWIFT.

Como se ha visto en la tabla de especificaciones del SWIFT, su consumo es:

$$P_{swift} = 4 W$$

Mientras que para el ArduPLC según su manual, y sus características su intensidad de consumo es de 80mA, para una potencia de máxima de 1,92W.

Por lo tanto, su potencia consumida se calcula mediante la corriente consumida y la tensión de salida de la fuente:

$$P_{ArduPLC} = I_{ArduPLC} \times V_{out} = 0.08 \times 24 = 1.92W$$

De este modo, la potencia máxima total demandada es de:

$$P_{T \text{ max demandada}} = (2 \times P_{swift}) + P_{ArduPLC} = (2 \times 4) + 1.92 = 9.92W$$

9.1.2. Requisitos de la fuente de alimentación

Además de las tensiones de entrada y de salida de las fuentes hay una serie de requisitos que se presentan como indispensables:

- **Tamaño compacto**

Se hace necesario que todos y cada uno de los dispositivos sean lo más pequeños posibles con el fin de minimizar el tamaño del armario. Como se ha visto tenemos una gran cantidad de aparatos que montar en el cuadro, y el espacio en el armario no abunda. Puesto que es necesario montar dos fuentes de alimentación, se vuelve indispensable que estas sean lo más pequeñas posibles. Además, como es natural el precio del cuadro se reduce cuanto más pequeño es, por lo que podremos fijar un precio de venta más competitivo.

- **Amplio rango de temperaturas de funcionamiento**

Las fuentes de alimentación se barajan como una de las piezas clave del cuadro, en tanto en que son las encargadas de alimentar todo el sistema, y la mas mínima caída de las mismas puede provocar un mal funcionamiento de cualquiera de los dispositivos.

En este caso el cuadro se va a montar en un sótano, en un ambiente donde se pueden alcanzar temperaturas extremas: altas temperatura en verano y posibilidad de temperaturas bajo cero en invierno. Debido a estas temperaturas tan extremas, necesitamos que las fuentes tenga un amplio margen de temperaturas de funcionamiento.

La mayoría de las fuentes de alimentación tienen un rango de temperaturas dentro del cual su funcionamiento es normal. A partir de una determinada temperatura sufren lo que se conoce como un de rating, una pérdida de potencia que se hace mayor cuanto mayor es la temperatura, hasta alcanzar una temperatura máxima limite a partir de la cual la fuente cae, auto-protegiéndose y protegiendo los sistemas que dependan de ella.

- **Regulación de tensión de salida**

Aunque los dispositivos que se van a conectar funcionan todos a 24 VDC, interesa que la fuente tenga un pequeño margen de regulación que permita ajustar la tensión mínimamente para adaptarse a la demanda.

- **Placas barnizadas**

De nuevo tenemos que hacer mención de las duras condiciones que nos encontramos en el medio agrícola. El alto grado de humedad producido por el sistema de riego, así como la gran concentración del polvo y suciedad pueden suponer un gran problema para la electrónica de cualquier equipo, y sobre todo para los circuitos electrónicos de potencia contenidos en las fuentes. Por ello es importante que la fuente posea una placa barnizada, que evite el rápido deterioro de la fuente, lo que supondría un gran coste de mantenimiento.

9.1.3. Selección de la fuente de alimentación

Después de realizar el estudio de los requisitos necesarios para las fuentes, se ha decidido utilizar el modelo S8VK-S de la casa OMRON, que permite su montaje en carril DIN. Como se ha comentado, la entrada de la fuente debe ser a 230 VAC, y la salida a 24 VDC. En la siguiente tabla se muestran los modelos disponibles para dichas tensiones.

Rangos Potencia	Voltaje Entrada	Voltaje de Salida	Corriente Salida	Corriente máxima	Dimensiones (WxHxD)mm	Código Referencia
30W	100 a 240 VAC (rango permitido 85 a 264VAC o 90 a 350VDC)	24V	1,3 A	1,56 A	32X90X90	S8VK-S03024
60W	"	24V	2,5 A	3A	32X90X90	S8VK-S06024
120W	"	24V	5A	6A	55X90X90	S8VK-S12024
240W	"	24V	10A	15 A	38X124X122	S8VK-S24024
480W	"	24V	20A	30 A	60X124X122	S8VK-S48024

Tabla 13: Modelos disponibles de la fuente S8VK-S de Omron

Las potencias máximas necesarias que se han calculado para cada fuente han sido de 11'54 W /electroválvulas y ventilador) y 9'92 W, para instrumentación. Aunque se podría utilizar una FA de 30W se va a mantener la de potencia de 60 W para ambas fuentes, para tener un margen de operación adecuado y previendo alguna futura ampliación en el cuadro. En la siguiente tabla se muestran las principales especificaciones técnicas de la fuente S8VK-S06024, que es el modelo en cuestión:

Características	Descripción
Rango de entrada	100-240 AC Monofásica
Frecuencia de entrada	50/60Hz (47 a 450Hz)
Tensión de salida	24VDC
Corriente de salida	2,5A (3A máx.)
Eficiencia	89%(entrada a 230V AC)
Ajuste de salida	21,6-28 VDC
Variación de salida	0,5% Con la entrada 1,5% con la carga
Influencia de temperatura	0,05%/°C máx.
Protecciones	Sobrecarga, sobretensión (130%)
Rango de Temperaturas	de menos 40 a 70 grados centígrados
Grado de Protección	IP20
Montaje	Carril DIN
Medidas	32x90x90mm
Peso	250gr
Coste	32,813

Tabla 14: Características de la fuente S8VK-S06024

La elección de este modelo se ha llevado a cabo por los siguientes motivos:

- Incorpora un recubrimiento de protección en la placa, que protege contra el polvo, los gases corrosivos y la humedad. Esto hace que la fuente tenga una mayor durabilidad, sobre todo en ambientes de gran humedad como los campos de riego donde se instalan los lisímetros.
- Posee una amplia gama de temperaturas de funcionamiento (-40 a 70°C) gracias a su gestión óptima del flujo de temperatura. Esto permite su instalación en entornos con temperaturas extremas, ya sean muy altas o muy bajas. En nuestro caso interesa que su funcionamiento se vea inalterado a altas temperaturas, como se ha comentado. Por otro lado el aumento de temperatura solo provoca una variación en su salida del 0'05% como máximo, lo que asegura un correcto funcionamiento sin pérdida de potencia incluso con las temperaturas más altas.
- También tiene un tamaño muy compacto, posiblemente el más pequeño del mercado. Además permite el montaje adosado de varias fuentes, con temperaturas de hasta 55 grados. Todo esto es de gran utilidad para reducir el tamaño de nuestro cuadro, pudiendo escoger un armario más pequeño y económico.
- Ofrece un gran ajuste de la tensión de salida desde 21'6 a 28 VDC, lo que permite adaptarnos a las necesidades que se presenten en la aplicación.

Además presenta otra serie de características que la hacen idónea para nuestra aplicación:

- Posee un sistema de conexión push-in, que permite reducir el tiempo de cableado, ya que solo se necesita presionar a mano para conectar los cables,

y aun así el cable queda mejor fijado que con un terminal de tornillo convencional.

- Tiene una alta eficiencia de hasta el 89%, debido a sus bajas pérdidas por conmutación y generación de calor de los componentes, como transformadores y diodos. De este modo se consigue un ahorro energético considerable, proporcionando la corriente y tensión adecuadas para un correcto funcionamiento del datalogger y los indicadores.



Figura 77: Aspecto de la fuente S8VK-S06024

9.1.4. Conexión de la fuente de alimentación

En el siguiente esquema se aprecia la circuitería interna de la fuente de alimentación, así como las conexiones de entrada y de salida disponibles.

Cabe resaltar los terminales múltiples que posee para cada uno de los polos de entrada y de salida.

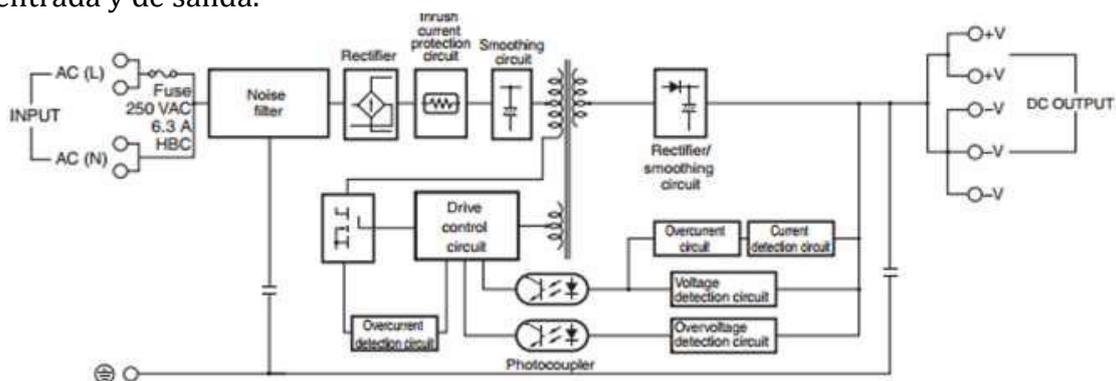


Figura 78: Esquema eléctrico de la fuente de alimentación S8VK-S06024

Las secciones de cable recomendadas para la conexión a la fuente son de entre 0'34 y 2'5 mm². Por otro lado, es imprescindible la conexión a tierra de la fuente, sobre todo teniendo en cuenta la sensibilidad de los instrumentos con los que estamos trabajando.

9.2. Circuitos eléctricos y protecciones.

9.2.1. Interruptores magnetotérmicos

9.2.1.1. Protecciones interruptores magnetotérmicos

- **Protección frente a sobrecargas**

Se denomina cortocircuito a la unión de dos conductores o partes de un circuito eléctrico, con una diferencia de potencial o tensión entre sí, y sin ninguna impedancia eléctrica entre ellos.

Según la Ley de Ohm, al ser la impedancia igual a cero, este efecto provoca que la intensidad tienda a infinito, con lo cual peligra la integridad de conductores y maquinas debido al calor por efecto Joule generado por dicha intensidad. En la práctica, la intensidad producida por un cortocircuito siempre queda amortiguada por la resistencia de los propios conductores que, aunque muy pequeña, nunca es cero.

$$I = \frac{V}{Z}; \text{ si } Z \text{ es cero} \rightarrow I = \infty$$

Según los reglamentos electrotécnicos, "en el origen de todo circuito deberá colocarse un dispositivo de protección, de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que pueda presentarse en la instalación". No obstante se admite una protección general contra cortocircuitos para varios circuitos derivados.

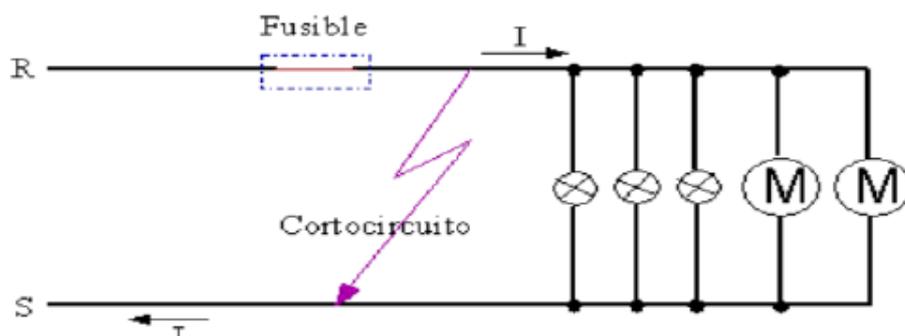


Figura 79: Representación gráfica de un cortocircuito

Los dispositivos más empleados para la protección contra cortocircuitos son:

- Fusibles calibrados.
- Interruptores automáticos magnetotermicos

En nuestro caso nos vamos a centrar en el uso de los interruptores magnetotermicos por sus numerosas ventajas frente a los fusibles.

- **Protección frente a sobrecargas**

Entendemos por sobrecarga al exceso de intensidad en un circuito debido a un defecto de aislamiento, o bien a una avería o demanda excesiva de carga de la maquina conectada a un motor eléctrico.

Las sobrecargas deben de protegerse, ya que pueden dar lugar a la destrucción total de los aislamientos de una red o de un motor conectado a ella. Una sobrecarga no protegida degenera siempre en un cortocircuito.

Según el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) "Si el conductor neutro tiene la misma sección que las fases, la protección contra sobrecargas se hará con un dispositivo que proteja solamente las fases, por el contrario si la sección del conductor neutro es inferior a la de las fases, el dispositivo de protección habrá de controlar también la corriente del neutro".

Además debe de colocarse una protección para cada circuito derivado de otro principal.

Los dispositivos más empleados para la protección contra sobrecargas son:

- Fusibles
- Interruptores automáticos magnetotermicos (PIA)
- Relés térmicos

Para los circuitos domésticos, de alumbrado y para pequeños motores se suelen emplear los dos primeros, al igual que para los cortocircuitos, siempre y cuando se utilice el tipo y la calibración apropiada al circuito a proteger. Por el contrario para los motores trifásicos se suelen emplear los llamados relés térmicos.

9.2.1.2. Funcionamiento de un magnetotérmico.

Estos dispositivos, conocidos abreviadamente por PIA (Pequeño Interruptor Automático), se emplean para la protección de los circuitos eléctricos, contra cortocircuitos y sobrecargas, en sustitución de los fusibles, ya que tienen la ventaja de que no hay que reponerlos; cuando se desconectan debido a una sobrecarga o un cortocircuito, se rearman de nuevo y siguen funcionando.

Según el número de polos, se clasifican estos en: unipolares, bipolares, tripolares y tetrapolares. Estos últimos se utilizan para redes trifásicas con neutro.

En la Figura 89, se observa la parte correspondiente a una fase de uno de estos interruptores, dibujado en sección, donde se ven mejor sus principales órganos internos.

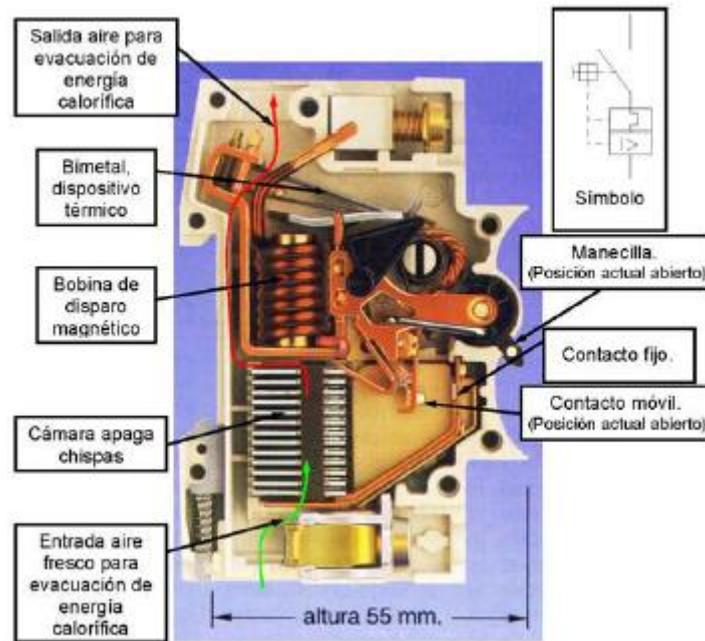


Figura 80: Partes de un magnetotérmico

Los magnetotérmicos constan de un disparador o desconectador magnético, formado por una bobina que actúa sobre un contacto móvil cuando la intensidad que la atraviesa supera su valor nominal (I_n). Este es el elemento que protege la instalación contra cortocircuitos, por ser muy rápido su funcionamiento, y cada vez que desconecta por este motivo debe de rearmarse, bien sea manual o eléctricamente. Cuando se realiza el rearme de forma manual, si el defecto que produjo el disparo no hubiese desaparecido el interruptor seguirá desconectándose una y otra vez, lo que es conocido como funcionamiento de “libre mecanismo”.

También poseen un desconectador térmico formado por una lámina bimetálica, que se dobla al ser calentada por un exceso de intensidad y, aunque más lentamente que el dispositivo anterior, desconecta el contacto inferior. Esta es la protección contra sobrecargas y su velocidad de desconexión es inversamente proporcional a la sobrecarga.

Cuando la desconexión es por efecto de una sobrecarga debe de esperarse a que enfríe la lámina y cierre su contacto, para que la corriente pase de nuevo a los circuitos protegidos.

Los interruptores automáticos magnetotérmicos se emplean tanto en vivienda como en el sector industrial, y suelen fabricarse para intensidades de entre 5 y 125 amperios, de forma modular y calibración fija, sin posibilidad de regulación. Para intensidades mayores, en instalaciones industriales de hasta 1.000 A o más, suelen estar provistos de una regulación externa, para la protección contra cortocircuitos. Existen varios tipos de interruptores automáticos magnetotérmicos, definidos por sus características de desconexión tiempo-intensidad. Los tipos que hay actualmente en el mercado son muchos, por lo que nos vamos a centrar en los más utilizados comúnmente, los regulados por la normativa europea EN 60.898 y EN

60.947. Dentro de dichas normativas se establecen diferentes clases (o curvas de disparo), en función de los rangos de intensidad nominal (I_n) dentro de los cuales se produce la desconexión en un tiempo máximo de 0'1 segundos. En la Tabla a continuación se muestran las curvas disponibles en el mercado.

9.2.1.3. Cálculo de los magnetotérmicos empleados

Curva Tipo	Disparo Magnetotérmico	Disparo Térmico	Aplicaciones
B	Entre 3 y 5 I_n	Entre 1,13 y 1,45 I_n	Protección Cables y Circuitos
C	Entre 5 y 10 I_n	Entre 1,13 y 1,45 I_n	Instalaciones Industriales para aplicaciones generales: circuitos mixtos
D	Entre 10 y 20 I_n	Entre 1,13 y 1,45 I_n	Carga con intensidad elevada durante el arranque y transformadores
ICP	Entre 5 y 8 I_n	Entre 1,13 y 1,45 I_n	Interruptores de control de potencia
Z	Entre 2 y 3,6 I_n	Entre 1,13 y 1,45 I_n	Circuitos electrónicos de medida

Tabla 15: Tipo de curvas de disparo de un magnetotérmico y sus aplicaciones

Nos basamos en la norma internacional de referencia para el estudio del cableado y el cálculo de las protecciones eléctricas, IEC 60364-5-52: "Instalación eléctrica de edificios - Parte 5-52:

Elección e instalación de materiales eléctricos - Sistema de cableado".

Se debe tener en cuenta que es necesaria la colocación de un dispositivo de protección en el origen de cada circuito o donde se produzca una reducción de la máxima corriente requerida, es decir, en cada conexión o ramificación de la instalación eléctrica. Por lo tanto en nuestro caso se ha decidido instalar un interruptor magneto térmico en cabecera junto a un diferencial, más otros 3 interruptores magnetotérmicos, uno por cada ramificación: uno para la rama de la bomba de achique del recinto de drenaje que en nuestro caso no será aplicables, para este tipo de lisímetro, pero sin embargo será necesario para el LP2, otro para una base schuko para la conexión de dispositivos externos, y un último para las dos fuentes de alimentación. Por último, indicar que al tratarse de una red monofásica, todas las protecciones serán de 2 polos: fase más neutra.

- **Magnetotérmico para las fuentes de alimentación**

No es necesario considerar los consumos de los dispositivos aguas abajo de las fuentes, pues todos son alimentados mediante dichas fuentes.

En un punto anterior se han calculado las fuentes de alimentación necesarias para el suministro de energía al ArduPLC y a los indicadores.

Componente	Cantidad	Alimentación	Consumo(W)	Int. Max (A)	Int. Total (A)
F.A S8VK-S06024	2 Uds.	230V	68	0,66	1,32

Tabla 16: Consumo de las fuentes de alimentación utilizadas

Como vemos la intensidad máxima en esa rama será de 1'32 A. Por lo tanto, seleccionamos un interruptor magnetotermicos de 10 A, que es el calibre habitual más pequeño, cumpliendo sobradamente con los requisitos de consumo de las fuentes. Existen magnetotermicos de menor intensidad, como por ejemplo de 6 y 4 A, sin embargo se han estandarizado el uso de los inmediatamente superiores, por lo que sus costes comerciales son menores que los de 6 y 4 A. Por ello, tomamos esta decisión, además de por la posibilidad que nos ofrece de una futura ampliación sin necesidad de cambiar las protecciones.

Como norma general, y según el REBT, se especifica el uso de secciones de cable en función del interruptor magnetotérmico utilizado. En la siguiente tabla se muestran las secciones recomendadas según el calibre del interruptor utilizado, independientemente del no de polos.

Intensidad Magnetotérmico	Sección de cable recomendada
10A	1,5 mm ²
16A	2,5 mm ²
20A	4 mm ²
25A	6 mm ²

Tabla 17: Secciones según Interruptor utilizado.

Por lo tanto, el cable de conexión entre el magnetotérmico y las fuentes será de 1'5 mm².

Ahora que tenemos todos los datos podemos calcular la caída de tensión en los cables, producida por efecto Joule. Para ello utilizamos la expresión para líneas monofásicas:

$$\Delta V = \frac{2 \times p \times L \times I}{S}$$

Dónde:

p: Resistividad del cobre = 0'0179 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

L: longitud del cable en metros

S: sección del cable m²

I: intensidad en Amperios

Podemos calcular la caída de tensión por metro de cable:

$$\Delta V = \frac{2 \times 0.0179 \times 1.32}{1.5} = 0.035\text{V/m}$$

Las fuentes de alimentación están previstas montarlas en la parte superior del cuadro, por temas de disipación, en el mismo carril DIN de los elementos de protección. Por tanto, la longitud del cable desde el magneto térmico a las fuentes es mínima. Cogemos un dato aproximado de 300mm. Así la caída de tensión en dichos conductores seria de:

$$\Delta V = \frac{2 \times 0.0179 \times 0.3 \times 1.32}{1.5} = 9.45mV$$

Calculamos a continuación las pérdidas de potencia en dicha línea:

$$P \Delta V = \Delta V \times I = 9.45mV \times 1.32 = 12.5mW$$

- **Magnetotérmico para la base Schuko**

Procedemos de igual forma para el cálculo de su protección magnetotérmica.

La idea es montar una base Schuko en el exterior del cuadro, por lo tanto debe de ser empotrable (también denominado “trascuadro”) y tener un grado de protección adecuado.

Así, se decide que debe poseer una IP66 o 67 al menos. Este tipo de bases nos permiten conectar dispositivos externos, como por ejemplo ordenadores, lo que viene muy bien cuando hay que realizar tareas de puesta en marcha o mantenimiento.

La base posee 2 polos más una conexión de tierra. El amperaje soportado no tiene por que ser muy alto, puesto que el consumo de un ordenador ronda 1’5 A. Sin embargo las bases industriales de este tipo que se venden están estandarizadas y suelen ser de 16 A.

Realizamos una batida para escoger un modelo adecuado para nuestro montaje, llegando a 2 posibilidades:

a) Base de la casa Famatel con referencia 13950 con un precio muy económico (10’95 €), pero que no ofrece una protección muy alta con su IP44.

IP44 
Toma de corriente 16A 2P+TTL IP44
Socket 16A 2P+TTL IP44



Ref. Item	Polos/ Poles	I (A)	Tensión/ Voltage (V)	Embalaje/ Pack Carton	Barcode
13950	2P+TTL	16	220-240	30/180	8 429760 441267

Figura 81: Características de la base Famatel 13950

b) Base de la casa Temper con referencia 10808, con un grado de protección IP68, que cumple sobradamente con nuestro requisito. Tiene un precio de 20,11 €.



Bases SCHUKO. 16 A / 230 V.						
Artículo	Código	EAN 13	Descripción	Grado de protección	Color	Emb.
11031	0553005	4015394229407	Base empotrable, con tapa y bornas de tornillo	IP 54	Azul	20
11030	0553100	4015394184614	Base empotrable con tapa y bornas de tornillo	IP 54	Gris	100
10808	0553025	4015394035398	Base empotrable con tapa y bornas de tornillo	IP 68	Azul	10
10062	0553112	4015394188117	Base mural	IP 44	Azul	10
10863	0553002	4015394035701	Base mural	IP 68	Azul	10

Figura 82: Características de la base Temper 10808

Finalmente nos decantamos por escoger la base de Temper, que posee un grado de protección IP más adecuado para nuestra aplicación, a pesar de su mayor coste. Como se observa se trata de una base Schuko de 2 polos, más toma de tierra, con un amperaje máximo de 16 A (como comentábamos), y una tensión nominal de 230 VAC.

Volviendo al cálculo de su magneto térmico, vamos a tener en cuenta que los aparatos a conectar en dicha base no tendrán un consumo muy alto, posiblemente no mayor de 1'5-2 A, que es el consumo típico de un PC. Por lo tanto nos sirve de nuevo un magneto térmico de 2 polos y 10A, a pesar de que la base soporte 16A.

Esta decisión se ha tomado teniendo en mente dos premisas: 1) En base a la experiencia sabemos que no se conectarán equipos con consumos mayores a los 2 A; y 2) En el caso de conectar equipos de mayor consumo, sobreproteger el cuadro eléctrico con un magneto térmico de inferior amperaje a los 16 A de la base, produciendo un disparo del mismo y evitando así una posible sobrecarga.

Por otro lado, la sección de cable a utilizar entre magneto térmica y base va a ser también de 1'5 mm², según la Tabla 17.

Procedemos a realizar el cálculo de la caída de tensión por metro de conductor, tomando un consumo habitual de un PC de 1'5 A:

$$\Delta V/L = \frac{2 \times 0.0179 \times 1.5}{1.5} = 0.0358V/m$$

En este caso la base se montara en lateral del cuadro, y la distancia aproximada desde la base al magneto térmico se calcula que será aproximadamente de 800-1000 mm.

Por lo tanto la caída de tensión producida por los cables será:

$$\Delta V/L = \frac{2 \times 0.0179 \times 1 \times 1.5}{1.5} = 0.0358V$$

Calculamos a continuación las pérdidas de potencia en dicha línea:

$$P \Delta V = \Delta V \times I = 0.0358 \times 1.5 = 0.0537W$$

- **Interruptor automático general**

Ahora que conocemos el consumo de todos los dispositivos protegidos y, por ende, el calibre de los magnetotermicos, procedemos a realizar el cálculo del interruptor magneto térmico de cabecera, así como la sección necesaria para conectarlo al resto de magnetotermicos. En realidad el interruptor general se va conectar aguas abajo al interruptor diferencial, que calcularemos posteriormente, mediante unos peines de conexión estandarizados.

A la salida del diferencial cuelgan los otros 3 magnetotermicos calculados anteriormente. Estos se conectan igualmente mediante otro peine de conexión. A pesar de ello vamos a realizar el cálculo de los cables y de las caídas de tensión generadas.

Teniendo en cuenta las intensidades máximas que van a circular por las 3 ramas aguas abajo, obtenemos la intensidad total a la que será sometido el interruptor general.

$$I_{total} = I_{fentes} + I_{schuco} + I_{bomba} = 1.32 + 1.5 + 0.87 = 3.69A$$

En esta ocasión, se opta por montar un magneto térmico de 16A, puesto que aunque la intensidad total no supera los 10 A, es preferible coger un calibre mayor por 3 motivos:

1. Los magnetotermicos de nivel superior suelen ser, al menos, de un calibre mayor al más grande de los inferiores.
2. Preparar el cuadro para posibles ampliaciones futuras.
3. En previsión de un aumento repentino del consumo por cualquier motivo.

Por lo tanto, y según la Tabla17, la sección de los cables debería de ser de 2'5 mm² (aunque ya sabemos que se utilizaran peines de conexión).

Procedemos a realizar el cálculo de la caída de tensión por metro de conductor:

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{2 \times 0.0179 \times 3.69}{2.5} = 0.0528V/m$$

Puesto que el térmico y el resto de elementos de protección están situados al lado, la distancia aproximada del cable entre ellos será aproximadamente de 100-200 mm.

Por lo tanto la caída de tensión producida por los cables será:

$$\Delta V = \frac{2 \times 0.0179 \times 0.2 \times 3.69}{2.5} = 0.0105V$$

Calculamos a continuación las pérdidas de potencia en dicha línea:

$$P \Delta V = \Delta V \times I = 0.0105 \times 3.69 = 0.039W$$

9.2.2. Interruptores Diferenciales

Son interruptores automáticos que evitan el paso de corriente de intensidad peligrosa por el cuerpo humano. La peligrosidad de los efectos que se pueden producir depende de la intensidad de la corriente y de su duración, tal como se determina en el gráfico de la Figura 92.

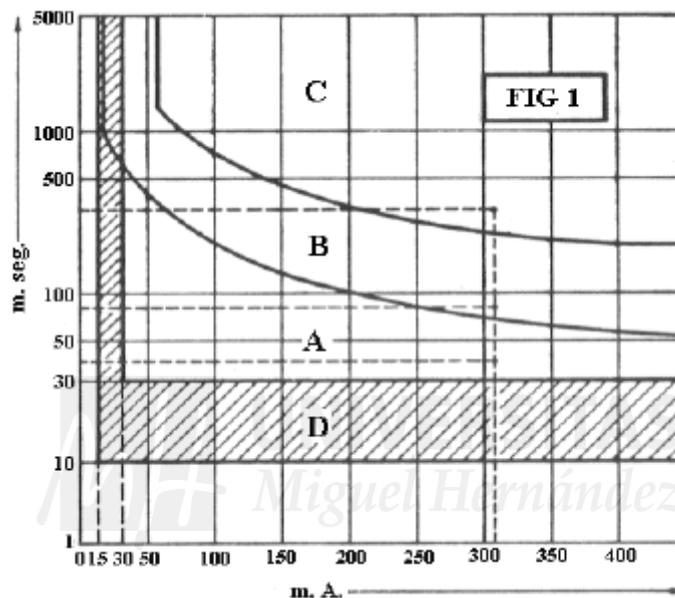


Figura 83: Efectos de la corriente eléctrica en el ser humano en función de la intensidad y el tiempo

9.2.2.1. Protecciones de los interruptores diferenciales

- **Protección frente a contacto indirecto**

En dicho gráfico, si fijamos una intensidad circulante en mA, y un tiempo de duración en ms, se nos determina un punto. Si este punto se halla en la zona A, los efectos que se producirán serán inofensivos para personas normales. Si se halla en la zona B, ocasionara molestias que pueden ser peligrosas, y si se halla en la zona C podrá resultar mortal, ya que puede ocasionar inconsciencia o fibrilación ventricular.

Por ejemplo, vemos en el grafico que una intensidad de 310 mA, según actué durante 40, 80 o 400 ms está situada en la zona A, B o C.

La intensidad circulante por el cuerpo humano viene limitada por una parte, por la resistencia propia del cuerpo (unos 550 ohmios como mínimo) y por otra, por la

resistencia del contacto con las zonas en tensión. Para el caso más desfavorable de resistencia del cuerpo y suponiendo un contacto perfecto, la intensidad circulante será máxima.

$$I = \frac{V}{Z} = V/550(A)$$

En el supuesto de una tensión de 230 VAC, que es la tensión normalizada en viviendas, la intensidad alcanzara un valor de unos 420 mA. Si trasladamos esta intensidad al gráfico, veremos que para que no se produzcan más efectos que los inofensivos de la zona A, debe ser cortado en un tiempo máximo de 60 ms.

Esta desconexión la garantizan los interruptores diferenciales, ya que su curva característica, señalada con D en la Figura 92, delimita debajo de ella un campo de trabajo donde no se desconecta por hallarse en la zona de seguridad A. No obstante, cuando los valores intensidad tiempo tiendan a crecer, alcanzando las zonas peligrosas B o C, deben cruzar la banda de desconexión D y en este instante el interruptor se abrirá.

9.2.2.2. Funcionamiento de un interruptor diferencial

Los diferenciales se basan en una característica de los circuitos bifásicos o trifásicos, en los que la suma de las intensidades debe ser cero cuando no existen fugas. Cuando por algún motivo la suma de intensidades no es cero, en la bobina auxiliar aparece una tensión que aplicada a una pequeña bobina, acciona un pivote que a su vez acciona el dispositivo mecánico que abre los contactos principales del circuito. Según sea el valor de la intensidad de desequilibrio que acciona el diferencial, así se definirá su sensibilidad.

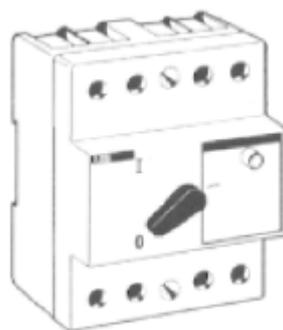


Figura 84: Aspecto de un interruptor diferencial

Normalmente se fabrican de dos sensibilidades, 30 y 300 mA, aunque también los hay de 500mA. Referente al dispositivo de disparo automático es del tipo llamado de "libre mecanismo", es decir, que aun reteniendo el correspondiente mando en la

posición de circuito cerrado, este se abre si aparece el defecto correspondiente, tal y como explicábamos en los interruptores magnetotermicos. La intensidad nominal que puede controlar un diferencial, depende de las dimensiones de los contactos principales, y se fabrican con intensidades comprendidas entre 25 y 63 A.

Los modelos más comunes de diferenciales son los de dos polos, para suministros bifásicos; y los de cuatro polos, para los suministros trifásicos con neutro.

Según la norma VDE-0100, los diferenciales deben de disponer de un botón de prueba mediante el cual se provoca una fuga igual a la sensibilidad del aparato y por tanto su desconexión inmediata. La finalidad de este pulsador es la de permitir al usuario comprobar periódicamente el correcto funcionamiento del interruptor diferencial.

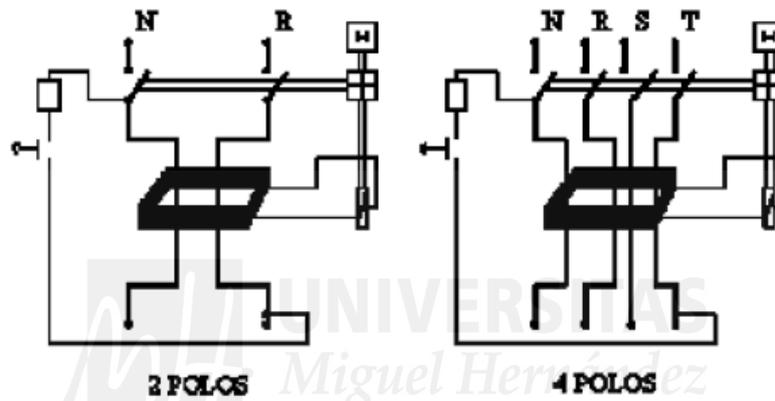


Figura 85: Esquema de funcionamiento de un diferencial

Para intensidades superiores a los 63 A los diferenciales suelen utilizarse de forma indirecta, es decir, la señal diferencial obtenida de un toroidal es utilizada para accionar un contacto conmutado conocido como relé diferencial, que es el encargado de accionar la bobina de emisión o la de mínima tensión del magnetotérmico de línea.

La mayoría de estos dispositivos permiten la regulación de la sensibilidad y el tiempo de retardo de desconexión del diferencial.

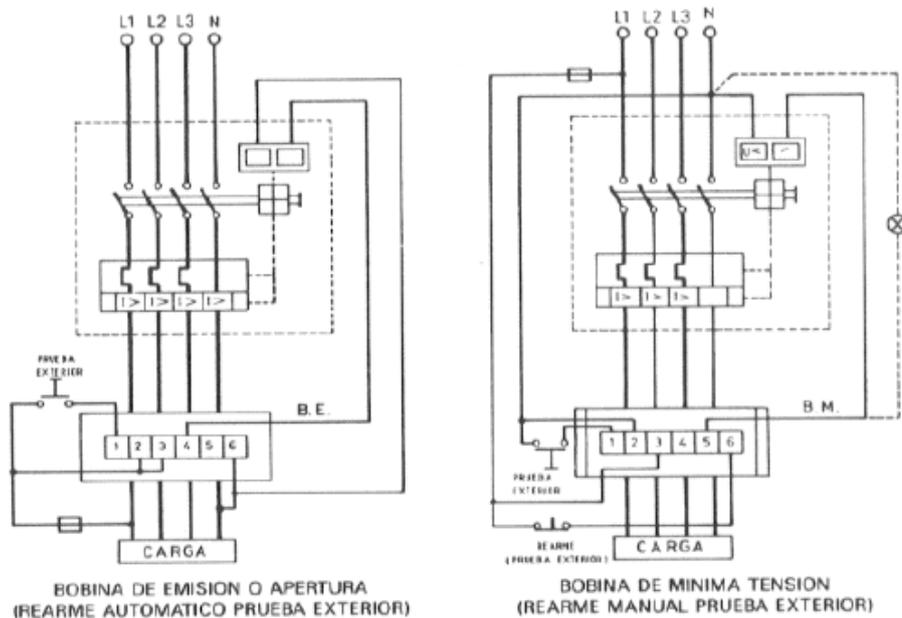


Figura 86: Esquemas de interruptor diferencial controlado con toroidal, relé diferencial y bobina de disparo

9.2.2.3. Cálculo del diferencial empleado

La elección del interruptor diferencial viene dada por el calibre del interruptor general calculado anteriormente. La intensidad nominal del diferencial debe de ser igual o superior a la del magnetotérmico. Por tanto, como el interruptor general es de 16 A, vamos a escoger el diferencial inmediatamente superior disponible comercialmente, que es de 25 A.

Al igual que el resto de protecciones, al tratarse de una red monofásica, el diferencial será de 2 polos.

Las sensibilidades típicas son 30 y 300 mA. En este caso decidimos escoger una sensibilidad de 30 mA, lo que lo hace más susceptible a las pequeñas variaciones de carga. Así nos aseguramos una mayor protección frente a un posible contacto indirecto, lo que en un momento determinado nos puede evitar sufrir una descarga durante la manipulación del cuadro por tareas de mantenimiento o puesta en marcha.

Es posible que durante el proceso de comparación entre marcas optemos por el modelo de intensidad superior (40 A), ya que suelen tener un precio similar.

9.2.3. Selección de Protecciones

A continuación se procede a realizar un estudio de los modelos de protecciones ofrecidos por algunas marcas, que cumplan con los requisitos indicados en los anteriores puntos.

Antes de nada, especificar que los dispositivos utilizados no tienen por qué ser accesorias, puesto que no necesitamos conectarles ninguna cámara auxiliar con contactos NC o NA. En esta aplicación no son necesarios, por lo que nos vamos a las series más económicas de cada marca, que no contemplan estas opciones.

Las marcas elegidas para realizar el estudio son Hager y Schneider Electric, dos de las principales casas en lo que a aparatación eléctrica se refiere.

9.2.3.1. Comparativa de interruptores magnetotérmicos

En primer lugar comentar que la curva elegida para los magnetotermicos es de tipo C, adecuada para instalaciones industriales, aplicaciones generales y circuitos mixtos.

Por otro lado indicar que comercialmente existen dos modelos similares, pero no idénticos, en magnetotermicos de 2 polos. La alternativa al de 2 polos, es un térmico de 1 polo + neutro. El interruptor de 2P mide la corriente que circula por ambos conductores, y al exceder la corriente el nivel de diseño del interruptor este se dispara. El de 1P+N solo mide la corriente de la fase, y solo abre la línea de neutro cuando hay una corriente excesiva en la fase, abriendo tanto la fase como el neutro. Al final, su funcionamiento es similar y ambos están disponibles en curva C, pero el de 1P+N suele ser sustancialmente más económico. Por ello vamos a optar por el uso de magnetotermicos de 1P+N.

Las gamas comparadas son las familias económicas de las marcas indicadas: A9N de Schneider y MUN de Hager. En la siguiente tabla se muestran sus principales características.

Características/Modelo	Hager		Schneider	
	MUN510	MUN516	A9N21644	A9N21645
Intensidad Nominal	10A	16A	10A	10A
Nº Polos	1+N	1+N	1+N	1+N
Curva	C	C	C	C
Poder de corte	6 KA	6 KA	6 KA	6 KA
Cable max. Admitido	10mm ²	10mm ²	10mm ²	10mm ²
Ancho(mm)	35	35	35	35
PVP(euros)	21,98	22,39	47,51	48,4
Descuento	74%	74%	78%	78%
Coste	5,71	5,82	10,45	10,65

Tabla 18: Tabla comparativa de magnetotérmicos

Como podemos comprobar en la tabla todas las características técnicas son similares, por lo que el único criterio que podemos seguir a la hora de la selección del material es el coste de adquisición, que es mucho menor en el caso de los magnetotermicos de Hager.

Por ello, escogemos los modelos MUN510 y MUN516 para la protección magnetotérmica.



Figura 87: Interruptor magneto térmico MUN510 de Hager

9.2.3.2. Comparativa de interruptores diferenciales

Vamos a proceder del mismo modo para la selección de los interruptores diferenciales. En el caso de los interruptores diferenciales, los únicos modelos disponibles son de 2 polos y 4 polos. Del mismo modo que los magnetotermicos, el interruptor diferencial no tiene por que montarse con ninguna cámara auxiliar, ni realizar un bloque magneto-diferencial, por lo que nos centramos en las gamas económicas de ambas marcas, que no permiten los accesorios.

Los modelos escogidos son los CDC de Hager y los A9R de Schneider Electric. En la siguiente tabla se muestran las características y el precio de ambos:

Características/Modelo	Hager		Schneider	
	MUN510	MUN516	A9N21644	A9N21645
Intensidad Nominal	25A	40A	25A	40A
Nº Polos	2P	2P	2P	2P
Sensibilidad	30mA	30mA	30mA	30mA
Clase	AC	AC	AC	AC
Cable max. Admitido	35mm ²	35mm ²	35mm ²	35mm ²
Ancho(mm)	35	35	35	35
PVP(euros)	72,62	73,76	72,38	73,51
Descuento	75%	75%	74%	74%
Coste	18,15	18,44	18,82	19,12

Tabla 19: Tabla comparativa de diferenciales

De nuevo las características técnicas son idénticas, por lo que volvemos a realizar la decisión en función al precio de los dispositivos. En esta ocasión no hay mucha diferencia entre el precio de ambas marcas, aunque la marca Hager sigue estando ligeramente por debajo. Por este motivo, y por mantener una homogeneidad en el cuadro se opta por montar el diferencial de Hager; más concretamente el modelo CDC748M de 40 A, que como se había comentado, tiene un precio muy similar al de 25 A.



Figura 88: Interruptor diferencial CDC748M de Hager

9.3. Dimensionado del sistema de ventilación

9.3.1. Tipos de ventilación y climatización

Antes de nada vamos a explicar la diferencia entre ventilar, airear y refrigerar.

- **Ventilación**

El movimiento del aire en el interior del armario con la ayuda de un ventilador permite homogeneizar la temperatura y evitar los puntos calientes perjudiciales para algunos componentes. Esta acción se conoce como ventilación forzada.

Los ventiladores están concebidos para evacuar una determinada cantidad de calor procedente de los componentes de los cuadros eléctricos. El tiempo de vida de estos componentes aumenta, garantizando de este modo el buen funcionamiento de la instalación.

Se trata de una solución eficaz, simple de instalar y de mantener, además de económica.

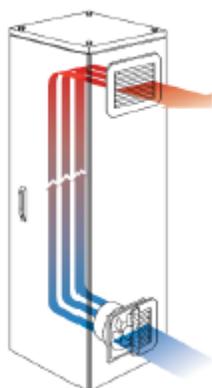


Figura 89: Principio de funcionamiento de la ventilación forzada

Los ventiladores se montan por la parte interna de la pared del cuadro, y siempre junto con un filtro ensamblado al armario por el exterior, que evita la entrada de suciedad al interior del cuadro debido al efecto aspiración del ventilador. En el caso de la ventilación forzada, se pone un filtro en la entrada de aire y otro en la salida, permitiendo la expulsión del aire caliente. Por ello, las salidas de aire se

suelen colocar en la parte superior de los cuadros, mientras que la entrada se instala en el inferior facilitando la circulación de aire “fresco” exterior. Se suelen instalar también unas rejillas protege-dedos ensambladas en la cara interna del ventilador.

- **Aireación**

Se trata de un procedimiento de disipación natural, sin el uso de ventilación forzada en la entrada. Se basa en utilizar una envolvente de mayores dimensiones, lo que puede resolver en algunos casos el problema de calentamiento.

La aportación de aire fresco exterior mediante rejillas de ventilación mejora la disipación de calor por convección natural. Sin embargo esta solución únicamente es factible en los casos en los que la potencia que deba disiparse sea débil y en ambientes con escasos niveles de polvo.

Para ello, solo utilizaremos aberturas, donde instalamos el filtro de entrada.

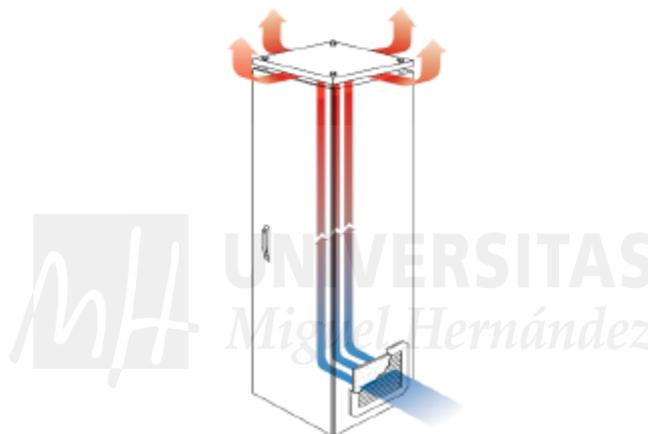


Figura 90: Principio de funcionamiento de la aireación

- **Refrigeración**

La refrigeración se puede realizar usando 3 tipos de aparatos: climatizadores, intercambiadores aire/aire, e intercambiadores aire/agua. Nosotros nos vamos a centrar en los climatizadores, que es lo más habitual.

Los climatizadores o refrigeradores pueden ser utilizados en ambientes más severos, en los que la temperatura puede alcanzar los 55°C o más. Estos equipos son particularmente indicados cuando la temperatura deseada en el armario deba ser inferior a la temperatura ambiente o cuando la cantidad de calor que haya que evacuar sea importante.

Como en el caso de los intercambiadores, no modifican el IP del cuadro.

El filtro colocado en la entrada del circuito de aire exterior les permite funcionar incluso cuando el aire ambiente está cargado de polvo o de partículas de aceite. Los grupos de climatización integran la función de regulación de la temperatura del armario así como la de señalización de cualquier anomalía de funcionamiento mediante dispositivos de alarma.

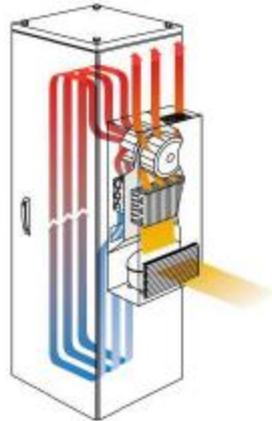


Figura 91: Principio de funcionamiento del refrigerador

9.3.2. Calculo del ventilador

- **Calculo del ventilador en condiciones normales**

Para obtener el caudal de aire del ventilador necesario para expulsar las pérdidas que no son disipadas al exterior a través de las paredes del armario, utilizamos la siguiente formula:

$$Q_{normal} = \frac{Perdidas\ normal}{Daire \times Ceaire \times \Delta T} = \frac{V}{550(A)}$$

Dónde:

Perdidas normal: es la potencia a expulsar calculada anteriormente (Kj/h)

Daire: densidad del aire = 1.13 (kg/m³)

Ceaire: calor especifico del aire = 1.01 (Kj/Kg°C)

ΔT: diferencia entre la Ta máx. deseada en el cuadro y la Ta ambiente máx. (°C)

En primer lugar debemos expresar las potencias de pérdidas en kJ/h:

$$Perdidas\ normal = 27.92W = 100.512\ Kj/h$$

$$Perdidas\ desfavorable = 58.28W = 209.808\ Kj/h$$

Sustituyendo los valores en la expresión anterior tenemos, para las condiciones normales y desfavorables:

$$Q_{normal} = \frac{100.512}{1.13 \times 1.01 \times 5} = 17.61 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{normal} = \frac{1209.808}{1.13 \times 1.01 \times 5} = 36.76 \frac{m^3}{h}$$

9.4. Mecanizado y montaje del cuadro

Se añade imagen del cuadro en su proceso inicial de mecanizado.



Figura 92: Cuadro principal.

9.5. Cableado y marcado

Se adjunta imagen con detalle de cableado y etiquetado en primeras pruebas

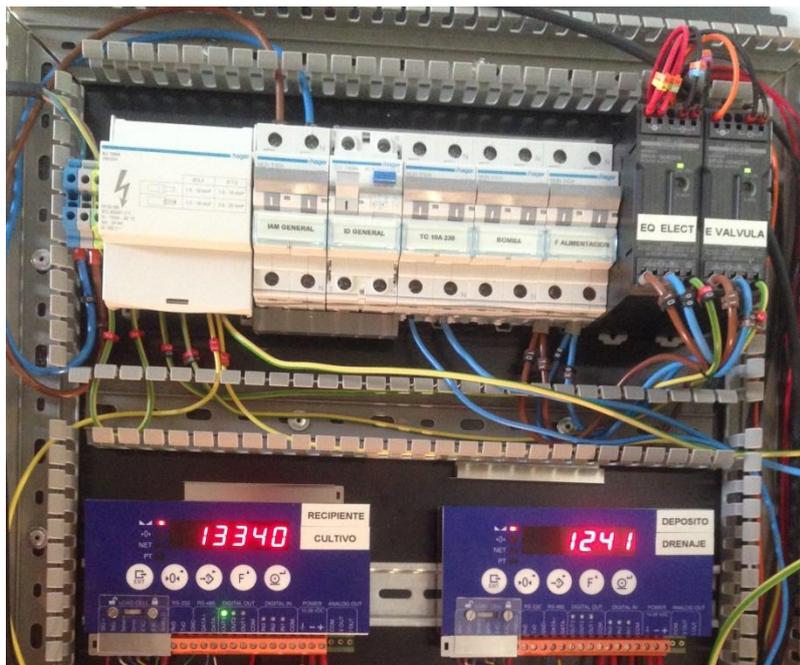


Figura 93: Detalle de cableado y etiquetado en proceso de trabajo.

10. Instalación en campo.

Por problemas de tiempo no se pudo llevar a cabo el proceso de puesta en marcha del sistema en su conjunto, por lo que todas las pruebas que se han hecho del sistema se han llevado a cabo en el laboratorio.

Uno de los objetivos era éste, la puesta en marcha del lisímetro, pero no se pudieron cumplir debido sobre todo a la falta de tiempo.

Una vez se termine de consolidar los objetivos de la integración de ArduPLC como equipo de control del lisímetro se plantearía su instalación en campo, pero ha día quedaran trabajos por concluir.

11. Conclusiones y líneas futuras.

Como conclusión final del trabajo realizado daré detalle de los pros y contra que pueda haber encontrado en las distintas tareas llevadas a cabo.

Establecer la comunicación con protocolo Modbus entre Swift, ArduPLC y PC Labview ha sido una tarea algo compleja, ya que se ha perdido mucho tiempo en hacer pruebas entre los distintos equipos hasta finalmente lograr poder comunicarlos entre sí.

Hay que tener en cuenta varios aspectos, uno de ellos es que el código del ArduPLC puede llegar a tener cierta complejidad ya que el código a desarrollar en ciertos casos puede ser extenso, aunque la finalidad de la marca Arduino es hacerlo de fácil acceso para su entendimiento, simplificando el lenguaje C que lleva como en segundo plano como motor principal, en el cual se desarrollan todas las librerías de acceso para Arduino, lográndolo para programas básicos donde es más fácil de entender y desarrollar el código. Sin embargo para otros fines de mayor complejidad como puede ser el desarrollo del presente proyecto, puede costar el desarrollo del código es de mayor complejidad, al final como todo es cuestión de práctica.

Si hacemos una comparación con otros códigos como por ejemplo el utilizado para la programación del Datalogger CR300, podemos decir que este último llega a ser bastante más intuitivo.

Otro de los problemas que nos encontramos es que el ArduPLC con el que se ha trabajado tiene una opción para trabajar con puerto serie y comunicación RS485, pero tras comprobarlo en el propio laboratorio y tras consultar esta configuración con el suministrador RAY Ingeniería, para cerciorarnos de que se estaba configurando correctamente, se confirmó que el ArduPLC no trabajaba correctamente.

Por otro lado decir que ArduPLC, tiene el hándicap, de que es modular, como comentábamos antes se le pueden acoplar diferentes tipos de shield, dependiendo

de que función se le quiera dar, hemos descrito distintos tipos de shield en uno de los apartados anteriores, y de los cuales se pueden tomar como referencia para líneas futuras de desarrollo.

Uno de los shield que se pueden usar para usarlo de interfaz de comunicación, es el TFT 1,77 lector SD, ya que el ArduPLC no lleva ninguna pantalla incorporada, y nos sería de gran ayuda para ver la comunicación Modbus entre el ArduPLC y el resto de equipos.

Otra función extra para darle al proyecto más valor añadido que es un sistema de alarma, aprovechando la existencia del GSM y aprendiendo todas sus funcionalidades (enviar/recibir web), existe la posibilidad de enviar mensajes de texto SMS a cualquier móvil.

Otra función sería el incorporar un sensor de temperatura, humedad y conductividad, el 5TE mediante el puerto SDI-12, que se ha detallado en el apartado 5.7.

En una primera etapa del proyecto la primera tarea que se llevó a cabo fue la preparación y mecanizado del cuadro, para la posterior integración de los borneros y posicionamiento de equipos, otra fue la de calibración de las células de carga y su conexión con el sumador y con los Swift, otra fue la configuración del Swift para comunicarse mediante protocolo Modbus.

Otras tareas no ha hecho falta entrar en mucho detalle porque existe un trabajo previo de investigación y desarrollo de lisímetros con bastante peso, por lo que se han validado por extensión de prototipos anteriores.

Por tanto y concluyendo el fin de este proyecto ha sido el estudio de la viabilidad de integrar el ArduPLC como equipo de control del Lisímetro, toda esta información sirva para desarrollo de futuros trabajos y proyectos.

12. Bibliografía

1. Descripción Lisímetro: <https://es.wikipedia.org/wiki/Lis%C3%ADmetro>
2. Apuntes sobre Lisímetros:
<https://www.agromatica.es/lisímetros-balance-hídrico-del-suelo/>
3. Lisímetro exterior adaptado para una maceta: (Larsbo y Harvis, 2006).
4. Evapotranspiration, FAO Penman-Monteith Equation:
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm#equation>
5. Diseño y funcionamiento de un Lisímetro Hidráulico para medición de Evapotranspiración Potencial;
[http://www.ucla.edu.ve/bioagro/REV10\(1\)/2.%20Dise%C3%B1o%20y%20funcionamiento.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/REV10(1)/2.%20Dise%C3%B1o%20y%20funcionamiento.pdf)
6. Asignatura de Fundamentos de automatización y Telecontrol para la gestión de recursos hídricos y energéticos del Master en Automatización y Telecontrol de Recursos Hídricos y Energéticos.
7. *DESIGN, IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A LYSIMETER FOR POTTED PLANTS*. 17th International Congress on Project Management and Engineering Logroño, 17-19th July 2013, Ruiz Peñalver, L. 1; Molina Martínez, J. M. 1; Guerrero Arroniz, D.1; Ruiz Canales, A.2 1 Universidad Politécnica de Cartagena, 2 Universidad Miguel Hernández.
8. Comunicación Serie RS-232, RS-422 y RS-485:
<http://www.unilibre.edu.co/revistaingenioliberal/revista-11/art13.pdf>
9. Introducción a Arduino;
<https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>
10. Sistemas de Control:
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control
11. Sistemas de Adquisición de Datos:
<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
12. Guide to Building a Measurement System (National instrument)
http://download.ni.com/evaluation/daq/Measurement_System_Build_Guide.pdf

13. Sistemas de Adquisición de Datos: T.6 y T.7 Asignatura Programación gráfica y diseño de sistemas SCADA del Master en Automatización y Telecontrol de Recursos Hídrico y Energéticos.
14. Manual de descripción; ArduPLC v2. RAY Ingeniería Electrónica.
<http://tienda.ray-ie.com/>
15. Criterios Selección de Células de Carga: <https://www.utilcell.es/preguntas-frecuentes-faq/>
16. Librería para comunicación Modbus RS233/485 con arquitectura maestro/esclavo (protocolo RTU):
<http://4-20ma.io/ModbusMaster/index.html>
17. Sensor de Temperatura DS18B20:
<http://cetriconline.blogspot.com.es/2014/07/tutorial-Arduino-iv-sensor-de.html>
18. Manual Sensor 5TE. (pdf)
http://manuals.decagon.com/Manuals/13509_5TE_Web.pdf
19. Detalle de los esquemáticos que componen la placa ArduPLC.
<http://tienda.ray-ie.com/home/95-ArduPLC-v2.html>
20. Manual Programación Arduino:
http://dfists.ua.es/~jpomares/Arduino/page_03.htm
21. Pagina Oficial Arduino: <http://Arduino.cc/>
22. Manual de comandos de comunicación para GSM: https://cdnhop.adafruit.com/datasheets/sim800_series_at_command_manual_v1.01.pdf
23. Descripción de tipos de variables en lenguaje de programación C:
<https://www.badprog.com/c-type-what-are-uint8-t-uint16-t-uint32-t-and-uint64-t>
24. Librería ModbusMaster: <https://github.com/4-20ma/ModbusMaster>
25. Manual del swift_manual_v1_0003
26. ArduPLC Esquemáticos.
27. Larsbo, M., Jarvis, N. (2006). Information content of measurements from tracer microlysimeter experiments designed for parameter identification in dual-permeability models. Journal of Hydrology, 325, 1–4: 273–287.

28. Liu S. Bai J., Jia, Z., Jia, L., Zhou H., Lu L. (2009). Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 573–584.
29. Xinmin Z., Lin, H.; Xiuju B., Bingxiang Z., Fahe, C., Xinzhang, S. (2007). The most economical irrigation amount and evapotranspiration of the turfgrasses in Beijing City, China. *Ag. Wat. Manag.* 89: 98 – 104.
30. Zhi-Shan Z., Li-Chao L., Xin-Rong L., Jing-Guang Z., Ming-Zhu H., Hui-Juan T. (2008). Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China. *Journal of Arid Environments* 72: 964–973.



ANEXO I:

CHECKLIST COMUNICACIÓN MODBUS:

1. CONFIGURACION VALORES DE COMUNICACIÓN:
 - a. PUERTO COMUNICACIÓN PC
 - i. Baud: 19200
 - ii. Bit Datos: 8
 - iii. Paridad: Ninguno
 - iv. Bit Parada: 1
 - v. Control flujo: Ninguno
 - b. SWIFT UTILCELL
 - i. Type: RTU
 - ii. Add: N° Slave
 - iii. For: Funcion a realizar, por defecto F1.
 - iv. Baud: 19200
 - v. Paridad: None
 - vi. oURate: 50
 - vii. Ter: None
 - viii. Protocolo: None
 - c. ARDUINO
 - i. Comprobar puerto de comunicación COM.
 - ii. Comprobar tipo de placa con la que estamos trabajando.
 - iii. Dentro del Codigo, configurar BAUD, igual velocidad que el resto de dispositivos (19200)
 - d. LabVIEW 2017
 - i. Ejecutar como administrativo
 - ii. Comprobar Puerto COM
 - iii. Comprobar BAUD, igual que el resto de dispositivos (19200)
2. OSCILOSCOPIO
 - a. Autoset
 - b. Regular la Scale Vertical (V/div) entre 1 y 2V
 - c. Regular Scale Horizontal 500us
 - d. Force trigger y posteriormente ajustarlo con el fin de evitar ruidos y captar la señal.
3. NOTAS: Cada vez que modifiquemos el Codigo de Arduino para cargarlo en la placa, iremos a Administrador de Dispositivos del PC/Puertos COM y deshabilitaremos y volvemos a habilitar los puertos de comunicación.

ANEXO II: Ejemplo comunicación SDI-12

Sketch con comunicación SDI-12, para revisar qué dirección que tiene el sensor 5TE y cambiarla por otra.

```
# OVERVIEW #
#####
Example B: Changing the address of a sensor.
This is a simple demonstration of the SDI-12 library for Arduino.
It discovers the address of the attached sensor and allows you to change it.
#####
# THE CIRCUIT #
#####
The circuit: You should not have more than one SDI-12 device attached for this
example.
See:
https://raw.github.com/Kevin-M-Smith/SDI-12-Circuit-
Diagrams/master/basic_setup_no_usb.png
orhttps://raw.github.com/Kevin-M-Smith/SDI-12-Circuit-
Diagrams/master/compat_setup_usb.png
#####
# COMPATIBILITY #
#####
This library requires the use of pin change interrupts (PCINT).
Not all Arduino boards have the same pin capabilities.
The known compatible pins for common variants are shown below.
Arduino Uno: All pins.
Arduino Mega or Mega 2560:
10, 11, 12, 13, 14, 15, 50, 51, 52, 53, A8 (62), A9 (63), A10 (64), A11 (65), A12
(66), A13 (67), A14 (68), A15 (69).
Arduino Leonardo: 8, 9, 10, 11, 14 (MISO), 15 (SCK), 16 (MOSI)
#####
# RESOURCES #
#####
Written by Kevin M. Smith in 2013.
Contact: SDI12@ethosengineering.org
The SDI-12 specification is available at: http://www.sdi-12.org/
The library is available at: https://github.com/EnviroDIY/Arduino-SDI-12
*/
#include "SDI12.h"
#define DATAPIN 3 // Pin para la transmisión de datos
// #define POWERPIN 22 // Pin de alimentación en caso de ser necesario
SDI12 mySDI12(DATAPIN);
String myCommand = ""; // String del comando a enviar, vacío en un principio.
char oldAddress = '!'; // Variable para guardar la dirección anterior.
// this checks for activity at a particular address
// expects a char, '0'-'9', 'a'-'z', or 'A'-'Z'
boolean checkActive(byte i){ // Chequea la actividad en una dirección en
```

```
particular
Serial.print("Checking address ");
Serial.print((char)i);
Serial.print("...");
myCommand = "";
myCommand += (char) i; // Comando de reconocimiento [dirección][!]
myCommand += "!";
for(int j = 0; j < 3; j++){ // Tres intentos de contacto
mySDI12.sendCommand(myCommand);
if(mySDI12.available()>1) break;
delay(30);
} if(mySDI12.available()>2){ // Si escucha algo asumo que la dirección está
ocupada.
Serial.println("Occupied");
mySDI12.clearBuffer();
return true;
}
else {
Serial.println("Vacant"); // En cualquier otro caso la dirección está vacía
mySDI12.clearBuffer();
}
return false;
}
void setup(){
Serial.begin(9600);
mySDI12.begin();
/*
* // Power the sensors;
#if POWERPIN > 0
pinMode(POWERPIN, OUTPUT);
digitalWrite(POWERPIN, HIGH);
delay(200);
#endif
*/
} void loop(){

boolean found = false; // Identificación del sensor
for(byte i = '0'; i <= '9'; i++){ // escanea direcciones 0-9
if(found) break;
if(checkActive(i)){
found = true;
oldAddress = i;
}
}
for(byte i = 'a'; i <= 'z'; i++){ // escanea direcciones a-z
if(found) break;
if(checkActive(i)){
found = true;
oldAddress = i;
```



```
}
}
for(byte i = 'A'; i <= 'Z'; i++){ // escanea direcciones A-Z
if(found) break;
if(checkActive(i)){
found = true;
oldAddress = i;
}
}
if(!found){
Serial.println("No se han detectado sensores. Revise las conexiones."); // El
sensor no fue encontrado.
}
else{
Serial.print("Sensor active at address "); // Sensor encontrado
Serial.print(oldAddress);
Serial.println(".");
Serial.println("Enter new address."); // Petición para insertar la nueva dirección
while(!Serial.available());
char newAdd= Serial.read();
// Esperando a que se escriba una dirección válida
while( ((newAdd<'0') || (newAdd>'9')) && ((newAdd<'a') || (newAdd>'z')) &&
((newAdd<'A') || (newAdd>'Z'))){
if(!(newAdd =='\n') || (newAdd =='\r') || (newAdd ==' ')) {
Serial.println("Dirección no válida. Direcciones posibles: '0'-'9', 'a'-'A', or 'z'-'Z'.");
}
while(!Serial.available());
newAdd = Serial.read();
} /* the syntax of the change address command is:
[currentAddress]A[newAddress]! */

Serial.println("Cambiando dirección del sensor.");
myCommand = "";
myCommand += (char) oldAddress;
myCommand += "A";
myCommand += (char) newAdd;
myCommand += "!";
mySDI12.sendCommand(myCommand);
/* wait for the response then throw it away by
clearing the buffer with clearBuffer() */
delay(300);
mySDI12.clearBuffer();
Serial.println("Éxito. Reescaneando para verificar el cambio.");
} NOTA: Tanto la biblioteca SDI-12 como el sketch son de dominio público y
no fue creado por y las referencias de dicha información están dentro del
sketch mostrado anteriormente.
```

ANEXO III: Sketch para obtener la temperatura del Sensor SD18B20.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Data wire is plugged into port 2 on the Arduino, A0 para ArduPLC
#define ONE_WIRE_BUS 3

// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices (not just
Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup(void)
{
  // start serial port
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Dallas Temperature IC Control Library Demo");

  // Start up the library
  sensors.begin();
}

void loop(void)
{
  // call sensors.requestTemperatures() to issue a global temperature
  // request to all devices on the bus
  Serial.print("Requesting temperatures...");
  sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
  Serial.println("DONE");

  Serial.print("Temperature for the device 1 (index 0) is: ");
  Serial.println(sensors.getTempCByIndex(0));
  delay(2000);
}
```

Nota: Librerías a cargar en el código:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

