SESIÓN 9. CONTROL DE TEMPERATURA CON PID INDUSTRIAL.

Descripción de la práctica

En esta práctica se va a controlar un proceso térmico (una maqueta de horno) con un controlador PID industrial. Se realizarán las siguientes actividades:

- Programación de la tarjeta Arduino para visualizar las señales.
- Control de temperatura directo con calefactor:
    a. Conexión eléctrica de todos los elementos para el control de temperatura directo con calefactor.
    b. Configuración del PID para el control de temperatura directo con calefactor.
    c. Introducción de los parámetros del PID calculados en la sesión anterior y prueba del controlador PID.
    d. Autoajuste del PID mediante la función de autotuning y prueba del controlador PID.
    e. Ajuste experimental con los datos del experimento de autotuning.
- Control de temperatura inverso con ventilador:
    a. Conexión eléctrica de todos los elementos para el control de temperatura inverso con ventilador.
    b. Configuración del PID para control de temperatura inverso con ventilador.
    c. Realización de experimento de cambio en escalón en bucle abierto con PID en modo manual.
    d. Ajuste experimental del PID con los datos del experimento.
    e. Introducción de los parámetros del PID calculados y prueba del controlador PID.
    f. Autoajuste del PID mediante la función de autotuning y prueba del controlador PID.
- Control de temperatura frío-calor con calefactor y ventilador:
    a. Conexión eléctrica del sistema para el control de temperatura frío-calor con calefactor y ventilador.
    b. Configuración del PID para el control de temperatura frío-calor con calefactor y ventilador.
    c. Autoajuste del PID mediante la función de autotuning y prueba del controlador PID resultante.

Conceptos teóricos

Los siguientes conceptos teóricos se explicarán antes y durante el desarrollo de la práctica:

- Controladores PID industriales.
- Tipos de entradas y de salidas.
- Algoritmo PID digital.
- Periodo de muestreo.
- Filtrado antialiasing.
- Nomenclatura de variables en PID industrial (SP, PV, PB, etc.)..
- Unidades. Conversión entre unidades.
- Autoajuste de controladores PID.
- Control de temperatura inverso.
- Control de temperatura calor-frío.

1. Descripción del material a emplear

A continuación, se realiza una breve descripción de los principales materiales a emplear en el transcurso de la práctica.

- *Proceso Electrotérmico*[1]

Se trata de una planta formada por un perfil de acero y una resistencia calefactora. Esta resistencia es atacada por un amplificador conmutado de potencia, actuador, cuya entrada es una tensión de 0V a 10V (la potencia que se transmite a la resistencia es directamente proporcional a esta tensión de entrada). La medida de la temperatura se realiza mediante un transductor de temperatura basado en termopar, cuya salida va entre 0V a 10V (0ºC a 100ºC).

También dispone de un ventilador, que será utilizado para acelerar el enfriamiento (modo de funcionamiento de calor-frio), o para producir una perturbación en el sistema y comprobar la respuesta del sistema de control.

- *Controlador PID Industrial*

Se trata del controlador digital E5CK de OMRON. Es un equipo de control industrial basado en microprocesador que permite implementar un controlador digital de tipo PID. Recibe como entrada la señal del sensor de temperatura (tensión de 0V a 10V) y da como salida principal una señal analógica de tensión entre 0V y 10V, acción de control, que será amplificada por el operacional de potencia para atacar a la resistencia calefactora. Tiene además otras funciones, como alarmas, con salidas a relé, que permiten implementar funciones de protección adicionales.

- *Tarjeta Arduino UNO.*

Utilizaremos las entradas analógicas de la tarjeta Arduino UNO para la captura de datos (utilizando el software Arduino para su programación, y una aplicación Java de visualización), únicamente para visualizar las señales del sistema (acción de control y salida). El control lo realiza en todo momento el PID industrial

- *Amplificador para motor de continua.*

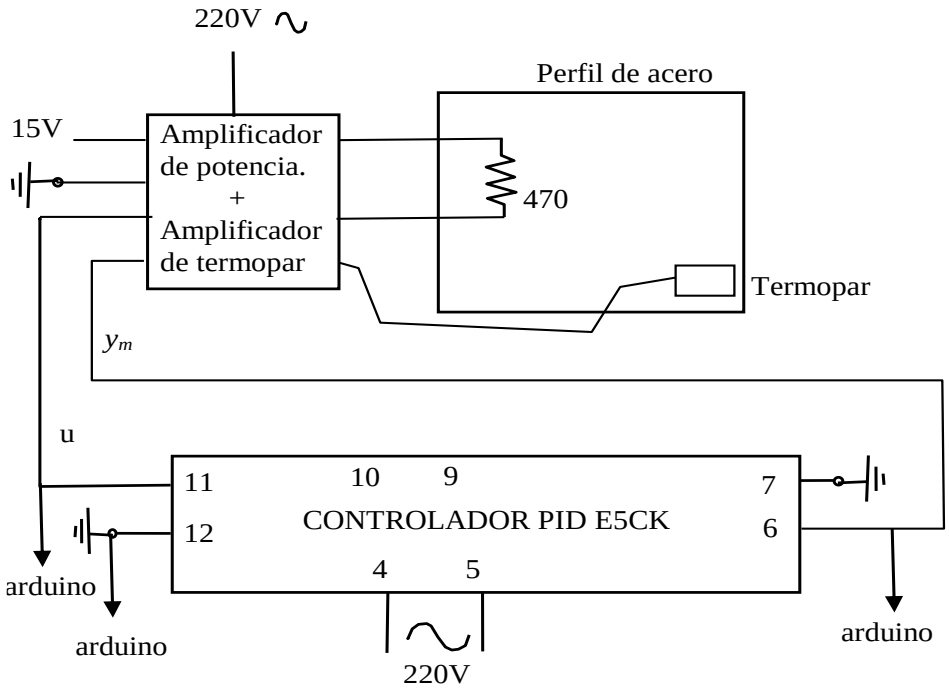
Es un amplificador conmutado, que tiene una entrada analógica en tensión, de 0 a 10 V, y que da una tensión continua proporcional a la alimentación que se conecte, con una corriente máxima de 3 A. Se utiliza para atacar al ventilador cuando se utiliza éste para el control de temperatura.

2. CONTROL DE TEMPERATURA DIRECTO.

En este caso se realiza el control de temperatura actuando sobre la resistencia calefactora. La acción de control es una tensión de 0 a 10V que se le da al amplificador de potencia que ataca la resistencia. El control lo realiza el PID E5CK, utilizando su salida analógica de 0 a 10V para definir la acción de control, y su entrada analógica de 0 a 10V para leer la temperatura a partir del amplificador del termopar.

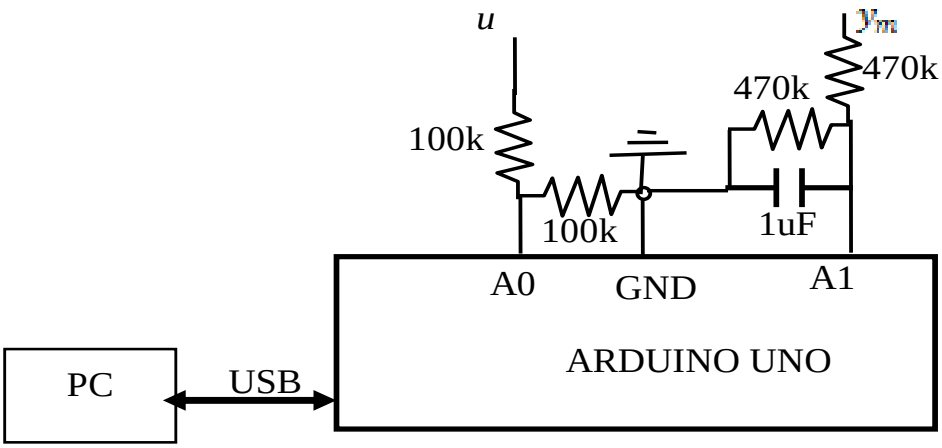
2.1. Esquema de conexiones.

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de conexiones del sistema.



- Realizar el montaje de la figura anterior sin encender la fuente de alimentación.

- Conectar también las señales al arduino, según el esquema siguiente, para medir con la entrada analógica A1 la señal del sensor de temperatura (y_m), y con la entrada analógica A0 la acción de control (u). Hacen falta divisores resistivos para reducir la tensión a la mitad, ya que el rango de Arduino es de 0 a 5V.



2.2. Configuración de la tarjeta arduino para visualizar las señales

1. Verificar el montaje de la figura del punto 2.1 sin encender la fuente de alimentación, ni alimentar el PID industrial.

2. Preparar el arduino para poder **capturar** datos a través de las **entradas analógicas**:

- Conectar el Arduino UNO al puerto USB.
- Abrir la aplicación Arduino, y abrir el fichero de ejemplo File/Examples/FIRMATA/SimpleAnalogFirmata.
- En Tools/Serial Port comprobar en qué puerto serie está conectado el Arduino.
- Programar el Arduino pulsando el botón de la flecha horizontal.

3. Ejecutar la aplicación Java para poder **monitorizar** las **entradas analógicas del Arduino desde el PC**:

- Ejecutar la aplicación Java **ejs_arduinoscope.jar**.
- Introducir el puerto serie donde está conectado el Arduino (COMX) y pulsar "*Conecta*".
- La ventana de gráficas muestra la temperatura y la acción de control.
- Pulsando el botón "*Guarda_datos*", se guardan los datos de las gráficas en un fichero de texto ascii.
- Pulsando "*Reinicia gráfica*" se borran los datos de las gráficas y éstas empiezan de nuevo.

2.3. Configuración del controlador

Para configurar el controlador para el control de temperatura, seguid los siguientes pasos:

1. **La tecla ⊂↵⊃ sirve para navegar en los menús. Una pulsación larga (1 segundo) en ⊂↵⊃ entra en un menú concreto o sale de él. Una pulsación corta muestra el siguiente ítem dentro de un menú.**
2. **Presionar ⊂↵⊃ durante 1s.**
3. **Emplear las teclas "flecha arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Setup (set)* del menú principal. Acceder al modo Setup presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.**
4. **Aparece el parámetro *"in-t"* para seleccionar el tipo de entrada. Seleccionar con las flechas el valor 21 (entrada tensión de 0 a 10V).**
5. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-H"*, selección del límite superior de escala. Seleccionar 1000.**
6. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-L"*, selección del límite inferior de escala. Seleccionar 0.**
7. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"dP"*, selección del punto decimal. Seleccionar 1. De esta forma, se asigna a la variable de entrada el rango de 0 a 100.0, así, se convierten los voltios en ºC, y el Display No. 1 muestra la variable controlada expresada en ºC, con 1 decimal.**
8. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"öUt 1"*, asignación de la salida del controlador PID a la salida de control 1 (salida analógica principal). Seleccionar HEAT.**

9. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"öUt 2"*, asignación de la salida de control 2 (salida relé). Seleccionar AL-1 (alarma 1). Así, se asigna la alarma 1 a la salida de control 2. Esta alarma será definida después para evitar el calentamiento excesivo de la planta.**
10. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"Alt 1"*, selección del tipo de alarma. Seleccionar 8 (tipo de alarma activa por límite superior absoluto). Se utiliza para cortar la tensión si la temperatura supera un valor máximo que se introducirá después.**
11. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"AL 1n"*, selección del estado de la salida relé de la alarma 1. Seleccionar "n-C". Así, el relé de salida estará normalmente cerrado (calefactor funcionando) y se abrirá si hay alarma (para que la temperatura no supere el valor máximo).**
12. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ tres veces. Aparece el parámetro *"örEu"*, selección del signo de la realimentación. Seleccionar "ör-r" (operación inversa). Así, se configura el signo negativo de la realimentación, que es lo normal.**
13. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Nivel 2 (Lv-2)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Ajustar los límites máximo y mínimo de la acción de control a 100% y 0% respectivamente. Para ello presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ varias veces hasta que aparezca óL-H, y ajustarlo a 100. Presionar nuevamente la tecla ⊂↵⊃ hasta que aparezca óL-L, y ajustar el valor a 0.**
14. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.**
15. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ una vez. Aparece el parámetro *"AL-1"*, asignación del valor de alarma 1. Seleccionar 90.0. Así, se establece el límite superior que dispara la alarma en 90ºC.**

2.4. Implementación y prueba de PID ajustado en la sesión anterior

En este apartado deberán introducirse los parámetros del PID ajustado en la sesión 8 (Kp=0.5, Ti=136, Td=30).

16. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"P"*. Seleccionar la banda proporcional del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia (P=100/Kp). Para este cálculo la ganancia Kp debe estar en unidades de %, tanto la salida medida como la acción de control. En este caso, tanto la salida como la acción de control, dentro del PID, van de 0 a 100%. Si se tiene la ganancia Kp en V/ ºC, hay que multiplicarla por 10, ya que el rango de la salida es 0-100ºC <-> 0- 100%, mientras que el de la acción de control es 0-10V <-> 0-100%. Por ejemplo, si Kp=0.5 V/ºC, habría que poner P=100/(0.5*10)=20.**
17. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"i"*. Seleccionar el valor de T_d , en segundos, del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia. (Si no se requiere término integral, seleccionando 0, se anula el término integrador).**
18. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"d"*. Seleccionar el valor de T_d , en segundos, del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia. (Si no se requiere término derivativo, seleccionando 0, se anula el término derivativo).**
19. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Nivel 0 (Lv-0)*. Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s para acceder al mismo.**
20. **Seleccionar un valor de referencia de 45.0ºC.**
21. **Encender la fuente y esperar a que se estabilice la variable controlada entorno al valor de consigna establecido.**
22. **En cuanto se haya estabilizado en 45º, modificar la referencia a 55º. Visualizar la respuesta, y medir aproximadamente el *tiempo de establecimiento,* la *sobreoscilación* y el *error de posición.***

2.5. Ajuste experimental basado en el auto-ajuste del controlador E5CK.

Una forma muy rápida de definir un controlador PID para controlar una determinada planta, es emplear el auto-ajuste (AT) que posee el controlador comercial. En concreto, el controlador E5CK implementa un algoritmo propio de autoajuste, en el que se configura como un controlador todo/nada con histéresis, lo que provoca que el sistema oscile, con un desfase aproximado de 180º entre la entrada y la salida. El equipo mide entonces el periodo de oscilación y la amplitud, y aplica un algoritmo propio para determinar los parámetros del controlador. Tiene dos opciones: AT-1, en el que la acción de control cambia un 40% del rango, y AT-2 en el que la acción de control cambia un 100% del rango, es decir, conmuta entre 0 y la acción de control máxima. Para que el experimento funcione bien, éste debe iniciarse cuando la temperatura está aproximadamente en el valor de referencia, y la acción de control esté estable. El parámetro At-G permite configurar la robustez del ajuste.

- ***Realización del experimento de autoajuste e implementación del controlador PID***

23. Ir al menú de Expansión (Eut) y fijar el valor del parámetro At-G entre 0.5 y 2, para configurar el autoajuste. Este parámetro determina la robustez del autoajuste. Cuanto más alto, más robusto y lento es el controlador.

24. Con la referencia en 55.0, una vez la temperatura se estabiliza aproximadamente en 55º, ejecutar el auto-ajuste del regulador. Para ello, ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)* y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Aparece el parámetro *"At"*, empleado para cancelar/ejecutar la experiencia auto-ajuste. Seleccionar "At-1". En ese momento el controlador empieza a hacer el experimento para autoajustar los parámetros del regulador PID. Cuando deja de parpadear el *indicador de operación AT*, ya está autoajustado el controlador.

25. Ir al menú correspondiente para leer los valores de los parámetros del PID autoajustado, para compararlos con los valores ajustados en la sesión 8, y con los valores de otras mesas, en función del valor de At-G utilizado.

26. Guardar los datos en un fichero, y ajustar un controlador con la herramienta de ajuste experimental, por el método de relé, con N=3, y robustez intermedia y con robustez menor de 0.5 y mayor de 0.5. Comparar los parámetros con los del autoajuste del PID.

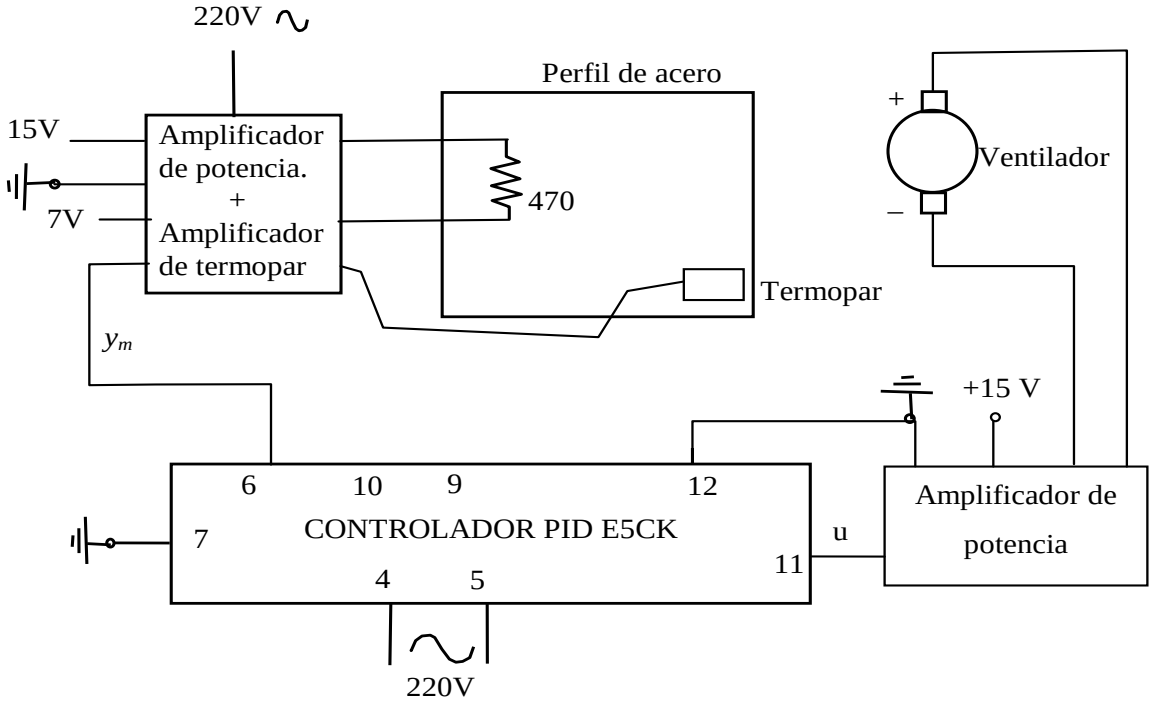
27. Conectar el ventilador a la fuente de alimentación de 5 V para comprobar la respuesta ante una perturbación externa. Una vez se estabilice, desconectar el ventilador y esperar a que se vuelva a estabilizar.

3. CONTROL DE TEMPERATURA INVERSO CON VENTILADOR CON PID INDUSTRIAL.

En este caso se realiza el control de temperatura utilizando como actuador el ventilador que enfría el horno. La resistencia calefactora se conecta a una potencia constante (en este caso a 7V, es decir al 70% de su potencia máxima), y la temperatura se controla cambiando la tensión aplicada al ventilador. La acción de control es una tensión de 0 a 10 V que se aplica al amplificador de corriente continua que ataca al ventilador.

3.1. Esquema de conexiones.

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de conexiones del sistema.



- Realizar el montaje de la figura anterior sin encender la fuente de alimentación.

- Conectar también las señales al arduino, según el esquema descrito antes, para medir con la entrada analógica A1 la señal del sensor de temperatura (y_m), y con la entrada analógica A0 la acción de control (u).

3.2. Configuración del controlador

Para configurar el controlador para el control de temperatura, seguid los siguientes pasos:

1. Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Setup (set)* del menú principal. Acceder al modo Setup presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.

2. Aparece el parámetro *"in-t"* para seleccionar el tipo de entrada. Seleccionar con las flechas el valor 21 (entrada tensión de 0 a 10V).
3. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-H"*, selección del límite superior de escala. Seleccionar 1000.
4. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-L"*, selección del límite inferior de escala. Seleccionar 0.
5. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"dP"*, selección del punto decimal. Seleccionar 1. De esta forma, se asigna a la variable de entrada el rango de 0 a 100.0, así, se convierten los voltios en ºC, y el Display No. 1 muestra la variable controlada expresada en ºC.
6. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"öUt 1"*, asignación de la salida del controlador PID a la salida de control 1 (salida analógica principal). Seleccionar HEAT.
7. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"öUt 2"*, asignación de la salida de control 2 (salida relé). Seleccionar AL-1 (alarma 1). Así, se asigna la alarma 1 a la salida de control 2. Esta alarma será definida después para evitar el calentamiento excesivo de la planta.
8. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"Alt 1"*, selección del tipo de alarma. Seleccionar 8 (tipo de alarma activa por límite superior absoluto). Se utiliza para cortar la tensión si la temperatura supera un valor máximo que se introducirá después.
9. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"AL 1n"*, selección del estado de la salida relé de la alarma 1. Seleccionar "n-C". Así, el relé de salida estará normalmente cerrado (calefactor funcionando) y se abrirá si hay alarma (para que la temperatura no supere el valor máximo).
10. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ tres veces. Aparece el parámetro *"örEu"*, selección del signo de la realimentación. Seleccionar "ör-d" (operación directa). Así, se configura el signo positivo de la realimentación, al ser la ganancia del sistema negativa.**
11. Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Nivel 2 (Lv-2)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Ajustar los límites máximo y mínimo de la acción de control a 100% y 0% respectivamente. Para ello presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ varias veces hasta que aparezca óL-H, y ajustarlo a 100. Presionar nuevamente la tecla ⊂↵⊃ hasta que aparezca óL-L, y ajustar el valor a 0.
12. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal.** Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.
13. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ una vez. Aparece el parámetro *"AL-1"*, asignación del valor de alarma 1. Seleccionar 90.0. Así, se establece el límite superior que dispara la alarma en 90ºC.

3.3. Experimento en bucle abierto de respuesta escalón.

- **Pulsar el botón A/M para pasar el controlador a modo manual.**
- **Fijar un valor de la acción de control de 30 (30%=3 V), y esperar a que se estabilice la temperatura.**
- **Ejecutar la aplicación Java de visualización se señales a través de Arduino (si no estaba en marcha).**
- **Una vez estabilizada la temperatura, cambiar el valor de la acción de control a 60 (60%= 6 V), y esperar de nuevo a que se estabilice la temperatura.**
- **Guardar los datos en un fichero (datos_vent.txt), y ajustar un controlador PID de robustez intermedia con N=3, mediante la aplicación Java de ajuste experimental. Anotar los parámetros del PID obtenido.**
- **Volver a pulsar el botón A/M para pasar a modo automático.**

3.4. Implementación y prueba de PID ajustado en la sección anterior

En este apartado deberán introducirse los parámetros del PID ajustado en la sección 3.3 (Kp=1.8, Ti=120, Td=18).

28. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.**
29. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"P"*. Seleccionar la banda proporcional del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia (P=100/Kp). Para este cálculo la ganancia Kp debe estar en unidades de %, tanto la salida medida como la acción de control. En este caso, tanto la salida como la acción de control, dentro del PID, van de 0 a 100%. Si se tiene la ganancia Kp en V/ ºC, hay que multiplicarla por 10, ya que el rango de la salida es 0-100ºC <-> 0- 100%, mientras que el de la acción de control es 0-10V <-> 0-100%. Por ejemplo, si Kp=0.5 V/ºC, habría que poner P=100/(0.5*10)=20.**

30. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"i"*. Seleccionar el valor de T_d , en segundos, del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia. (Si no se requiere término integral, seleccionando 0, se anula el término integrador).**
31. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"d"*. Seleccionar el valor de T_d , en segundos, del controlador PID calculado mediante respuesta escalón, de robustez intermedia. (Si no se requiere término derivativo, seleccionando 0, se anula el término derivativo).**
32. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "arriba" y "abajo" para ir hasta el *modo Nivel 0 (Lv-0)*. Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s para acceder al mismo.**
33. **Seleccionar un valor de referencia de 55.0 y esperar a que se estabilice la temperatura en 55.**
34. **En cuanto se haya estabilizado en 55º, modificar la referencia a 50º. Visualizar la respuesta, y medir aproximadamente el *tiempo de establecimiento,* la *sobreoscilación* y el *error de posición.***

3.5. Ajuste experimental basado en el auto-ajuste del controlador E5CK.

El controlador E5CK implementa un algoritmo propio de autoajuste, en el que se configura como un controlador todo/nada con histéresis, lo que provoca que el sistema oscile, con un desfase aproximado de 180º entre la entrada y la salida. El equipo mide entonces el periodo de oscilación y la amplitud, y aplica un algoritmo propio para determinar los parámetros del controlador. Para que el experimento funcione bien, éste debe iniciarse cuando la temperatura está aproximadamente en el valor de referencia.

- ***Realización del experimento de autoajuste e implementación del controlador PID***

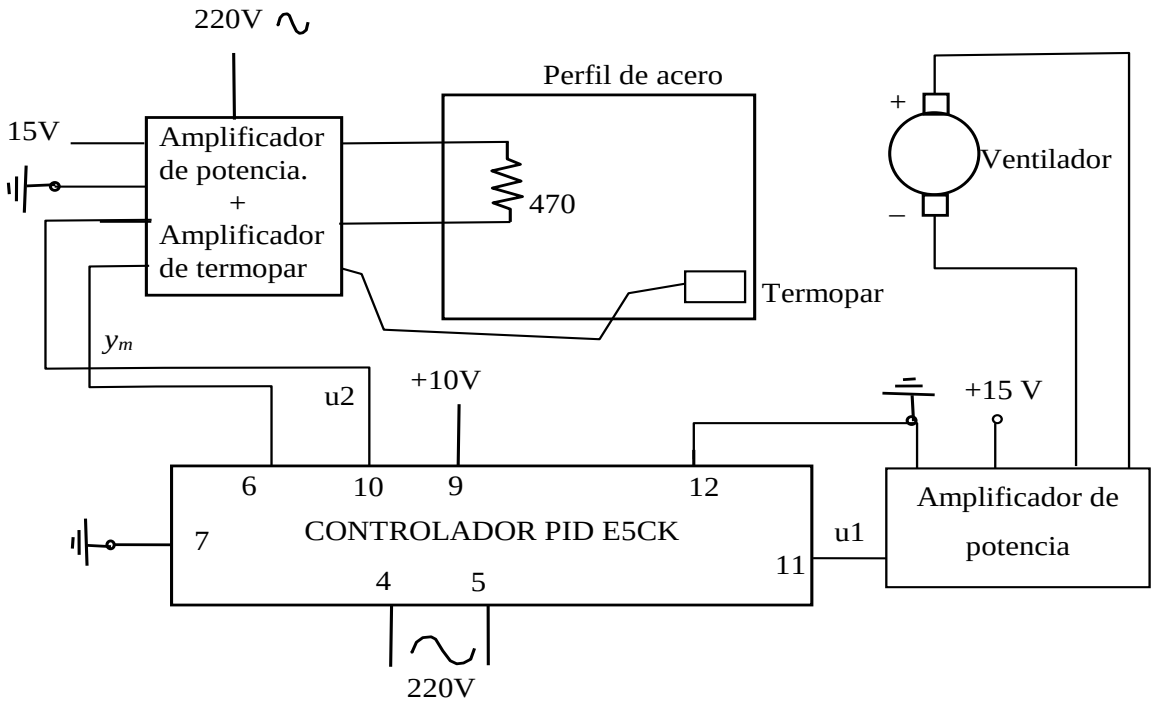
14. **Ir al menú de Expansión (Eut) y fijar el valor del parámetro At-G entre 0.5 y 2, para configurar el autoajuste. Este parámetro determina la robustez del autoajuste. Cuanto más alto, más robusto y lento es el controlador.**
15. **Fijar la referencia a 50.0, y cuando esté estabilizado, ejecutar el auto-ajuste del regulador. Para ello, ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)* y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Aparece el parámetro *"At"*, empleado para cancelar/ejecutar la experiencia auto-ajuste. Seleccionar "At-2". En ese momento el controlador empieza a hacer el experimento para autoajustar los parámetros del regulador PID. Cuando deja de parpadear el *indicador de operación AT*, ya está autoajustado el controlador.**
16. **Ir al menú correspondiente para leer y anotar los valores de los parámetros del PID autoajustado. Comparar los controladores de las distintas mesas en función del valor de AT-G configurado.**
17. **Cambiar la referencia a 55.0, y cuando se estabilice en 55 aumentar la tensión aplicada a la resistencia de 7 a 9 V para ver la respuesta ante perturbación.**

4. CONTROL DE TEMPERATURA CALOR-FRÍO CON VENTILADOR CON PID INDUSTRIAL.

En este caso se utilizan dos actuadores, la resistencia calefactora para calentar, y el ventilador para enfriar. Como el PID solo tiene una salida analógica, de 0 a 10 V, se usa ésta para atacar el actuador de frío (el ventilador), mientras que se usa la salida a relé del PID para atacar la entrada del amplificador de la resistencia calefactora. La salida a relé solo funciona en conmutación, por lo que la acción de control se define en este caso como un ciclo de trabajo de ON-OFF (como una onda PWM).

4.1. Esquema de conexiones.

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de conexiones del sistema.



- Realizar el montaje de la figura anterior sin encender la fuente de alimentación.

- Conectar también las señales al arduino, según el esquema descrito antes, para medir con la entrada analógica A1 la señal del sensor de temperatura (y_m), y con la entrada analógica A0 la acción de control de calor ($u2$). La acción de control de calor se implementa conmutando el relé que conecta a 10 V la entrada del calefactor, por lo que esta señal conmutará entre 0 y 10 V.

4.2. Configuración del controlador

Para configurar el controlador para el control de temperatura, seguid los siguientes pasos:

1. **Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Setup (set)* del menú principal. Acceder al modo Setup presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s.**
2. Aparece el parámetro *"in-t"* para seleccionar el tipo de entrada. Seleccionar con las flechas el valor 21 (entrada tensión de 0 a 10V).
3. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-H"*, selección del límite superior de escala. Seleccionar 1000.
4. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"in-L"*, selección del límite inferior de escala. Seleccionar 0.
5. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"dP"*, selección del punto decimal. Seleccionar 1. De esta forma, se asigna a la variable de entrada el rango de 0 a 100.0, así, se convierten los voltios en ºC, y el Display No. 1 muestra la variable controlada expresada en ºC.
6. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ dos veces. Aparece el parámetro *"öUt 1"*, asignación de la salida del controlador PID a la salida de control 1 (salida analógica principal). Seleccionar COOL (salida de frío).**
7. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ . Aparece el parámetro *"öUt 2"*, asignación de la salida de control 2 (salida relé). Seleccionar HEAT (salida de calor). Así, se asigna la salida de calor a la salida de control 2, que es a relé, para atacar a la entrada del amplificador del calefactor.**
8. **Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ tres veces. Aparece el parámetro *"örEu"*, selección del signo de la realimentación. Seleccionar "ör-r" (operación inversa). Así, se configura el signo negativo de la realimentación.**
9. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Nivel 2 (Lv-2)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Ajustar los límites máximo y mínimo de la acción de control a 100% y -100% respectivamente. Para ello presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ varias veces hasta que aparezca óL-H, y ajustarlo a 100. Presionar nuevamente la tecla ⊂↵⊃ hasta que aparezca óL-L, y ajustar el valor a -100.**

10. **Presionar la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. para regresar al menú principal. Emplear las teclas "más" y "menos" para ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)*, y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Presionar brevemente la tecla ⊂↵⊃ hasta que aparezca "*CP*", para seleccionar el periodo de control de la salida a relé (periodo del PWM). Seleccionar 10 segundos.**

4.3. Ajuste experimental basado en el auto-ajuste del controlador E5CK.

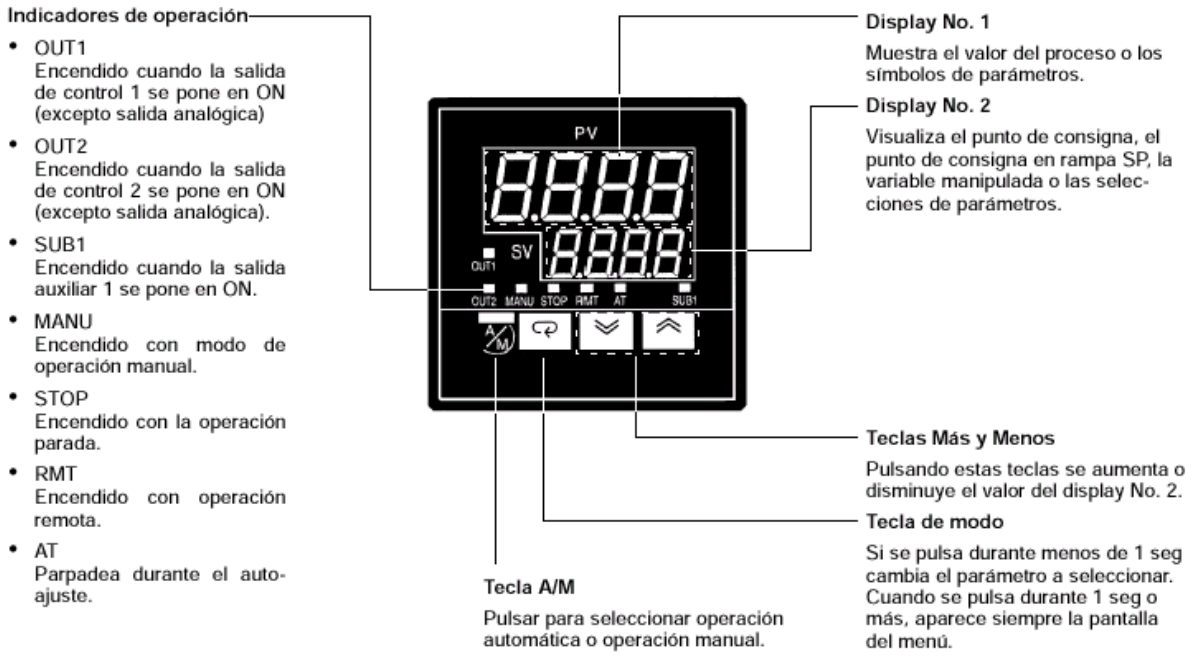
El controlador E5CK implementa un algoritmo propio de autoajuste, en el que se configura como un controlador todo/nada con histéresis, lo que provoca que el sistema oscile. Para que el experimento funcione bien, éste debe iniciarse cuando la temperatura está aproximadamente en el valor de referencia.

- ***Realización del experimento de autoajuste e implementación del controlador PID***

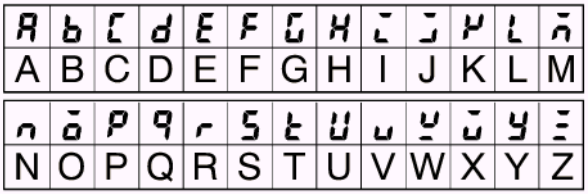
18. **Ir al menú de Expansión (Eut) y fijar el valor del parámetro At-G entre 0.5 y 2, para configurar el autoajuste. Este parámetro determina la robustez del autoajuste. Cuanto más alto, más robusto y lento es el controlador.**
11. **Fijar la referencia en 55.0, y, una vez la temperatura se estabiliza aproximadamente en 55º, ejecutar el auto-ajuste del regulador. Para ello, ir hasta el *modo Nivel 1 (Lv-1)* y acceder al mismo presionando la tecla ⊂↵⊃ durante 1s. Aparece el parámetro *"At"*, empleado para cancelar/ejecutar la experiencia auto-ajuste. Seleccionar "AT-2". En ese momento el controlador empieza a hacer el experimento para autoajustar los parámetros del regulador PID. Cuando deja de parpadear el *indicador de operación AT*, ya está autoajustado el controlador.**
12. **Ir al menú correspondiente para leer los valores de los parámetros del PID autoajustado, para compararlos con los de otras mesas, en función del AT-G configurado.**
13. **Si se obtiene un valor de P muy bajo, que produce una respuesta oscilatoria, poner a mano los parámetros P, i y d del control de calor (P=20, i=136, d=30), y fijar el coeficiente de frío, C-SC, a 0.5.**
14. **Esperar a que se estabilice en 55, y cambiar la referencia a 40.0, comprobando la acción de control de frío y esperar a que se estabilice.**

ANEXO. Operación con el Controlador Digital E5CK

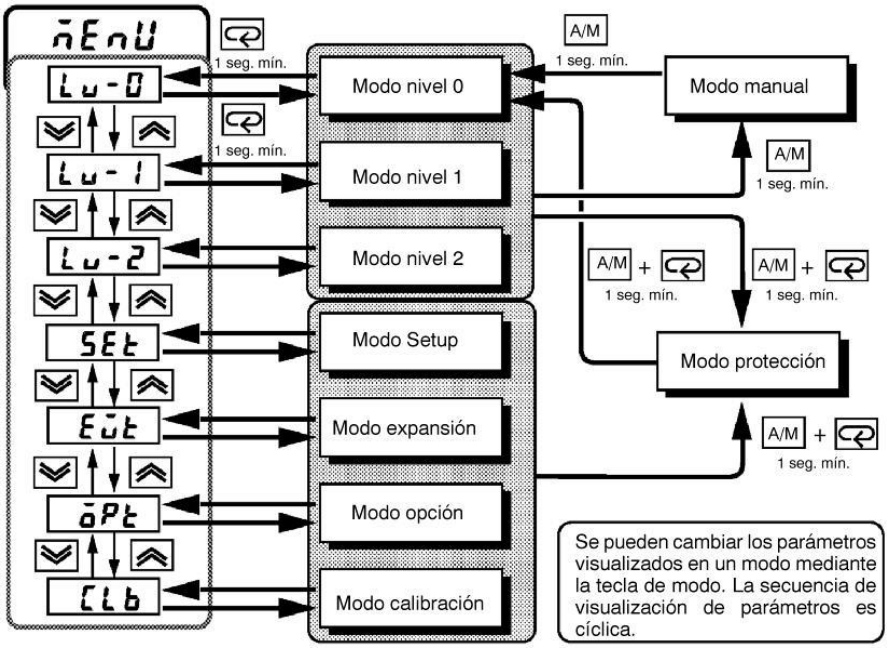
La pantalla del controlador digital se estructura conforme se indica en la figura siguiente:



La siguiente tabla muestra la correspondencia entre los símbolos empleados por el controlador digital y los caracteres del alfabeto:



La siguiente figura muestra la forma y el orden en el que se puede acceder a los diferentes modos que incorpora el menú del controlador E5CK.



Descripción del menú:

- *Modo Protección* Limita la utilización de las teclas A/M y de menú. La función de protección previene la modificación no deseada de parámetros y la conmutación entre operación automática y manual.

- *Modo Manual* Se puede cambiar el controlador a operación manual. Sólo en este modo se puede cambiar manualmente la variable manipulada (acción de control).

- *Modo Nivel 0* Seleccionar el controlador en este modo durante la operación normal. En este modo, se puede cambiar el punto de consigna durante la operación y arrancar y parar la operación del controlador. El valor del proceso, la rampa SP y la variable manipulada sólo se pueden visualizar en este modo.

- *Modo Nivel 1* Modo principal para ajustar el control. Ejecutar en este modo el AT (auto-ajuste) y seleccionar los valores de alarma, el periodo de control y los parámetros del controlador PID[2].

- *Modo Nivel 2* Modo auxiliar para ajustar el control. En este modo, seleccionar los parámetros para limitar la variable manipulada y el punto de consigna, cambiar entre modos local y remoto y seleccionar la alarma de rotura de lazo (LBA), histéresis de alarma y el valor del filtro digital de entradas (Inf).

- *Modo Setup* Modo para seleccionar las especificaciones básicas. En este modo, seleccionar los parámetros que se deben chequear o seleccionar antes de la operación, tales como tipo de entrada (ver figura 5.7), escala, asignaciones de salida y operación directa/inversa.

- *Modo Expansión* Modo para seleccionar las funciones expandidas. En este modo se selecciona el ST (self-tuning), alfa, limitador de selección de SP, control ON/OFF o PID, método de reset de la secuencia de standby, inicializar parámetros y seleccionar el tiempo para volver automáticamente al display de monitorización.

- *Modo Opción* Modo para seleccionar las funciones opcionales. Seleccionar este modo sólo cuando se haya instalado la unidad opcional en el controlador. En este modo, seleccionar las condiciones de comunicación, salida transfer y parámetros de entrada de evento para que concuerden con la unidad opcional colocada en el controlador.

- *Modo Calibración* Modo para calibrar las entradas y la salida transfer. Se calibra el tipo de entrada seleccionada. Sin embargo la salida transfer se puede calibrar sólo cuando se ha seleccionado la unidad de comunicaciones (E53-CKF) en el controlador.

Entradas admitidas por el controlador E5CK, y códigos de selección:

Termorresistencia de platino

Entrada (seleccionable por interruptor)		JPt100	Pt100
Rango	°C	–199.9 a 650.0	–199.9 a 650.0
	°F	–199.9 a 999.9	–199.9 a 999.9
Código de tipo de entrada		0	1

Termopar

Entrada (seleccionable por interruptor) (ver nota)		K1	K2	J1	J2	T	E	L1	L2	U	N	R	S	B	W	PLII
Rango	°C	–200 a 1,300	0.0 a 500.0	–100 a 850	0.0 a 400.0	–199.9 a 400.0	0 a 600	–100 a 850	0.0 a 400.0	–199.9 a 400.0	–200 a 1,300	0 a 1,700	0 a 1,700	100 a 1,800	0 a 2,300	0 a 1,300
	°F	–300 a 2,300	0.0 a 900.0	–100 a 1,500	0.0 a 750.0	–199.9 a 700.0	0 a 1,100	–100 a 1,500	0.0 a 750.0	–199.9 a 700.0	–300 a 2,300	0 a 3,000	0 a 3,000	300 a 3,200	0 a 4,100	0 a 2,300
Código de tipo de entrada		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Nota: La selección inicial es 2 (K1).

Corriente/Tensión

Entrada (seleccionable por interruptor)	Entrada de corriente		Entrada de tensión		
	4 a 20 mA	0 a 20 mA	1 a 5 V	0 a 5 V	0 a 10 V
Rango	Uno de los siguientes rangos dependiendo de los resultados del proceso escalar –1999 a 9999 –199.9 a 999.9 –19.99 a 99.99 –1.999 a 9.999				
Código de tipo de entrada	17	18	19	20	21