



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño de sistema de climatización con control adaptativo

Air Conditioning System Design with Adaptive Control

Autor

Ignacio Enríquez Romero

Director

Javier Esteban Escaño

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2021



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Diseño de sistema de climatización con
control adaptativo

Air Conditioning System Design with
Adaptive Control

424.21.56

Autor: Ignacio Enríquez Romero

Director: Javier Esteban Escaño

Fecha: 20 de Septiembre de 2022

INDICE BREVE

1. Introducción.....	1
2. Marco teórico	7
3. Estado del arte.....	23
4. Desarrollo	28
5. Conclusiones	71
6. Bibliografía	72

INDICE DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1. Resumen.....	1
1.2. Abstract	1
1.3. Palabras clave	1
1.4. Motivación.....	1
1.5. Objetivos	2
1.6. Antecedentes.....	3
1.6.1. Introduction to PRAC (Pattern Recognition Adaptive Control).....	3
1.6.2. Predictive-Adaptive Temperature Control of Molten Glass	4
2. Marco teórico	7
2.1. Control lineal	7
2.1.1. P (Proporcional)	7
2.1.2. PI (Proporcional e integral)	7
2.1.3. PID (Proporcional, integral y derivativo).....	8
2.2. Control no lineal.....	9
2.2.1. Control adaptativo por modelo de referencia (MRAC).....	9

INDICES

2.2.2. Control adaptativo L1	12
2.2.3. Control adaptativo de reconocimiento de patrones (PRAC)	17
3. Estado del arte	23
3.1. Un controlador adaptativo de reconocimiento de patrones mejorado (PRAC+)	23
4. Desarrollo	28
4.1. Espacio a climatizar y cálculo de cargas térmicas.....	28
4.1.1.1. Ventilación.....	30
4.1.1.2. Calefacción	32
4.1.1.3. Refrigeración	33
4.2. Sistema de climatización	34
4.2.1. Elementos comerciales.....	36
4.3. Diagramas	38
4.3.1. Diagramas UML	38
4.3.1.1. Diagramas de actividad	38
4.3.1.1. Casos de uso	41
4.3.2. Diagramas de bloques	42
4.4. Esquemas	44
4.4.1. Esquema eléctrico	46
4.4.2. Esquema electrónico	48
4.5. Diseño del controlador	50
4.5.1. Teoría de control	50
4.5.2. Código.....	53
4.6. Desarrollo del código de control y simulación	53
4.6.1. Componentes y conexionado	53
4.6.2. Conexión a Simulink	55
4.6.3. Diseño del algoritmo de control	58
5. Conclusiones	71
6. Bibliografía	72
6.1. Referencias bibliográficas.....	72
6.2. Otras fuentes de apoyo bibliográfico	74

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Diagrama de bloques de PRAC en un proceso de control (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)	4
Ilustración 2: Diagrama de control de un sistema VAV (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)	4
Ilustración 3: Comparación PID/Control Adaptativo (AC) (Gough, 1997)	6
Ilustración 4: Diagrama de control PID (Iñigo, 2013)	9
Ilustración 5: Esquema básico MRAC (Nguyen, 2018).....	10
Ilustración 6: Arquitectura directa.....	14
Ilustración 7: Arquitectura indirecta	14
Ilustración 8: Estructura indirecta con filtro paso bajo	14
Ilustración 9: Sistema de referencia conseguido por adaptación rápida.....	15
Ilustración 10: Sistema de diseño para definir las especificaciones de control...	16
Ilustración 11: Diagrama de bloques para implementar PRAC (Seem, 1998)	18
Ilustración 12: Diagrama de bloques para la simulación del sistema (Seem, 1998)	19
Ilustración 13: Diagrama de flujo de la estructura del controlador adaptativo de reconocimiento de patrones (Seem, 1998).....	19
Ilustración 14: Parámetros usados para caracterizar la respuesta en bucle cerrado durante cambios de valor objetivo (Seem, 1998).....	21
Ilustración 15: Diagrama de flujo de PRAC+ (Seem, 2006)	24
Ilustración 16: Condiciones cuando la proporción de oscilación es igual a 0 (Seem, 2006).....	26
Ilustración 17: Planta primera de oficinas acotado	28
Ilustración 18: Planta baja de oficinas acotado	29

INDICES

Ilustración 19: Planta primera de oficinas	29
Ilustración 20: Planta baja de oficinas	30
Ilustración 21: Diagrama de actividad encendido general.....	39
Ilustración 22: Diagrama de actividad encender nueva habitación.....	40
Ilustración 23: Diagrama de actividad mantener temperatura	41
Ilustración 24: Diagrama de actividad apagar sistema.....	41
Ilustración 25: Diagrama general de casos de uso	42
Ilustración 26: Diagrama de bloques de alto nivel.....	43
Ilustración 27: Diagrama de bloques de bajo nivel	44
Ilustración 28: Diagrama de bloques de bajo nivel descentralizado	44
Ilustración 29: Diagrama de control	52
Ilustración 30: Conexión de sistema a simular.....	55
Ilustración 31: Configuración serial Simulink	56
Ilustración 32: Configuración Simulink Serial Receive.....	57
Ilustración 33: Diagrama completo Simulink	58
Ilustración 34: Salida de simulación enfriando para medir tiempo.....	59
Ilustración 35: Salida de simulación calentando para medir tiempo.....	60
Ilustración 36: primer diagrama de control diseñado.....	61
Ilustración 37: Temperatura en la simulación 1.1	62
Ilustración 38: k_p en la simulación 1.1	62
Ilustración 39: k_i en la simulación 1.1	63
Ilustración 40: k_d en la simulación 1.1	63
Ilustración 41: Temperatura en la simulación 1.2	64
Ilustración 42: Temperatura en la simulación 2.1	65
Ilustración 43: k_p en la simulación 2.1	66
Ilustración 44: k_i en la simulación 2.1	66
Ilustración 45: k_d en la simulación 2.1	67
Ilustración 46: Temperatura en la simulación 3.1	69

Ilustración 47: Temperatura en la simulación 3.270

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caudales de aire exterior, en dm^3/s por persona (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios., 2007)31

Tabla 2: Cálculos pérdidas ventilación32

Tabla 3: Cálculos pérdidas calefacción33

Tabla 4: Lista de pérdidas / elemento.....34

Tabla 5: Lista de elementos comerciales para el sistema37

Tabla 6: Otros elementos comerciales necesarios38

Tabla 7: Elementos para simulación55

1. INTRODUCCIÓN

1.1. RESUMEN

Se supone un espacio a climatizar concreto, con unas necesidades energéticas específicas y se diseña un sistema de climatización.

Para este sistema, se eligen los componentes necesarios a instalar, se diseña la electrónica necesaria y un control adaptativo, para que éste, además de ser usado en este sistema, pueda usarse en cualquier otro y ser eficiente.

No se consigue hacer el control a semejanza de un antecedente, así que se diseña uno original, basado en un PID con parámetros autoregulables, que da unos resultados satisfactorios.

1.2. ABSTRACT

A space with specific energy needs is selected and an air conditioning system is designed.

For this system, the right components to install are selected and the electronics and an adaptive control are designed, to make this and any other similar project work efficiently.

A controller similar to the one needed is designed and tested, with no success, therefore, a new adaptive controller is designed from scratch, based on a PID with autotuned parameters, and its results are satisfactory.

1.3. PALABRAS CLAVE

Control, climatización, adaptativo, energía, temperatura.

1.4. MOTIVACIÓN

La climatización de interiores se ha llevado usando durante muchos años y en todo tipo de espacios, desde en plantas de trabajadores hasta en edificios residenciales. Son sistemas que usamos a diario, tanto en invierno como en verano, para mantener una temperatura estable adecuada a la actividad a realizar en la

estancia. En general, estos sistemas funcionan correctamente, sin embargo, de entre los elementos que los componen, hay al menos uno que se podría mejorar: el sistema de control.

El control de la temperatura en muchos de los sistemas de climatización consiste en el encendido/apagado según si la temperatura real sube o baja con respecto a la temperatura objetivo. En otros sistemas, el control consiste en un PID, el cual puede ayudar a ser más eficiente, ya que tiene en cuenta la inercia del sistema y usa menos energía para llegar a la temperatura objetivo, aunque a veces incluye efectos no deseados como el windup¹. Aun así, sigue habiendo un problema, y es que se instalan los mismos sistemas de climatización con los mismos parámetros de control en edificios y estancias completamente diferentes, por lo que la actuación de los sistemas no llega a ser eficiente, usando más energía de la necesaria en algunos casos y en otros, tardando demasiado tiempo en estabilizar la temperatura de la estancia.

Con el desarrollo de este trabajo, se pretende cambiar los controles tradicionales por un control adaptativo. Así, una aplicación de este tipo de control a un sistema de climatización en cualquier edificio y estancia, hará que no se tengan que cambiar parámetros para su correcto funcionamiento, ya que el algoritmo cambia sus propios parámetros para responder correctamente a las entradas del sistema.

1.5. OBJETIVOS

Los objetivos principales de este proyecto son aprender a:

- Analizar diferentes esquemas de control para elegir el más adecuado.
- Traducir el esquema elegido a términos matemáticos, teniendo en cuenta el caso particular del sistema (software y hardware) a usar.
- Diseñar una electrónica que comunique todos los componentes del sistema y que se pueda programar con el control elegido.
- Escribir el software de control en lenguaje C++.

¹ En la jerga de control, se denomina windup al efecto que tiene el sistema al tardar mucho en reaccionar ante una perturbación o cambio de referencia después de que se haya producido la saturación del actuador.

1.6. ANTECEDENTES

A continuación, se analizarán sistemas de control con un fin similar al de este trabajo, que se han usado en elementos comerciales; con esto se asegura la funcionalidad de cada sistema en la práctica.

1.6.1. Introduction to PRAC (Pattern Recognition Adaptive Control)

Este es un sistema de control de Johnson Controls, que es un conglomerado multinacional productor de, entre otras cosas, equipamiento HVAC (del inglés: calefacción, ventilación y aire acondicionado) para edificios.

En la introducción, se deja claro que el control PID tiene buenos resultados sólo si los sistemas son lineales (ya que es un control lineal y simétrico, con parámetros constantes) y si se ha tomado el tiempo necesario en ajustar sus parámetros. Si se quiere controlar un sistema no lineal o no se quiere usar tiempo en ajustar los parámetros de control, un control de tipo adaptativo es la mejor opción: en este caso se trata del control adaptativo de reconocimiento de patrones (PRAC).

El sistema de climatización que se usa es un VAV (volumen de aire variable), en el que se controla el ángulo de los reguladores de flujo que dejan pasar más o menos aire, dejando la temperatura de éste constante; la relación entre el ángulo de apertura de las rendijas y el caudal de aire que pasa por ellas no es lineal (el caudal de aire crece rápidamente al abrir de 90° a 80° y crece muy poco al abrir de 10° a 0° , estando cerrado en 90° y completamente abierto en 0°), por lo que el control usado es un PI (proporcional e integral) pero PRAC, de modo que K_p y K_i (los parámetros del control PI) se reajustan dependiendo de la situación siempre y cuando, el control esté en bucle cerrado. En la siguiente imagen se muestra el diagrama de control de este proceso. (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)

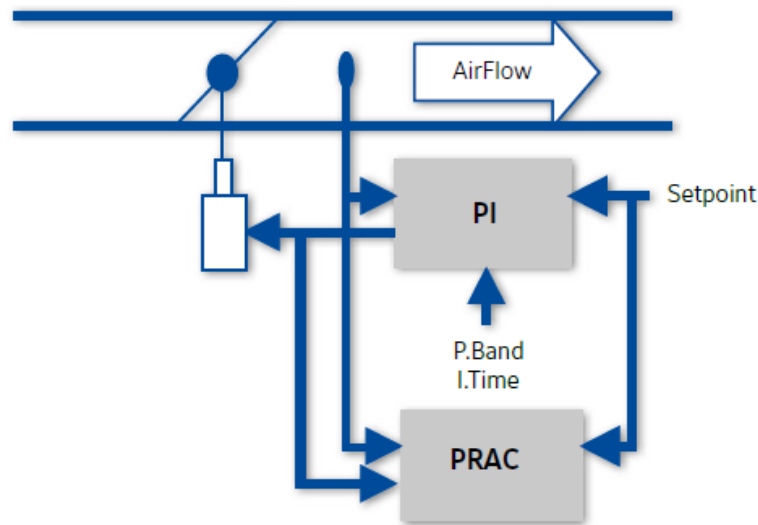


Ilustración 1: Diagrama de bloques de PRAC en un proceso de control (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)

El PRAC se puede implementar en cualquier control PI, pero en este caso se usa para enfriar una estancia con un sistema VAV. El controlador de la siguiente imagen consigue la temperatura objetivo gracias a lazos de control en el PI que ajustan el controlador. (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)

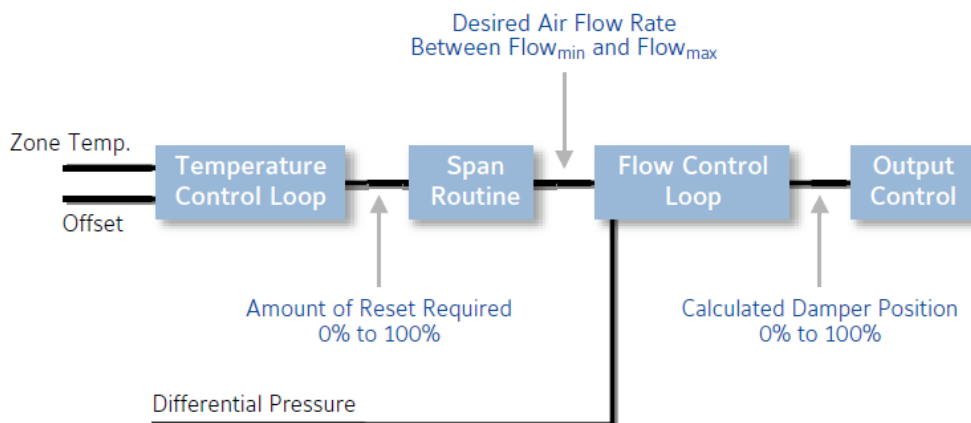


Ilustración 2: Diagrama de control de un sistema VAV (Regional Controls Team & Johnson Controls, Inc., 2010)

1.6.2. Predictive-Adaptive Temperature Control of Molten Glass

Este sistema de control fue desarrollado por las tres empresas Andritz Automation, que es una proveedora de sistemas de control para plantas y máquinas;

Introducción

Universal Dynamics Technologies Inc., que es una empresa que proporciona tecnología de control para procesos y servicios de ingeniería para clientes industriales; y Consumers Glass Co., que es una empresa que fabrica botellas de cristal.

La temperatura del vidrio fundido es crítica para la producción de contenedores de cristal en máquinas moldeadoras automatizadas. Esta temperatura determina la cantidad de vidrio en el molde, por lo que afecta a la calidad del contenedor final. Hay fluctuaciones de temperatura frecuentes en el vidrio mientras sale del horno, y se necesitaban 3 secciones con controles PID para mantener la temperatura antes de que se corten los trozos para ser moldeados. La respuesta tan lenta de estos controladores, combinada con los cambios en el ritmo de producción y los cambios físicos del vidrio producidos por la temperatura, hacen que el control PID sea difícil de aplicar. (Gough, 1997)

Cuando el vidrio sale del horno, pasa por tres secciones que se encargan de regular la temperatura de éste, con una combinación de válvulas de gas ardiendo para calentar y válvulas de mariposa reguladoras de corrientes de aire para enfriar. Estas tres secciones estaban controladas por PID's y el objetivo era reemplazarlos por controles predictivos-adaptativos para que la temperatura del vidrio a la hora de ser moldeado fuera más estable y el número de contenedores de cristal rechazados se redujera. (Gough, 1997)

Se instalaron controladores predictivos-adaptativos en las tres secciones por las que pasa el vidrio fundido después del horno. La gran ventaja de este tipo de controlador es la técnica usada para modelar el proceso, denominada Dynamic Modeling Technology (DMT), o tecnología de modelado dinámica en español. (Gough, 1997)

DMT es capaz de construir una función de transferencia usando series de funciones ortonormales de Laguerre. El controlador adaptativo, cuando se usa DMT, puede adaptarse automáticamente a los cambios en ganancias, constantes de tiempo o retardos para mantener un control estable. También es capaz de predecir la respuesta del proceso, para que el valor objetivo se alcance lo más rápido posible sin excederse mucho. (Gough, 1997)

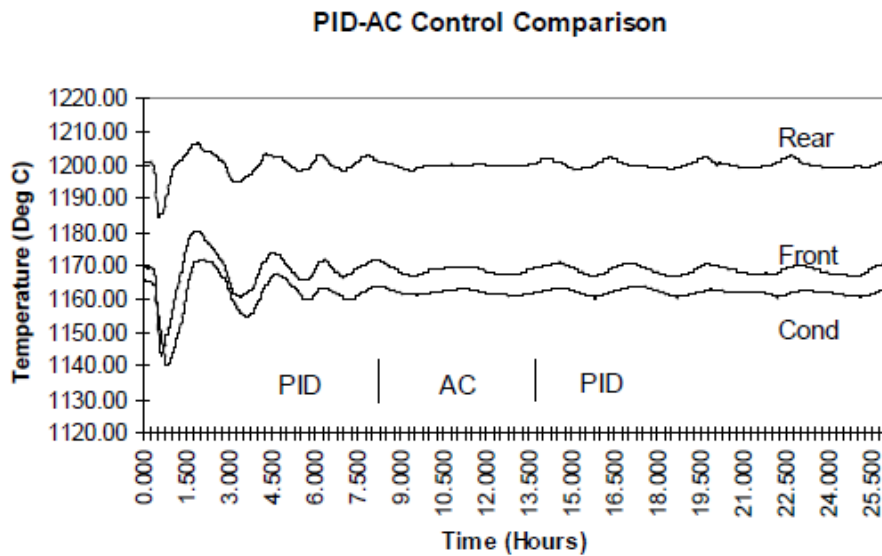


Ilustración 3: Comparación PID/Control Adaptativo (AC) (Gough, 1997)

En la imagen anterior se comparan periodos en los que se usan controladores PID y con uno en el que se usan controladores adaptativos. Se puede observar cómo la temperatura permanece más estable en el periodo de AC (control adaptativo).

Esta mejora de control de temperatura supuso las siguientes mejoras:

- Reducción del tiempo en alcanzar la temperatura objetivo en un 50%.
- Incremento de calidad sobre-estándar entre un 27% y un 40% de los contenedores.
- Reducción significativa de mantenimiento, ya que no se requiere el reajuste de los parámetros de control como ocurría con el PID.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se estudian diferentes técnicas de control, incluyendo controles adaptativos. Se pretende entender cómo funciona el control de un sistema, conocer los diferentes tipos que hay y cuáles son los más adecuados para el sistema con el que se trabajará.

2.1. CONTROL LINEAL

Un control se dice que es lineal, si existe una constante de proporcionalidad única que relaciona los incrementos de señal de salida con los correspondientes incrementos de señal de entrada. Los sistemas ideales son lineales, por lo que, si se puede aproximar un sistema real a uno lineal, se puede usar un controlador lineal con un error pequeño por no linealidad. (Cifuentes Estrada et al., 2015)

2.1.1. *P (Proporcional)*

El control proporcional es un tipo de control con retroalimentación. Es la forma más simple de control continuo que se puede usar en un sistema de bucle cerrado. Su respuesta es más rápida que la mayoría del resto de controladores. Sin embargo, no siempre lleva al sistema al valor objetivo, dando una diferencia en la salida llamada offset.

La salida de este control se calcula multiplicando directamente el error del sistema (la diferencia entre la salida medida y el valor objetivo) por una constante (K_p). (Woolf, 2009)

La ecuación es la siguiente:

$$c(t) = k_p * e(t)$$

Donde:

- $c(t)$ = salida del controlador
- $e(t)$ = error
- k_p = ganancia del controlador (constante)

2.1.2. *PI (Proporcional e integral)*

El control integral es capaz de llevar la señal al valor objetivo y de eliminar cualquier desviación/offset que pueda existir, aunque su respuesta es más lenta, por depender de más parámetros que el control proporcional. Un controlador integral afecta al sistema al responder al error acumulado en el tiempo. (Woolf, 2009)

La salida del controlador integral tiene la siguiente forma:

$$c(t) = k_i \int e(t) dt$$

Siendo:

- $c(t)$ = Salida del controlador
- k_i = ganancia constante integral
- $e(t)$ = error

El uso del control integral y proporcional puede verse como una suma de los dos controles trabajando en paralelo. El resultado tiene una respuesta más lenta que la del controlador proporcional por sí mismo, pero más rápida que la del integral, con la ventaja de que se disminuye el offset significativamente.

2.1.3. PID (Proporcional, integral y derivativo)

Al contrario que los controles integral y proporcional, el control derivativo es un control de feedforward, es decir, que anticipa las condiciones del proceso analizando el cambio en el error, para minimizar su cambio. El beneficio más importante de estos controladores es la resistencia al cambio en el sistema, incluyendo oscilaciones.

El control derivativo no lleva al sistema a un estado estable, así que es necesario su combinación con controles proporcionales y/o integrales.

La salida de este control se calcula según el ritmo de cambio del error en el tiempo; cuanto mayor sea, más pronunciada será la respuesta del controlador. (Woolf, 2009)

La salida de un controlador derivativo tendrá la siguiente forma:

$$c(t) = k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

- $c(t)$ = salida del controlador
- k_d = ganancia constante derivativa

Marco teórico

- $de(t)$ = cambio diferencial del error
- dt = cambio diferencial del tiempo

Al usarse los controles proporcional, integral y derivativo juntos, tienen la siguiente forma en un diagrama de bloques de control:

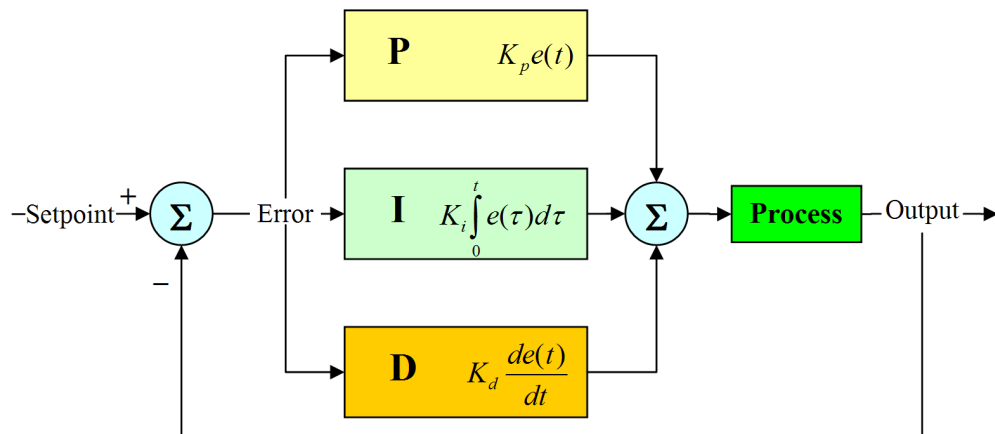


Ilustración 4: Diagrama de control PID (Iñigo, 2013)

Y la salida matemática del control PID es la siguiente:

$$c(t) = k_p * e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

2.2. CONTROL NO LINEAL

Un controlador no lineal intenta adaptarse a la dinámica real de un sistema (que no es lineal).

La no linealidad se ve claramente, por ejemplo: cuando el propulsor de un avión no produce el mismo empuje a nivel del mar que a miles de metros de altura, debido al cambio de densidad de la atmósfera (pasa lo mismo al girar en roll, pitch o yaw); al calentar una casa, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del edificio (gradiente térmico), más calor se perderá en menos tiempo.

Este control se usa en sistemas que difícilmente se pueden linealizar o, aunque el error por no linealidad sea relativamente pequeño, para ahorrar costes.

A continuación, se verán diferentes tipos de control no lineal.

2.2.1. Control adaptativo por modelo de referencia (MRAC)

Un diagrama de bloques de un control adaptativo por modelo de referencia (de aquí en adelante MRAC) típico se muestra en la siguiente imagen:

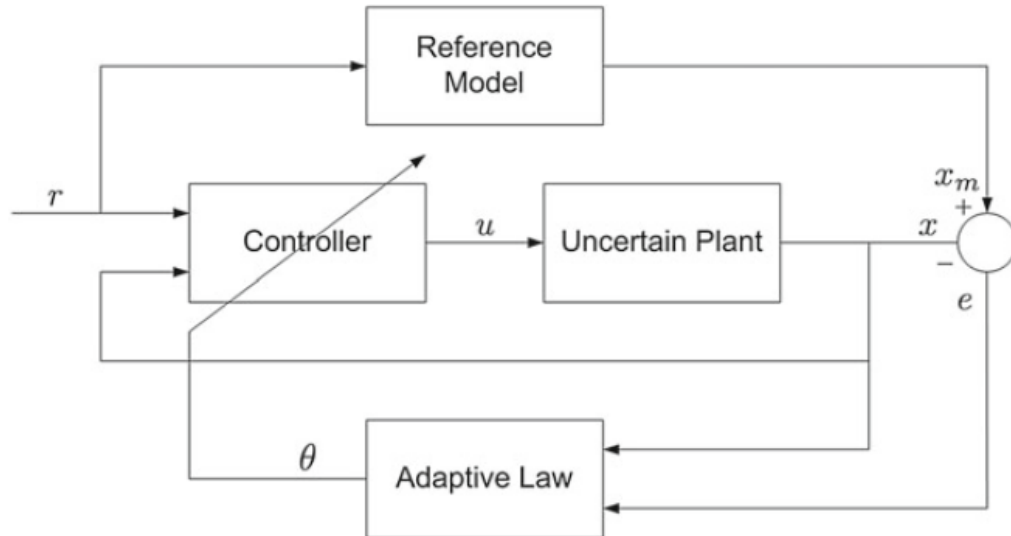


Ilustración 5: Esquema básico MRAC (Nguyen, 2018)

Generalmente se compone de estas 4 partes: una planta que contiene parámetros desconocidos; un modelo de referencia que especifica la salida deseada del sistema de control; unas reglas de adaptación, que contienen parámetros ajustables, y un controlador con un mecanismo de adaptación para actualizar los parámetros ajustables. (Slotine & Li, 1991)

Se considera que se conoce la estructura de *la planta o el proceso*, pero no sus parámetros. Para procesos no lineales, esto implica que la estructura de las ecuaciones dinámicas es conocida, pero que algunos parámetros no lo son. (Slotine & Li, 1991)

Se usa un *modelo de referencia* para especificar la respuesta ideal del sistema de control al comando externo; provee la respuesta de la planta ideal, que el mecanismo de adaptación debe seguir para ajustar los parámetros. Al diseñar el modelo de referencia, se tiene que tener en cuenta dos aspectos: que refleje el rendimiento del sistema real, incluyendo aspectos como el tiempo de aumento, el tiempo de asentamiento o características del overshoot (sobre-oscilación o exceso de subida); y que el comportamiento que tenga sea asumible por el sistema de control adaptativo. (Slotine & Li, 1991)

El *controlador* debe tener parámetros ajustables y capacidad de seguimiento, para que haya la posibilidad de que ocurra un "seguimiento convergente" (tracking convergence): cuando los parámetros de la planta no se conocen, se le llama

Marco teórico

seguimiento convergente a que el mecanismo de adaptación ajuste los parámetros del controlador para que hagan que la salida de la planta sea idéntica a la salida del modelo de referencia. (Slotine & Li, 1991)

El *mecanismo de adaptación* se usa para ajustar los parámetros en el controlador. Las reglas de adaptación buscan parámetros que hagan que la respuesta de la planta sea la misma que la del modelo de referencia. Un problema en el diseño de la adaptación es sintetizar un mecanismo de adaptación que garantice que el sistema de control permanezca estable y que el error converja a cero, mientras los parámetros se cambian. Para conseguir esto, hay muchas técnicas que se usan en el control no lineal, como la teoría de Lyapunov, la teoría de la hiperestabilidad de Popov y la teoría de la pasividad. (Slotine & Li, 1991)

Hay dos tipos de MRAC: directo e indirecto. Un control adaptativo directo se puede expresar de la siguiente manera:

$$u = k_x(t)x + k_r(t)r$$

Donde $k_x(t)$ y $k_r(t)$ son ganancias de control, ajustables a través de las reglas de adaptación. Así que el control directo ajusta un mecanismo de control de un sistema directamente para cancelar cualquier incertidumbre indeseada para que el rendimiento del sistema de control pueda ser recuperado en la presencia de una incertidumbre significativa.

Por el contrario, un controlador indirecto consigue el mismo objetivo ajustando las ganancias de control indirectamente, expresándose así:

$$u = k_x(p(t))x + k_r(p(t))r$$

Donde $p(t)$ son parámetros del sistema que son estimados en línea para actualizar las ganancias de control.

(Nguyen, 2018)

Se considera el siguiente sistema lineal e invariante en el tiempo:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = u$$

Se diseña un controlador para que la salida $x(t)$ siga un comando constante $r(t)$ y tenga un funcionamiento requerido con una amortiguación en bucle cerrado de ζ_m y una frecuencia ω_m . Se diseña un controlador PD:

$$u = k_p e + k_d \dot{e} + k_r r$$

Donde $e(t) = r(t) - x(t)$, para conseguir la característica de bucle cerrado siguiente:

$$\ddot{x} + (2 \zeta \omega_n + k_d) \dot{x} + (\omega_n^2 + k_p) x = (k_r + k_p)r$$

Se definen las ganancias:

$$\omega_n^2 + k_p = \omega_m^2 \rightarrow k_p = \omega_m^2 - \omega_n^2$$

$$2 \zeta \omega_n + k_d = 2 \zeta_m \omega_m \rightarrow k_d = 2(\zeta_m \omega_m - \zeta \omega_n)$$

$$k_r = \omega_n^2$$

Si la frecuencia natural del sistema en lazo abierto ω_n cambia a un nuevo valor ω_n^* desconocido, el sistema en lazo cerrado puede tener una actuación muy diferente si se usan las mismas ganancias que en el control original. Para mantener el mismo funcionamiento requerido, las ganancias de control ideales deben ser:

$$k_p^* = \omega_m^2 - \omega_n^{*2} = k_p + \omega_n^2 - \omega_n^{*2}$$

$$k_d^* = 2(\zeta_m \omega_m - \zeta \omega_n^*) = k_d + 2\zeta(\omega_n - \omega_n^*)$$

$$k_r^* = \omega_n^{*2} = k_r - \omega_n^2 + \omega_n^{*2}$$

Un MRAC directo busca ajustar las ganancias originales k_p , k_d y k_r hacia las ganancias ideales k_p^* , k_d^* y k_r^* , respectivamente, directamente sin conocer el valor de parámetro ω_n^* . En cambio, un MRAC indirecto busca ajustar las ganancias estimando el parámetro ω_n^* y usando esta estimación para recalcular las ganancias como si la estimación fuera el valor real.

(Nguyen, 2018)

2.2.2. Control adaptativo L1

Este control trata una nueva arquitectura para intentar resolver algunos problemas que el resto de controles adaptativos ha tenido durante años.

Las principales características de este tipo de control son:

- Rápida adaptación.
- División entre adaptación y robustez.
- Rendimiento transitorio satisfactorio, sin persistir en la excitación, reconfigurar el control o programar las ganancias.
- Limitaciones del rendimiento reducidas a las limitaciones del hardware.
- Respuesta uniforme transitoria y escalada dependiente de los cambios en la condición inicial, valor del parámetro desconocido y la entrada de referencia.

Marco teórico

Si se toma la formulación del problema más simple para control adaptativo, se tiene el siguiente sistema:

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + b(u + \theta^T(t)x(t)), \quad x(0) = x_0$$

Donde

- A_m es una matriz de Hurwitz conocida que define la dinámica deseada

Donde el controlador nominal en MRAC sería el siguiente:

$$u_{MRAC}(t) = -\theta^T(t)x(t) + k_g r(t)$$

- k_g es la ganancia de compensación
- $r(t)$ es la entrada de referencia deseada

Este controlador convencional compensa perfectamente las incertidumbres en caso de que se conozcan perfectamente y las reemplaza por los valores de compensación dependiendo de la lectura del comportamiento del sistema.

El modelo de referencia es el siguiente:

$$\dot{x}_{des}(t) = A_m x_{des}(t) + b k_g r(t)$$

Este modelo funciona, pero sólo compensa parte de las incertidumbres y no la totalidad.

Lo que hace L1 es pensar que el sistema de referencia es demasiado ambicioso, por lo que en el controlador sólo compensa las incertidumbres que pasen por un filtro paso bajo. Así, se entiende que el comportamiento resultante no será ideal, pero el objetivo de control del sistema estará bien definido.

Controlador nominal en L1:

$$u_{L1}(t) = C(s)\{-\theta^T(t)x(t) + k_g r(t)\}$$

Sistema de referencia alcanzable:

$$\dot{x}_{red}(t) = A_m x_{red}(t) + b \left((1 - C(s))\{\theta^T(t)x_{red}(t)\} + C(s)\{k_g r(t)\} \right)$$

Condición suficiente para la estabilidad:

$$\|(1 - C(s))(sI - A_m)^{-1}b\|_{L1} < \frac{1}{L} \rightarrow \|x_{red}\|_{L\infty} < \infty$$

Donde L es la constante de Lipschitz de una incógnita.

La separación de la identificación del control hace que haya robustez en la presencia de una adaptación rápida.

Las dos primeras versiones de control adaptativo fueron el método indirecto y el método directo. En los años 70 se demostró que la estabilidad de ambos era equivalente, pero los esquemas son los siguientes:

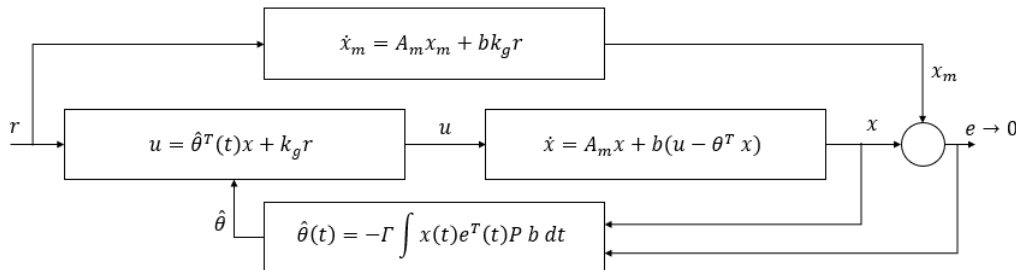


Ilustración 6: Arquitectura directa

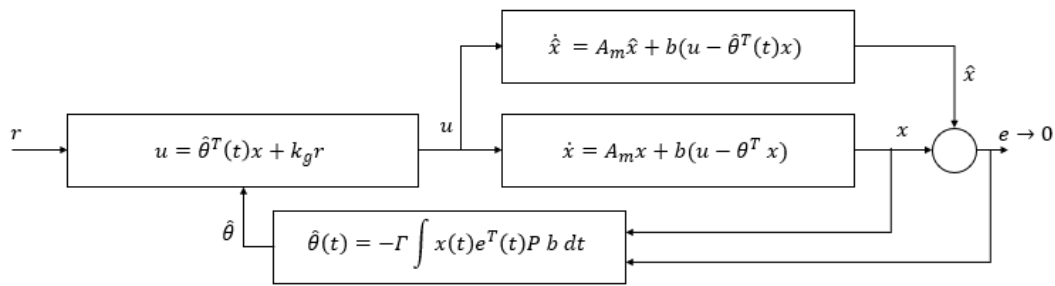


Ilustración 7: Arquitectura indirecta

Si se quisiera modificar la arquitectura directa para usar el filtro paso bajo, no se podría aplicar, ya que la salida destruiría la estructura de la aerodinámica, ya que x_m y x tendrían entradas de diferente dimensión. Sin embargo, en la arquitectura indirecta, sería posible, ya que se puede aplicar en u y que tanto x como \hat{x} tomen la misma entrada.

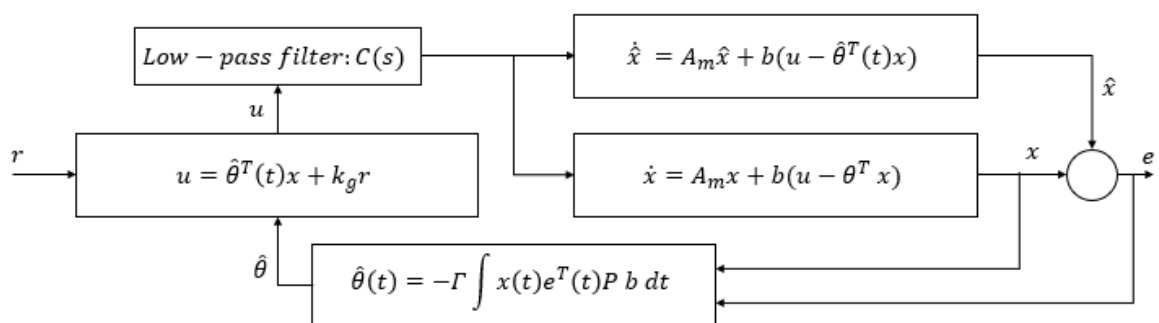


Ilustración 8: Estructura indirecta con filtro paso bajo

Como se le cambia la entrada al sistema de referencia al filtrar, se necesita un nuevo modelo.

Bucle cerrado:

$$s\hat{x}(s) = A_m\hat{x}(s) + b \left((C(s) - 1\{\hat{\theta}^T(t)x(t)\}) + C(s)k_g r \right)$$

$$\hat{x}(s) = (sI - A_m)^{-1}b \left((C(s) - 1\{\hat{\theta}^T(t)(\hat{x}(t) + e(t))\}) + C(s)k_g r \right)$$

$\hat{\theta}^T(t)$ y $e(t)$ están delimitadas y el resto cae en las manos del teorema de la ganancia pequeña (small-gain theorem) y en el lema de Barbalat (Barbalat's lemma), que dice que por la aplicación del filtro, no se pierde la estabilidad.

Para encontrar el modelo de referencia, primero se comparan la señal de esta arquitectura en bucle cerrado y la del objetivo de control.

$$\text{Estado del sistema: } \|x - x_{ref}\|_{L_\infty} \leq \frac{\gamma_1}{\sqrt{\Gamma}}; \quad \lim_{\Gamma \rightarrow \infty} \|x - x_{ref}\|_{L_\infty} = 0$$

$$\text{Señal de control: } \|u - u_{ref}\|_{L_\infty} \leq \frac{\gamma_2}{\sqrt{\Gamma}}; \quad \lim_{\Gamma \rightarrow \infty} \|u - u_{ref}\|_{L_\infty} = 0$$

$$\gamma_2 = \left\| C(s) \frac{1}{c_o^T (sI - A_m) - 1_b} c_o^T \right\|_{L_1} \sqrt{\frac{\bar{\theta}_{max}}{\lambda_{max}(P)} + \|C(s)\theta^T\|_{L_1} \gamma_1} < \infty$$

$$C(s) = 1 \text{ (MRAC)}; \quad \gamma_2 \rightarrow \infty$$

Errores en la inicialización de trayectorias no nulas, conducen a términos exponencialmente decadentes aditivos adicionales en la dependencia de rendimiento.

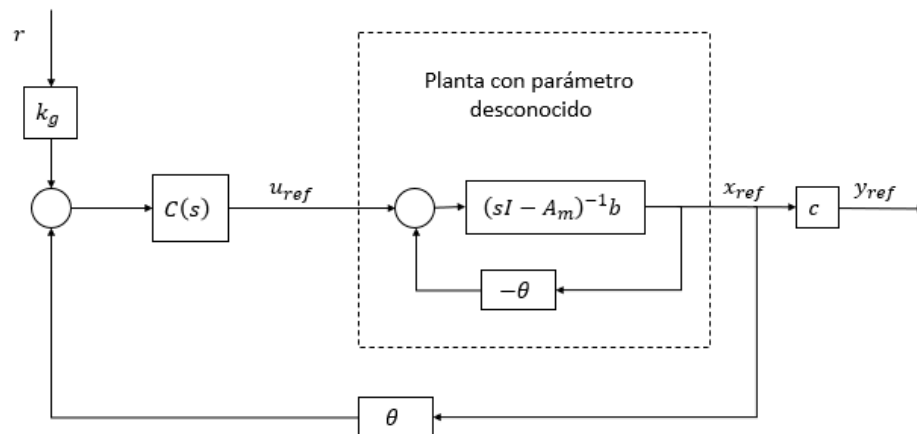


Ilustración 9: Sistema de referencia conseguido por adaptación rápida

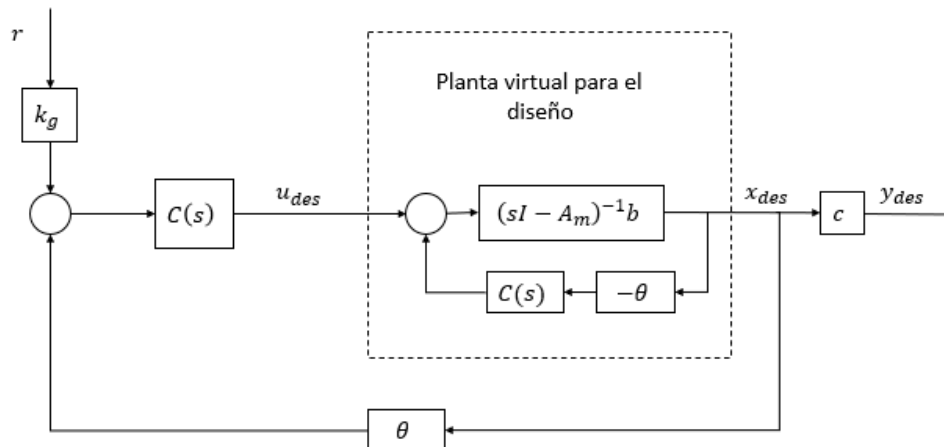


Ilustración 10: Sistema de diseño para definir las especificaciones de control

Se considera un sistema adicional, donde el filtro se encuentra dentro de él, para limpiar la salida de cualquier incógnita.

$$y_{ref}(s) = c^T (I - (C(s) - 1)(sI - A_m)^{-1} b \theta^T)^{-1} (sI - A_m)^{-1} b C(s) k_g r(s)$$

$$y_{des}(s) = c^T (sI - A_m)^{-1} b C(s) k_g r(s)$$

$y_{des}(s)$ es independiente del parámetro desconocido.

Si se operan las dependencias de los dos sistemas, se ve que son proporcionales a λ , que antes tenía que ser menor que 1, pero para tener el sistema más estable y con una mejor respuesta, λ debe tender a 0 (aunque nunca llegar a él). Si $C(s)$ fuera 0 se perdería la dependencia de control.

$$\|y_{ref} - y_{des}\|_{L_\infty} \leq \frac{\lambda}{1 - \lambda} \|c^T\|_{L_1} \|k_g H_0(s) C(s)\|_{L_1} \|r\|_{L_\infty}$$

$$\|u_{ref} - u_{des}\|_{L_\infty} \leq \frac{\lambda}{1 - \lambda} \|C(s) \theta^T\|_{L_1} \|k_g H_0(s) C(s)\|_{L_1} \|r\|_{L_\infty}$$

La condición suficiente para la estabilidad es:

$$\lambda = \|(1 - C(s)) H_0(s)\|_{L_1} \theta_{max} < 1$$

Para tener un mayor rendimiento:

$$\lambda \rightarrow \min$$

Se garantiza unas dependencias de rendimiento uniformes y separadas.

Se usa una ganancia adaptativa alta Γ_c

$$y(t) - y_{ref}(t) = O\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma_c}}\right), \quad u(t) - u_{ref}(t) = O\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma_c}}\right), \quad \forall t \geq 0$$

Marco teórico

Se diseña $C(s)$ para que haga $\lambda = \|(1 - C(s))H_0(s)\|_{L_1} \theta_{max}$ lo suficientemente pequeño:

$$y_{ref}(t) - y_{des}(t) = O(\lambda), \quad u_{ref}(t) - u_{des}(t) = O(\lambda), \quad \forall t \geq 0$$

Se desconecta la adaptación de la robustez:

$$y(t) - y_{des}(t) = O(\lambda) + O\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma_c}}\right), \quad u(t) - u_{des}(t) = O(\lambda) + U\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma_c}}\right), \quad \forall t \geq 0$$

Si $\|(1 - C(s))H_0(s)\|_{L_1} \theta_{max} < 1$, el control adaptativo L1 asegura que los límites de rendimiento son uniformes.

$$\|u(t) - u_{ref}(t)\|_{L_\infty} \approx O\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\right); \quad \|x(t) - x_{ref}(t)\|_{L_\infty} \approx O\left(\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}\right)$$

Además, existe Γ_0 , para que si $\Gamma > \Gamma_0$, el margen de retardo no estará cerca de 0.

$$T_{margin} \geq T_m > 0$$

Donde T_m es el margen de retardo de $H(s) = \frac{C(s)(1+\theta^T \bar{H}(s))}{1-C(s)}$

El margen de ganancia puede ser arbitrariamente mejorado incrementando el dominio de proyección.

(Hovakimyan & Cao, 2010)

2.2.3. Control adaptativo de reconocimiento de patrones (PRAC)

El control adaptativo de reconocimiento de patrones toma como base un control lineal, como lo es un control PI (proporcional e integral) y adapta sus parámetros (K_p y K_i) según lo necesite el sistema en el tiempo, mientras esté en bucle cerrado.

(Seem, 1998)

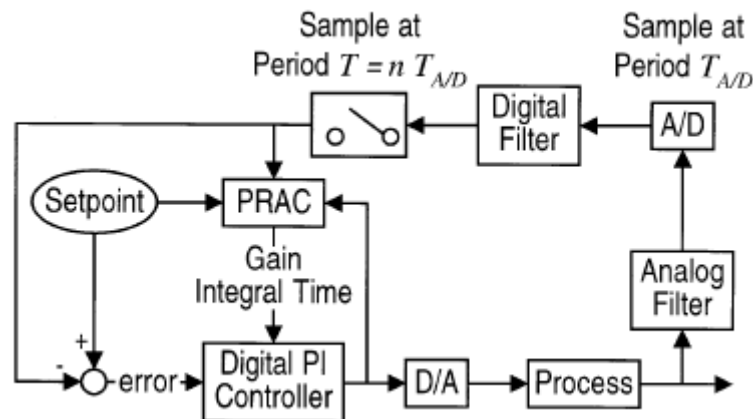


Ilustración 11: Diagrama de bloques para implementar PRAC (Seem, 1998)

Tomando como referencia la ilustración anterior, antes del convertidor analógico a digital (A/D) se usa un filtro analógico para eliminar el ruido de alta frecuencia de la señal. El filtro digital elimina ruido de más baja frecuencia antes de muestrear la salida del proceso. Para crear PRAC, se siguieron los 5 siguientes pasos:

- *Determinar el rango de modelos para sistemas de climatización:* La dinámica de un rango amplio de sistemas térmicos y mecánicos puede ser aproximada por el siguiente modelo:

$$G(s) = \frac{k e^{-\tau_{dead} s}}{1 + s}$$

donde $G(s)$ es la función de transferencia de Laplace, k es la ganancia del proceso, τ_{dead} es el tiempo muerto (delay), y τ es la constante de tiempo del proceso. La relación entre tiempo muerto y la constante de tiempo está entre los siguientes límites: $0.25 \leq \frac{\tau_{dead}}{\tau} \leq 1$

Se puede mantener un buen control cuando la relación entre tiempo de muestreo y tiempo muerto estaba entre los siguientes límites: $0.1 \leq \frac{T}{\tau_{dead}} \leq 1$

- Propuesta y diseño del algoritmo
- *Simulaciones:* La eficacia del algoritmo propuesto se comparó con un controlador óptimo en 100 000 procesos, volviendo a proponer algoritmos nuevos tras probar las iteraciones que habían fallado en mayor medida. Para las simulaciones del sistema, se usa el siguiente diagrama de bloques:

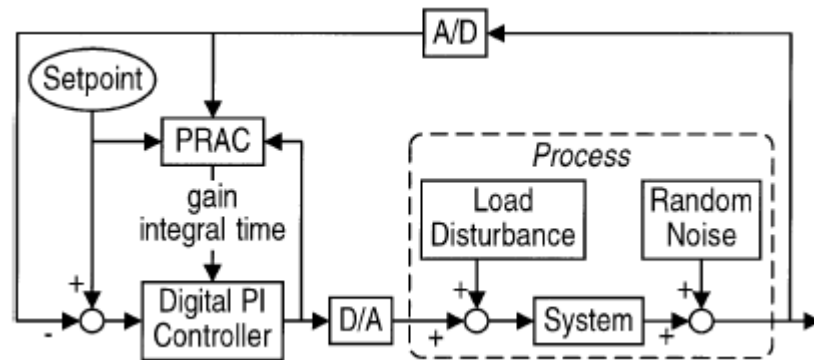


Ilustración 12: Diagrama de bloques para la simulación del sistema (Seem, 1998)

- Pruebas de laboratorio
- Pruebas de campo

(Seem, 1998)

En la siguiente ilustración se muestra la estructura interna del PRAC:

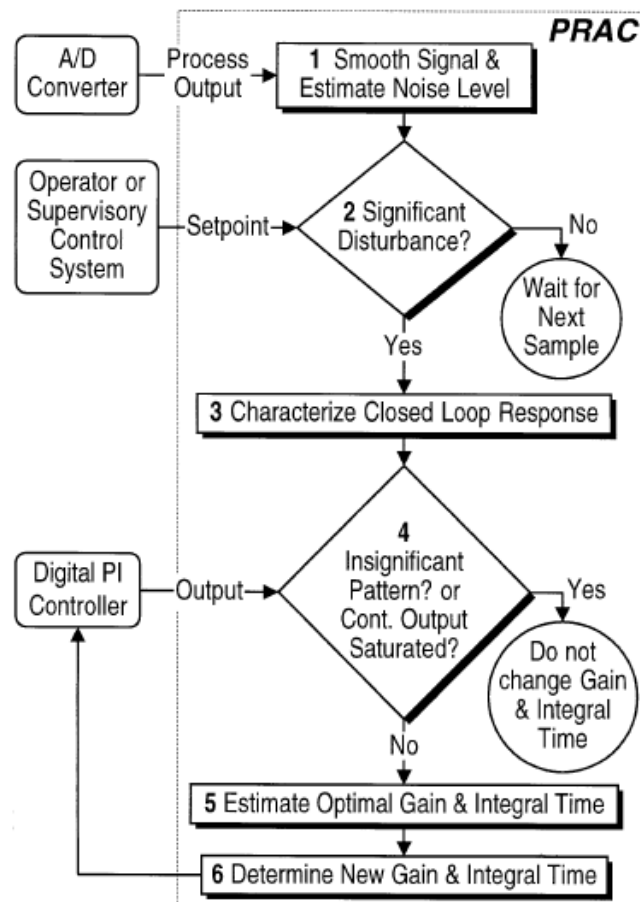


Ilustración 13: Diagrama de flujo de la estructura del controlador adaptativo de reconocimiento de patrones (Seem, 1998)

Los 6 bloques sombreados son los principales pasos necesarios para implementar PRAC, que se describirán brevemente a continuación:

- Bloque 1: Usa ecuaciones que suavizan la señal para estimar la salida del proceso, la cresta de esta misma y la media medida exponencial para estimar el nivel de ruido. La señal suavizada es:

$$\tilde{y}_t = \frac{1}{70}(-6y_{t-2T} + 24y_{t-T} + 34y_t + 24y_{t+T} - 6y_{t+2T})$$

Donde: \tilde{y}_t es la estimación de la temperatura en el momento t , y_{t-jT} es el valor medido de la temperatura en el momento $t - jT$ y T es el tiempo de muestreo.

El nivel de ruido es:

$$\bar{n}_t = \bar{n}_{t-T} + \lambda(|\tilde{y}_t - y_t| - \bar{n}_{t-T})$$

Donde $0 < \lambda < 3$ (se usa 0.001 en el desarrollo de PRAC)

- Bloque 2: Un cambio del valor objetivo más grande que la banda de ajuste de control es una perturbación grande. Siendo la banda de ajuste:

$$\text{Banda de ajuste} = \max \{ \alpha \bar{n}_t, 4 P_{range} R_{DA}, 4 S_{range} R_{AD} \}$$

Con:

$$\alpha = 5.33$$

\bar{n}_t = Nivel de ruido medio (Bloque 1)

P_{range} = rango máximo esperado de la salida del proceso

R_{DA} = resolución del convertidor D/A

S_{range} = rango del sensor

R_{AD} = resolución del convertidor A/D

Si el patrón para un cambio de valor objetivo no se caracteriza, el PRAC+ busca una perturbación de carga grande. Una perturbación de carga es grande cuando la salida suavizada del proceso es mayor que el valor objetivo más la banda de de ajuste durante dos muestreos seguidos o cuando la salida suavizada del proceso es menor que el valor objetivo menos la banda de ajuste durante dos muestreos seguidos.

- Bloque 3: Caracteriza la respuesta del bucle cerrado usando dos parámetros adimensionales: uno es la medida de la cantidad de oscilaciones y el otro es la medida de la velocidad de respuesta.

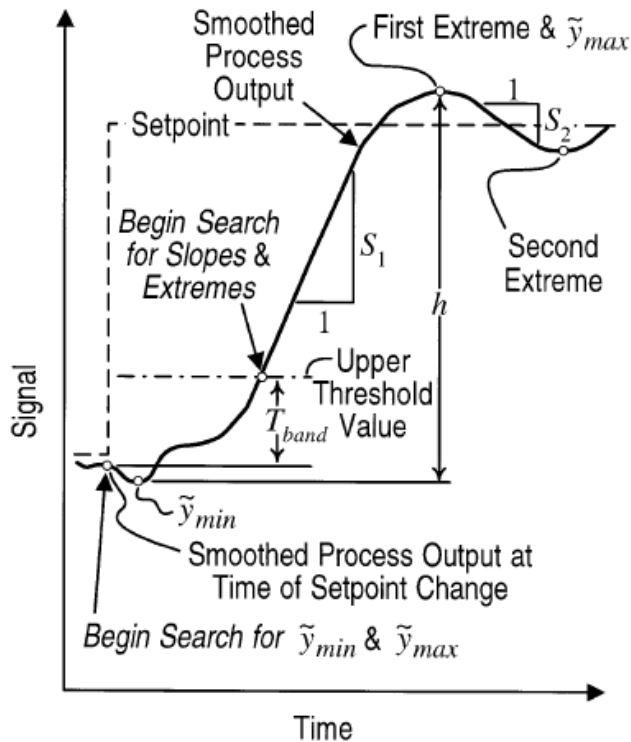


Ilustración 14: Parámetros usados para caracterizar la respuesta en bucle cerrado durante cambios de valor objetivo (Seem, 1998)

Para la respuesta de la figura anterior, el nivel de oscilación y el tiempo de respuesta en bucle cerrado, respectivamente son:

$$\phi = \frac{S_2}{S_1}$$

$$\theta = \frac{h}{S_1 T}$$

Donde S_1 es el máximo del valor absoluto de la pendiente entre el momento que la señal suavizada excede un límite y el primer extremo; S_2 es el máximo del valor absoluto de la pendiente entre el momento del primer extremo y el segundo extremo, y h es la altura de la respuesta, que es:

$$h = \tilde{y}_{\max} - \tilde{y}_{\min}$$

Donde \tilde{y}_{\max} y \tilde{y}_{\min} son los valores máximo y mínimo de la salida suavizada mientras que la respuesta está siendo caracterizada. La búsqueda de los valores máximo y mínimo empieza inmediatamente después del cambio de la consigna.

El tiempo de caracterización para un cambio de consigna es de $60T$ y para una perturbación en la carga de $75T$, donde T es el tiempo de muestreo.

- Bloque 4: Previene que PRAC desajuste el controlador, teniendo en cuenta las siguientes situaciones:

- o ¿El patrón es insignificante?

El patrón es insignificante cuando la salida del controlador hace un cambio pequeño y la salida del proceso se mueve entre los límites superior e inferior durante la caracterización.

- o ¿La salida del controlador está saturada?

Se guardan el mínimo y el máximo de la salida del controlador durante la caracterización, la salida del controlador se considera saturada si ocurre alguna de las siguientes condiciones:

- La salida del controlador mínima es 100% y la ganancia del controlador por el error es mayor que cero.
- La salida del controlador máxima es 0% y la ganancia del controlador por el error es menor que cero.

Si alguna de las condiciones es cierta, los parámetros del control PI siguen igual.

- Bloque 5: Estima valores óptimos para las ganancias del controlador a partir de los parámetros adimensionales del bloque 3.

La ganancia óptima se estima de la siguiente manera:

$$\hat{K}_{opt} = K_{old}(1.264 - 2.199 \phi + 3.347 \phi^2 - 3.204 \phi^3 + 1.272 \phi^4)$$

Y el tiempo integral óptimo se estima así:

$$\hat{T}_{i,opt} = T_{max}\{2, \max\{2, (-3.429 + 1.285 \theta)\}\}$$

- Bloque 6: Determina nuevos valores para las ganancias del controlador a partir de estimaciones de las ganancias óptimas, el tamaño de la señal para la perturbación actual relativa al ruido estimado en el bloque 1, y una estimación del tamaño de la señal con la perturbación actual relativa al tamaño de la señal en perturbaciones anteriores.

Se usan las siguientes ecuaciones:

$$K_{new} = K_{old} + \lambda_{ss} \lambda_{sn} (\hat{K}_{opt} - K_{old})$$

$$T_{i,new} = T_{i,old} + \lambda_{ss} \lambda_{sn} (\hat{T}_{i,opt} - T_{i,old})$$

(Seem, 1998)

3. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se estudian técnicas de control que se usan en sistemas similares al de este trabajo o que sean compatibles con ellos. Se analizarán documentos para ver su forma de análisis, su desarrollo y sus conclusiones.

3.1. UN CONTROLADOR ADAPTATIVO DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES MEJORADO (PRAC+)

El uso de un PRAC frente a un control PI o PID en sistemas HVAC tiene la ventaja de que se auto ajusta, siendo más eficiente en la mayoría de los casos y ahorrando tiempo de trabajo a los técnicos que se ocupen del control. Aun así, hay algunos casos en los que el PRAC no tiene una respuesta correcta, como cuando la ganancia inicial del controlador es demasiado elevada, cuando el sistema está sub dimensionado para la estancia o cuando el sistema se somete a ruido con una frecuencia resonante a la de re ajuste de parámetros. Para solucionar estos problemas, este documento se rediseña este tipo de control, renombrándolo PRAC+:

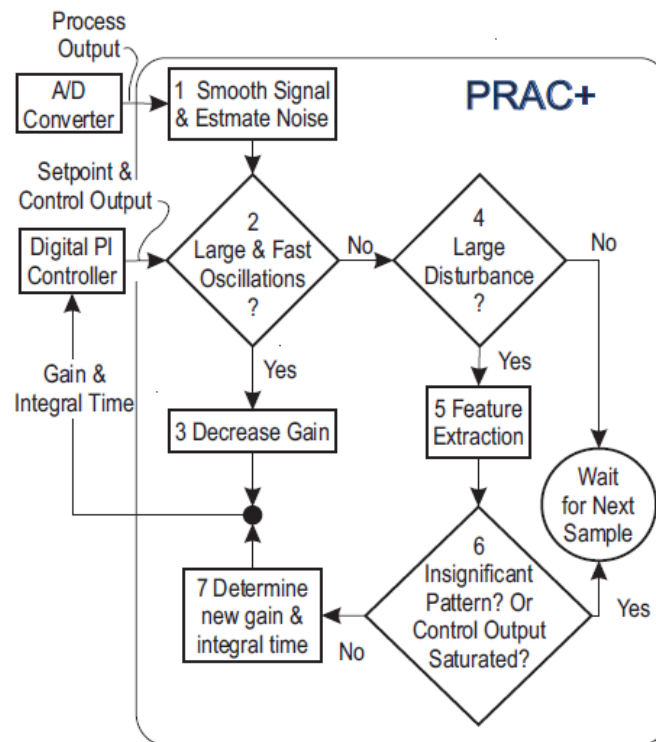


Ilustración 15: Diagrama de flujo de PRAC+ (Seem, 2006)

La imagen anterior representa la estructura interna del PRAC+. Los bloques 1 y 4 son iguales que los bloques 1 y 2, respectivamente, en el PRAC, sin embargo, los bloques 5, 6 y 7 se modifican en PRAC+ y el 2 y el 3 son completamente nuevos:

- Bloque 2: Determina valores altos y bajos extremos de doce muestras del error e y la señal de control u .

$$if [n_{ex,e} \geq 4 \ \& \ n_{ex,u} \geq 4 \ \& \ \max\{e_{l,1}; e_{l,2}; \dots\} < 0 \ \& \ \min\{e_{h,1}; e_{h,2}; \dots\} > 0 \ \& \ (\min\{u_{h,1}; u_{h,2}; \dots\} - \max\{u_{l,1}; u_{l,2}; \dots\}) > 0.1(u_{max} - u_{min})]$$

entonces → oscilaciones rápidas y grandes en e y u

Siendo $n_{ex,e}$ el número de extremos en e y, $n_{ex,u}$ el número de extremos en u .

Una vez se determinan oscilaciones amplias y rápidas, los valores de error se llevan a cero para darle tiempo al sistema de control para responder a una ganancia nueva.

- Bloque 3: Si hay oscilaciones rápidas, se calcula una nueva y menor ganancia del controlador:

$$\frac{k_{new}}{k} = 1 - \frac{\min\{u_{h1}, u_{h2}, \dots\} - \max\{u_{l1}, u_{l2}, \dots\}}{2(u_{max} - u_{min})}$$

Estado del arte

- Bloque 5: En este bloque se determina:
 - o u_l (salida alta del controlador)
 - o u_h (salida baja del controlador)
 - o \hat{y}_l (salida baja suavizada del proceso)
 - o \hat{y}_h (salida alta suavizada del proceso)
 - o ϕ (proporción de oscilación)
 - o θ (tiempo de respuesta del bucle cerrado)
 - o Indicación de una respuesta sobre amortiguada

La búsqueda de estos parámetros es diferente si la perturbación que se detectó en el bloque 4 era un cambio en el valor objetivo o una perturbación de carga:

Si hay un cambio en el valor objetivo, la búsqueda de u_l y de u_h comienza inmediatamente y la de \hat{y}_l y \hat{y}_h comienza cuando la salida suavizada del proceso llega a un valor igual o mayor a la misma salida del proceso en el momento del cambio del valor objetivo más la banda de ajuste calculada en el bloque 4. La búsqueda de estos parámetros termina cuando la pendiente de la salida del controlador cambia signo dos veces o cuando se recogen 60 muestras del controlador.

Si hay una perturbación en la carga, la búsqueda de u_l y de u_h comienza inmediatamente y la de \hat{y}_l y \hat{y}_h comienza cuando se detecta el primer cambio en el signo de la tendencia de la salida del controlador. La búsqueda de estos parámetros termina cuando la pendiente de la salida del controlador cambia signo tres veces o cuando se recogen 75 muestras del controlador. Si la tendencia no cambia de signo después de 75 muestras:

$$\hat{y}_l = \min \{ \hat{y}_{t_{L+74}}, \hat{y}_{t_{L+75}} \}$$

$$\hat{y}_h = \max \{ \hat{y}_{t_{L+74}}, \hat{y}_{t_{L+75}} \}$$

Donde: $\hat{y}_{t_{L+74}}$ es la salida del proceso suavizada 74 periodos después de la perturbación y $\hat{y}_{t_{L+75}}$ la misma salida 75 periodos después de la perturbación.

Para calcular ϕ :

Condition	Comment
\hat{s}_l and \hat{s}_h not determined	sluggish
$\hat{s}_l \geq 0$	sluggish
$\hat{s}_h \leq 0$	sluggish
Overdamped & $(y_h - y_l) \leq 2T_b$	sluggish & noisy
Overdamped & $(t_{\hat{y}_h} > t_{\hat{y}_l})$ & $ (\hat{y}_h - \hat{y}_l) / (\hat{y}_l - y_{set}) > 0.5$	sluggish & periodic disturbance
Overdamped & $(t_{\hat{y}_l} > t_{\hat{y}_h})$ & $ (\hat{y}_l - \hat{y}_h) / (\hat{y}_h - y_{set}) > 0.5$	sluggish & periodic disturbance
Overdamped for three consecutive patterns	sluggish & periodic disturbance

Ilustración 16: Condiciones cuando la proporción de oscilación es igual a 0 (Seem, 2006)

Si no se cumple ninguna de las condiciones de la tabla anterior:

$$\phi = \min\left(1, \frac{|\hat{s}_l|}{|\hat{s}_h|}\right) \text{ cuando } t_{\hat{s}_l} > t_{\hat{s}_h}$$

$$\phi = \min\left(1, \frac{|\hat{s}_h|}{|\hat{s}_l|}\right) \text{ cuando } t_{\hat{s}_l} < t_{\hat{s}_h}$$

$$\theta = \frac{\hat{y}_h - \hat{y}_l}{T \max(|\hat{s}_l|, |\hat{s}_h|)}$$

- Bloque 6: Para prevenir que el control se desajuste, los parámetros no se actualizan cuando hay un patrón insignificante o cuando la salida de control está saturada cerca de un valor mínimo o máximo (esto ayuda a no desajustar sistemas subdimensionados).

Si la salida del controlador cambia menos de un 5% de su rango, se mira si la salida del proceso suavizada se ha movido entre el valor objetivo más y menos la banda de ajuste (durante ese patrón de caracterización); si es así, entonces se considera que es un patrón insignificante y no se prosigue a cambiar los parámetros de control.

Para que los parámetros de control no se cambien cuando se considere que la salida del controlador está saturada, se tendrá que dar lo siguiente:

$$\text{si } \{[k_e > 0 \ \& \ u_1 > (0.05 u_{min} + 0.95 u_{max})]\}$$

$$\text{ó } \{[k_e < 0 \ \& \ u_h < (0.95 u_{min} + 0.05 u_{max})]\}$$

- Bloque 7: Se determina la nueva ganancia y el tiempo integral.

Las constantes de suavizamiento son:

$$\lambda_{sn} = \min\left[\max\left(0, \frac{3.1 \sigma}{T_b} - 2.97\right), 1\right]$$

$$\lambda_{ss} = \min\left[\max\left(0, \frac{\sigma}{2.19 \bar{\sigma}} - 2.97\right), 1\right]$$

Siendo σ el tamaño de la señal:

Si se alcanza el valor objetivo:

$$\sigma = \max\{\hat{y}_h, y_{set}\} - \min\{\hat{y}_l, y_{set}\}$$

Si no se alcanza el valor objetivo:

Estado del arte

$$\sigma = \max \{ \bar{\sigma}, T_b, \max \{ \hat{y}_h, y_{set} \} - \min \{ \hat{y}_l, y_{set} \} \}$$

La nueva ganancia del controlador viene dada por:

$$k_{new} = k[1 + \lambda_{sn}\lambda_{ss}(0.29 - 2.49\phi + 4.32\phi^2 - 4.45\phi^3 + 1.82\phi^4)]$$

Y el nuevo tiempo integral:

$$si \phi > 0.2 \rightarrow T_{i,new} = T_i + \lambda_{sn}\lambda_{ss}(\hat{T}_{i,opt} - T_i)$$

$$\hat{T}_{i,opt} = T_{\min}\{30, \max\{2, (-3.4 + 1.3\theta)\}\}$$

(Seem, 2006)

4. DESARROLLO

El párrafo anterior tiene aplicado el estilo TFG_Título1

Dividido en epígrafes. En este apartado, el más amplio, se expondrá el cuerpo fundamental del trabajo y se argumentarán las ideas principales y secundarias del mismo.

Detalla el proceso que se ha llevado a cabo para la elaboración del TFG y la metodología adoptada dependiendo de la naturaleza del TFG escogido (contenido teórico, caso práctico, proyecto, estudio técnico, revisión bibliográfica y estado de la cuestión, justificación, resultados...), pero en todo caso debe estar dividido en capítulos homogéneos y numerados.

4.1. ESPACIO A CLIMATIZAR Y CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS

A continuación, se presenta un supuesto espacio de oficinas acotado, para trabajar sobre él y asegurar que tiene una climatización adecuada:

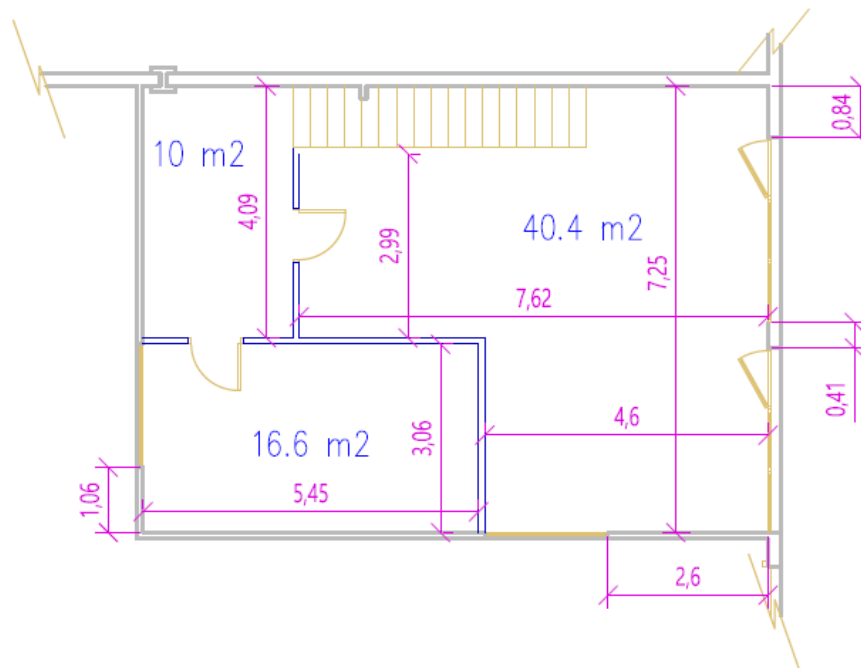


Ilustración 17: Planta primera de oficinas acotado

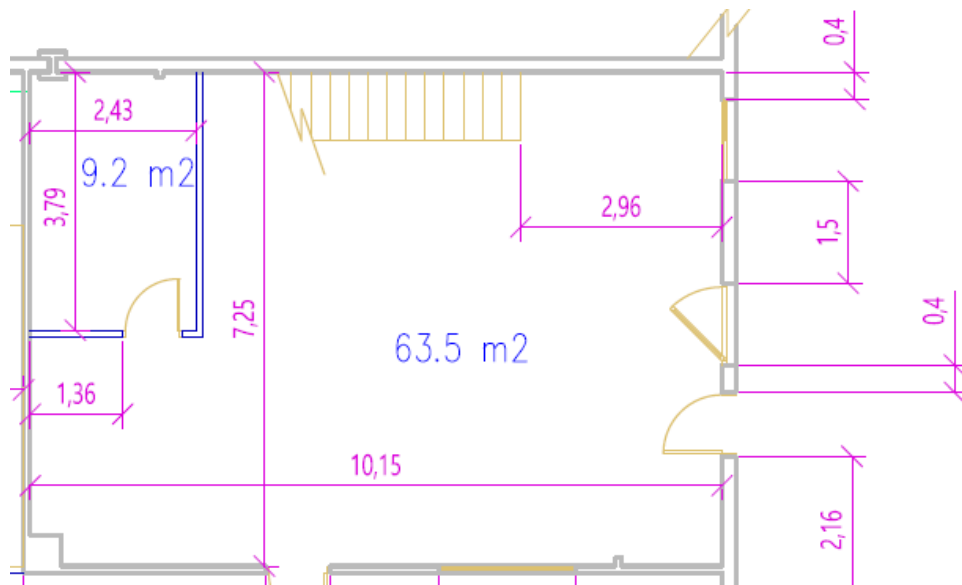


Ilustración 18: Planta baja de oficinas acotado

La altura del espacio es de 3m.

Se va a ver para qué se va a usar cada espacio para poder entender y dimensionar el proyecto un poco mejor:

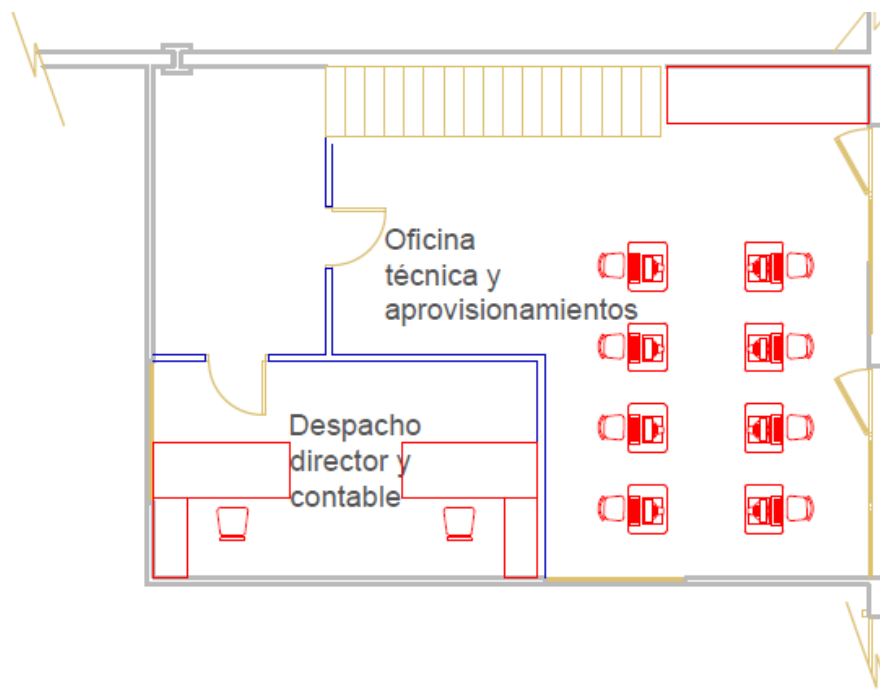


Ilustración 19: Planta primera de oficinas

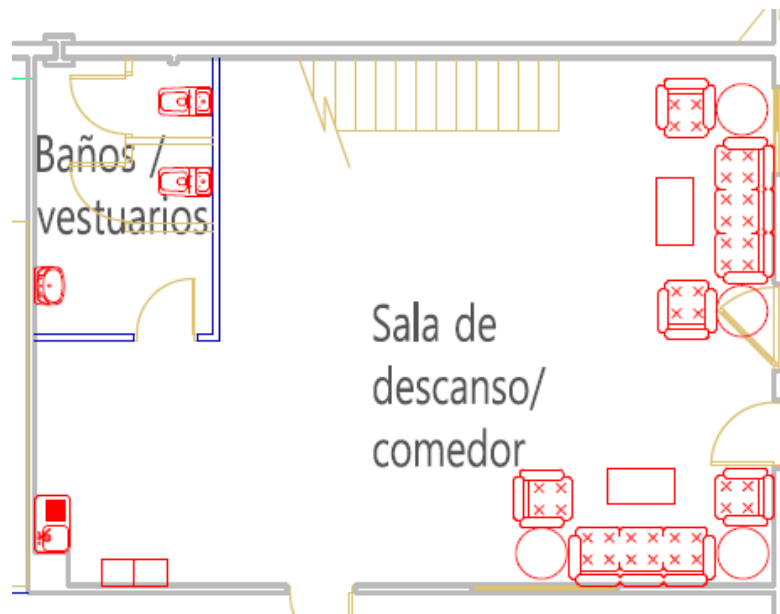


Ilustración 20: Planta baja de oficinas

Estas oficinas están situadas en La Almunia de Doña Godina.

Para los siguientes cálculos se tiene en cuenta lo siguiente:

- La temperatura del aire en los recintos calefactados no será superior a 19°C.
- La temperatura del aire en los recintos refrigerados no será inferior a 27°C.
- Las condiciones de temperatura anteriores están referenciadas al mantenimiento de una humedad relativa comprendida entre el 30% y el 70%.

(Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, de medidas de sostenibilidad económica en el ámbito del transporte, en materia de becas y ayudas al estudio, así como de medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural., 2022)

Para el dimensionado del sistema de calefacción, se empleará una temperatura de cálculo de las condiciones interiores de 19°C. Para los sistemas de refrigeración la temperatura de cálculo será de 27°C.

4.1.1.1. Ventilación

En el código técnico de calidad de aire interior, se indica que para locales de un tipo que no se especifique en él, se tendrá que cumplir las exigencias establecidas en el RITE. (Documento Básico HS, 2019)

El uso del edificio a climatizar es de oficinas, por lo que la calidad del aire interior necesaria será de IDA 2 (aire de buena calidad). Para calcular el caudal mínimo del

Desarrollo

aire exterior de ventilación, se usa el método indirecto de caudal de aire exterior por persona. Cuando las personas tengan una actividad metabólica de alrededor 1,2 met, cuando sea baja la producción de sustancias contaminantes por fuentes diferentes del ser humano y cuando no esté permitido fumar (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios., 2007):

Categoría	dm ³ /s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

Tabla 1: Caudales de aire exterior, en dm³/s por persona (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios., 2007)

El caudal mínimo de aire y las renovaciones/hora son los siguientes en cada tipo de espacio:

- Oficina técnica (121.2 m³): 8 personas * 12.5 dm³/s*per = 100 dm³/s = 360 m³/h ≈ 3 renovaciones/hora
- Despacho (49.8 m³): 2 personas * 12.5 dm³/s*per = 25 dm³/s = 90 m³/h ≈ 1.8 renovaciones/hora
- Inodoro (27.6 m³): 2 personas * 12.5 dm³/s*per = 25 dm³/s = 90 m³/h ≈ 3.3 renovaciones/hora
- Sala de descanso/ comedor (220.5 m³): 10 personas * 12.5 dm³/s*per = 125 dm³/s = 450 m³/h ≈ 2 renovaciones/hora

Teniendo en cuenta estos números, ventiladores que tengan un caudal regulable, para que puedan ofrecer la ventilación mínima cuando la temperatura del espacio sea la correcta y para que pueda subir el caudal cuando haya más demanda de energía. El caudal mínimo total debe ser de 990 m³/h.

El caudal de aire que se extrae del espacio total es, entonces, de 0.275 m³/s, que si se extrae de forma mecánica activa, no llega al mínimo de 0.28 m³/s legal para tener que extraer energía del caudal de extracción. Aunque el caudal de extracción sea mayor, no todo se tiene por qué extraer de forma activa, pudiendo tener canales de extracción pasivos, y pudiendo dejar que haya una pequeña presión positiva dentro del espacio, lo que ayudará a aumentar la eficiencia energética, ya que entraría menos aire del exterior por aperturas alrededor de puertas y ventanas. (Real Decreto

178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 2021).

Para calcular la potencia necesaria a ser instalada, se empieza calculando las pérdidas por ventilación:

$$P_{\text{ventilación}} = \frac{\text{Renovaciones}}{h} * \text{Volumen} * \text{Densidad} * C_{\text{específico}} * \text{Salto térmico}$$

La densidad del aire varía con la temperatura; se tomará 1.225 kg/m^3 a 1 atm y a 15°C . (Sotomayor Zajarov, 2014)

El calor específico del aire es de $0.28 \text{ wh/kg}^\circ\text{C}$

El salto térmico puede ser positivo o negativo, dependiendo de si se está calentando el interior o enfriando. En este caso se supondrá que se está calentando, por lo que la temperatura interior se considera 21°C y la exterior 3°C , ya que es la temperatura media más baja en el mes más frío en La Almunia de Doña Godina, por lo que el salto térmico es de 18°C . (Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 2021) (Cedar Lake Ventures, Inc., 2022)

Espacio	Volumen (m^3)	Renovaciones / h	Pérdidas (w)
Oficina técnica	121.2	3	2245
Despacho	49.8	1.8	553
Inodoro	27.6	3.3	562
Sala de descanso	220.5	2	2723
Total	419.1	2.4	6210

Tabla 2: Cálculos pérdidas ventilación

Las pérdidas por ventilación totales son 6210 w.

Si se usan intercambiadores de calor en el sistema de ventilación, las pérdidas serán menores.

4.1.1.2. Calefacción

Las pérdidas por transmisión en calefacción se calcularán mediante la expresión:

$$P_{transmisión} = Superficie * Transmitancia * Salto térmico$$

El salto térmico vuelve a ser 16°C, ya que la temperatura interior se considera 19°C y la exterior 3°C. (Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 2021) (Cedar Lake Ventures, Inc., 2022)

Superficie	Superficie (m ²)	K (w/m ² *°C)	Pérdidas (w)
Muro exterior	88.22	0.64	903
Pared interior	93.6	2.44	3654
Ventana	22.32	3.5	1250
Puerta	3.6	2.91	168
Suelo	73	0.64	748
Total			6723

Tabla 3: Cálculos pérdidas calefacción

(Ponce, 2011)

Las pérdidas de calefacción más las de ventilación, dan unas pérdidas totales de 12933 w.

Para evitar un error en los cálculos se aplican los siguientes coeficientes de seguridad:

- Por intermitencia de uso: 25%.
- Por orientación oeste: 5%.
- Por 2 o más paredes exteriores: 10%.

En total se aumentará la potencia un 40%: 12933 w * 1.40 = 18106 w.

(Ponce, 2011)

Esta será la potencia a instalar en calefacción.

4.1.1.3. Refrigeración

Las pérdidas por transmisión en refrigeración se calcularán mediante la misma expresión que en calefacción:

$$P_{transmisión} = Superficie * Transmitancia * Salto térmico$$

El salto térmico cambiará, ya que la temperatura interior se considera 27°C y la exterior es la media máxima en en mes más caluroso en La Almunia de Doña Godina: 32°C. Así que el salto térmico será de -5°C. (Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, 2021) (Cedar Lake Ventures, Inc., 2022)

Superficie	Pérdidas (w)
Muro exterior	282
Pared interior	1142
Ventana	391
Puerta	52
Suelo	234
Total	2101

Tabla 4: Lista de pérdidas / elemento

(Ponce, 2011)

Las pérdidas de refrigeración más las de ventilación, dan unas pérdidas totales de 8311 w.

Para evitar un error en los cálculos se aplican los siguientes coeficientes de seguridad:

Por intermitencia de uso: 25%.

Por orientación oeste: 5%.

Por 2 o más paredes exteriores: 10%.

En total se aumentará la potencia un 40%: $8311 \text{ w} * 1.40 = 11635 \text{ w}$.

(Ponce, 2011)

Esta será la potencia a instalar en refrigeración.

4.2. SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

Desarrollo

Se usará un sistema fan coil de 2 tubos.

Este sistema es sencillo y poco versátil ya que, al ser de 2 tubos, sólo puede calentar o enfriar, y no las dos cosas a la vez, sin embargo, calentar y enfriar diferentes espacios a la vez sólo sería necesario en primavera y otoño y aun así, el espacio a climatizar no es muy grande y no tendrá grandes diferencias de temperatura entre la parte a la que le dé el sol y la que le dé la sombra, por lo que con este sistema se podrá controlar la temperatura sin un gran problema.

Este sistema se podría combinar con un VAV (Volumen de Aire Variable), para poder controlar el flujo de aire que entra en cada zona, pero una vez más, no sería necesario en un espacio tan pequeño. Además, al cambiar la potencia del ventilador y abrir y cerrar reguladores de flujo, habría que asegurar el caudal mínimo de ventilación en cada espacio, lo que lo hace más inconveniente.

Se tendrán termómetros en cada espacio y se controlará cada uno individualmente, ya que cada unidad fan coil tiene su propio ventilador y serpentín con válvula regulable.

- Ventiladores: En cada espacio habrá una unidad fan coil que, entre otras cosas, tendrá un ventilador. El caudal mínimo del ventilador será el caudal mínimo de ventilación, pudiendo aumentar para atender la demanda de energía del espacio.
- Tuberías enfriadoras / calentadoras: Además de un ventilador, en cada unidad fan coil, habrá una tubería (normalmente de cobre) que funcione como radiador, por la que pasará agua fría o caliente, dependiendo de la necesidad; el ventilador impulsará aire que pasará por afuera de la tubería y este se enfriará o calentará gracias al agua anteriormente nombrada.
- Filtros: Antes de que el aire pase por cada ventilador se necesita un filtro para que pequeñas partículas no pasen por ellos. Como se va a usar aire del exterior, también se necesitará un filtro para partículas de mayor tamaño en la entrada de aire.
- Caldera de agua: Este será el componente que caliente el agua que pase por las tuberías para luego calentar el aire.
- Enfriador de agua: Este será el componente que enfríe el agua que pase por las tuberías para luego enfriar el aire.

- Recuperador de calor: Aunque por normativa no haga falta en el flujo de aire de salida, se añadirá uno ya que hará el sistema global más eficiente y no lo hará mucho más complejo.
- Distribución del aire: Todos los elementos a través de los que se entrega el aire acondicionado al espacio, como tuberías, parrillas, rejillas, difusores, etc.
- Termostato de espacio: Se compone de un termómetro, que sirve tanto a la persona como al sistema, para saber la temperatura actual de la estancia, y de un sistema de entrada de la temperatura deseada, que será procesada por el sistema para calcular cual debe ser su respuesta.

4.2.1. Elementos comerciales

Elemento	Nombre	Enlace
Unidad fan coil 90 m^3/h (x2)	DUCTYS EC 1000, 2 pipe, rectangular	https://acselect.systemair.com/Global_SY/en-GB/catalogue/DUCTYS
Unidad fan coil 370 m^3/h	DUCTYS EC 2000, 2 pipe, rectangular	https://acselect.systemair.com/Global_SY/en-GB/catalogue/DUCTYS
Unidad fan coil 450 m^3/h	DUCTYS EC 2500, 2 pipe, rectangular	https://acselect.systemair.com/Global_SY/en-GB/catalogue/DUCTYS
Enfriador 19.3kw / Calentador 19.5 kw	SYSAQUA20.H "VARIABLE FLOW"	https://shop.systemair.com/en/sysaqua25h1p--spwpsavmn/p94738
Recuperador de calor (x2)	SAVE VRT 700 L	https://shop.systemair.com/en/save--vtr-700--l/p609941
Conductos	systemair tube F	https://shop.systemair.com/en/tube--f/c54886
Pantalla para temperaturas	OLED Display I2C SSD1306	https://www.amazon.es/AZDelivery-Pantalla-Display-pulgadas-Raspberry/dp/B01L9GC470?pd_rd_w=zTGt1&content-id=amzn1.sym.3936b34d-eb82-485e-b4ba-c852db24bb98&pf_rd_p=3936b34d-eb82-485e-b4ba-c852db24bb98&pf_rd_r=01W9Y81D7Q6Y

Desarrollo

		9QHHT3QY&pd_rd_wg=2RMd0&pd_rd_r=ae9c4a6c-924d-42ae-9fa6-3b99204142fd&pd_rd_i=B01L9GC470&psc=1&ref=pad_bap_d_rp_1_i
Botón On/Off	RS 793-2563	https://docs.rs-online.com/a257/A700000007265826.pdf
Sensores para la temperatura de las habitaciones	EWS-TX	https://br.omega.com/omegaFiles/temperature/pdf/EWS_WALL_MNT_ALL.pdf
Potenciómetro para seleccionar temperatura	3SU1200-2PU10-1AA0	https://docs.rs-online.com/a126/0900766b814d6aac.pdf
Fuente de alimentación para sensores de temperatura pared	PSU-93	https://www.omega.com/en-us/accessories/power-supplies/p/PSU93-Unregulated-P-S-

Tabla 5: Lista de elementos comerciales para el sistema

Elemento	Nombre	Enlace
Bloque de distribución de tensión 6 salidas	PTFIX 6/6X2,5 BU	https://www.automation24.es/bloque-de-distribucion-phoenix-3273332-ptfix-6-6x2-5-bu?previewPriceListId=1&qclid=CjwKCAjw7vuUBhBUEiWAEdu2pEQYidvURwCIVTUE10dUsfdzYjoEXSsSegqLR4aN2b0l6n5QqvM_cRoC3eMQAvD_BwE
Bloque de distribución de tensión 18 salidas	PTFIX 6/18X2,5 BU	https://www.automation24.es/bloque-de-distribucion-phoenix-3273376-ptfix-6-18x2-5-bu
Fuente de 24V	LM15-23B24	https://www.mornsun-power.com/index/sitesearch/partlink/keyword/LM15-23B24.html
Fuente de 12V	RS-15-12	https://es.rs-online.com/web/p/fuentes-de-

		alimentacion-conmutadas/0413667?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-CSS ES ES Fuentes de alimentacion y transformadores Whoop- -(ES:Whoop!)+Fuentes+de+Alimentación+Conmutadas-_-413667&matchtype=&pla-296687084365&qclid=CjwKCAjw7vuUBhBUeiwAEdu2pMx6yJve6F96ESzb-aGsRKxQ_wpiVc-o1sr9BaMxwHzN7RQfn4eyIxoCiSsQAvD_BwE&gclid=aw.ds
--	--	---

Tabla 6: Otros elementos comerciales necesarios

4.3. DIAGRAMAS

4.3.1. Diagramas UML

4.3.1.1. Diagramas de actividad

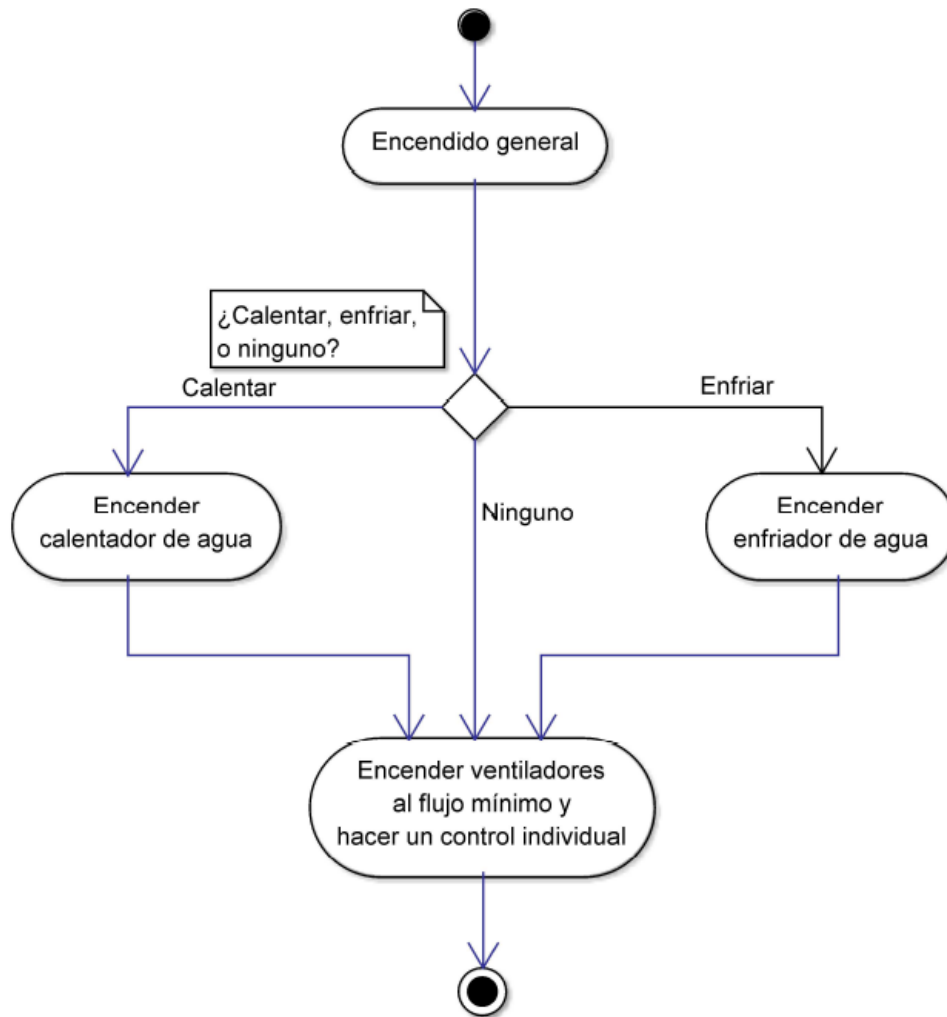


Ilustración 21: Diagrama de actividad encendido general

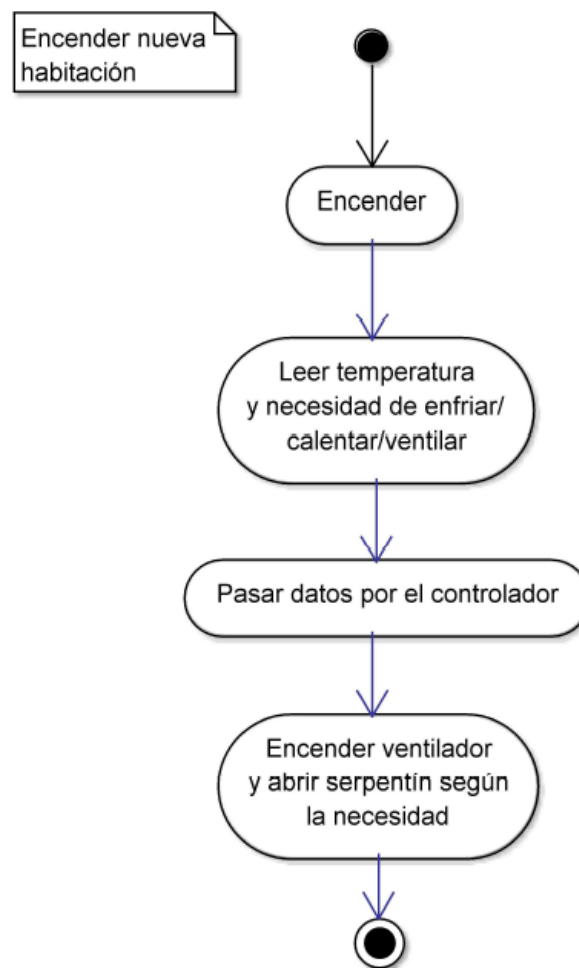


Ilustración 22: Diagrama de actividad encender nueva habitación

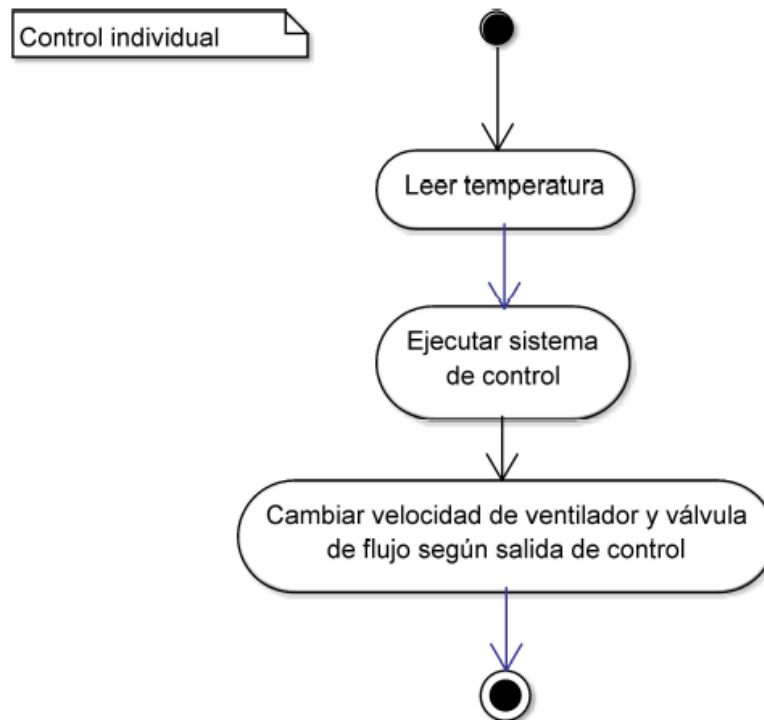


Ilustración 23: Diagrama de actividad mantener temperatura

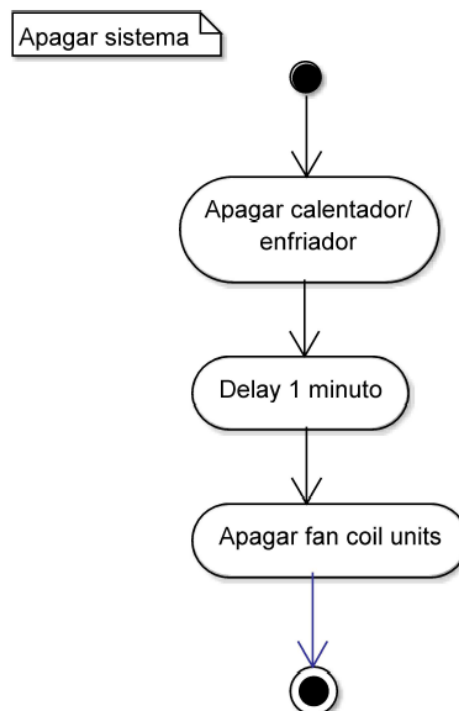


Ilustración 24: Diagrama de actividad apagar sistema

4.3.1.1. Casos de uso

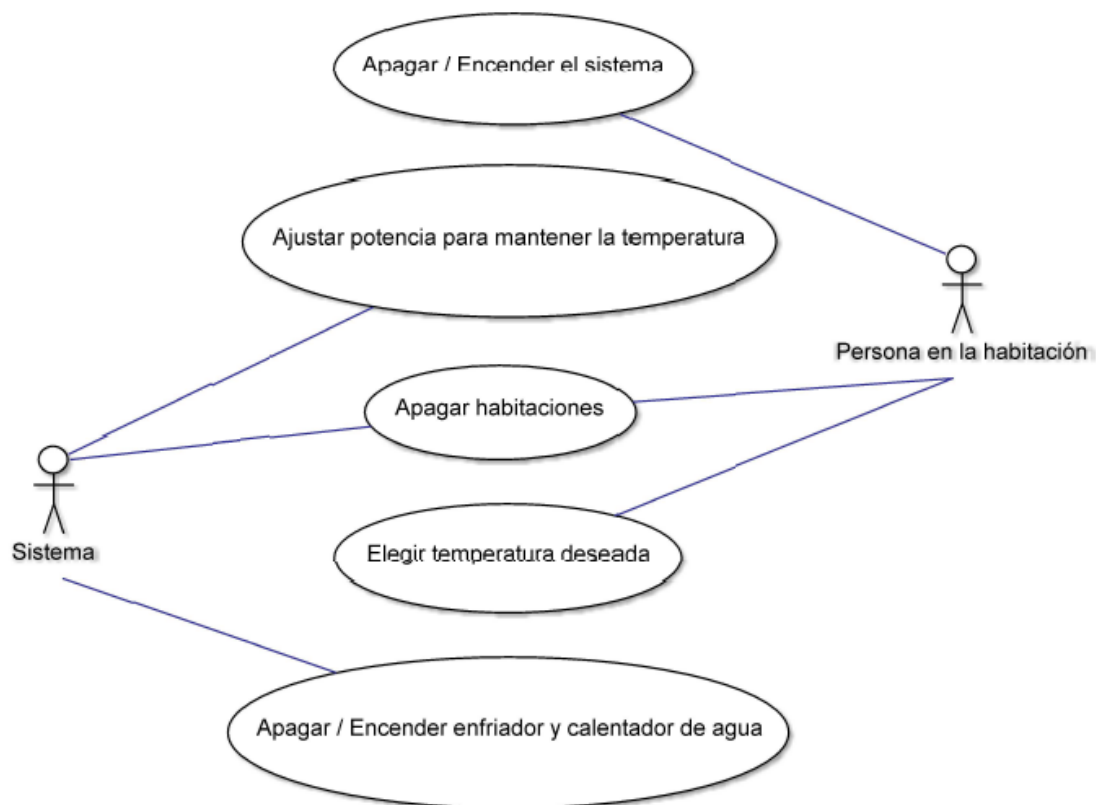


Ilustración 25: Diagrama general de casos de uso

4.3.2. Diagramas de bloques

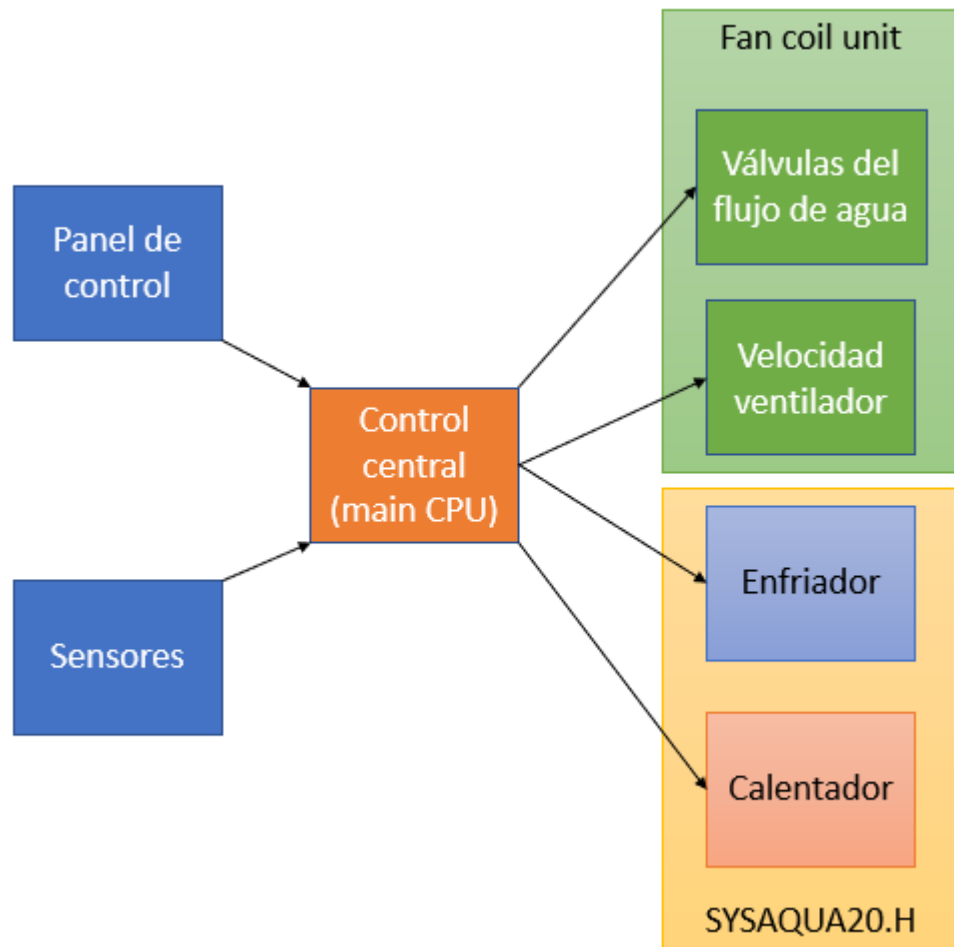


Ilustración 26: Diagrama de bloques de alto nivel

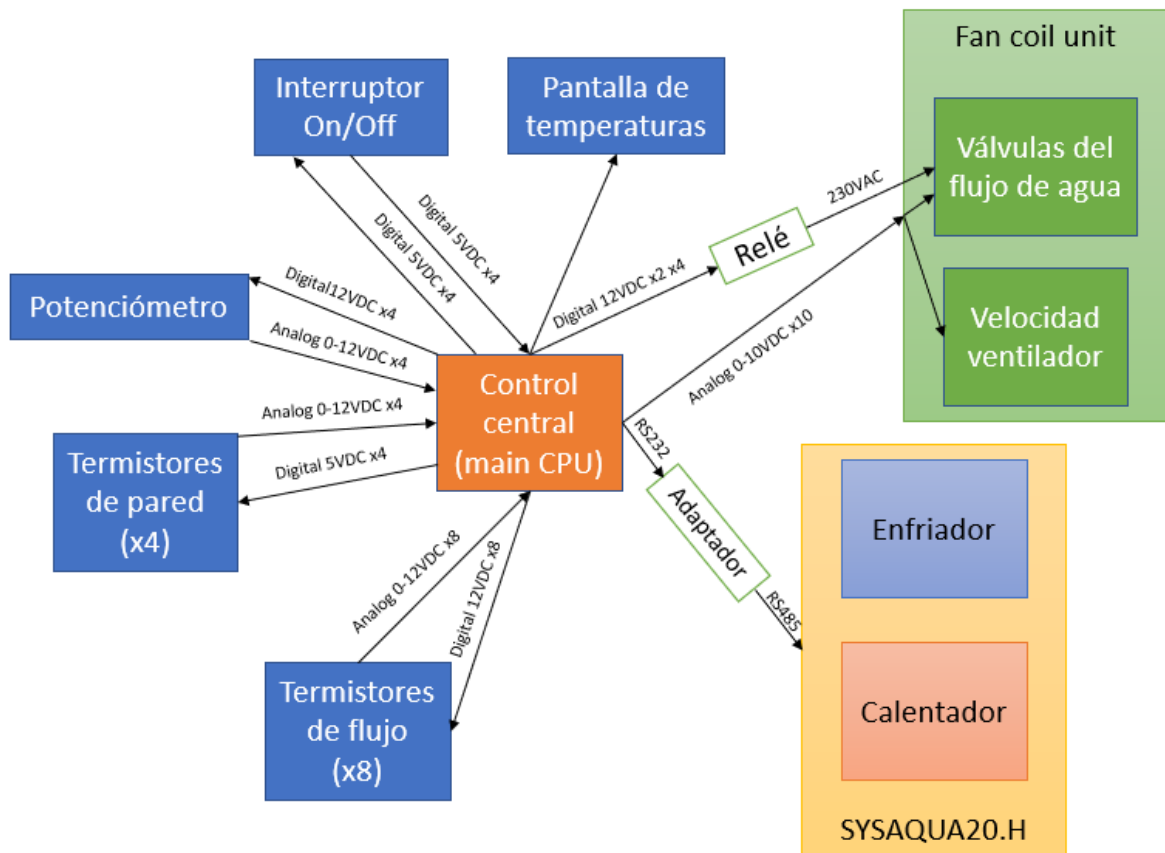


Ilustración 27: Diagrama de bloques de bajo nivel

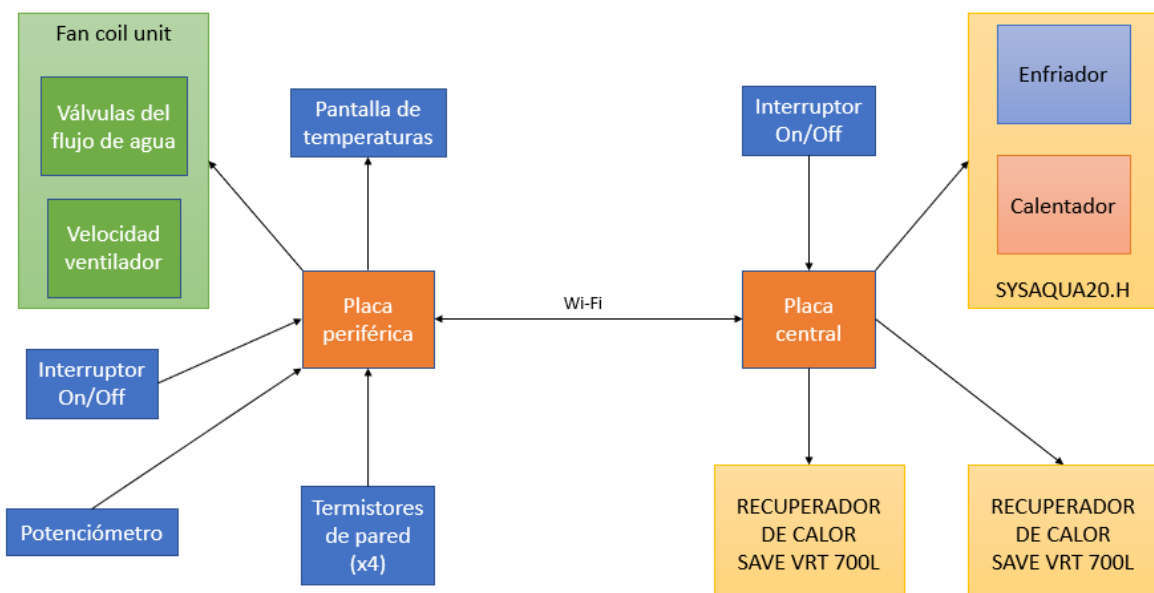


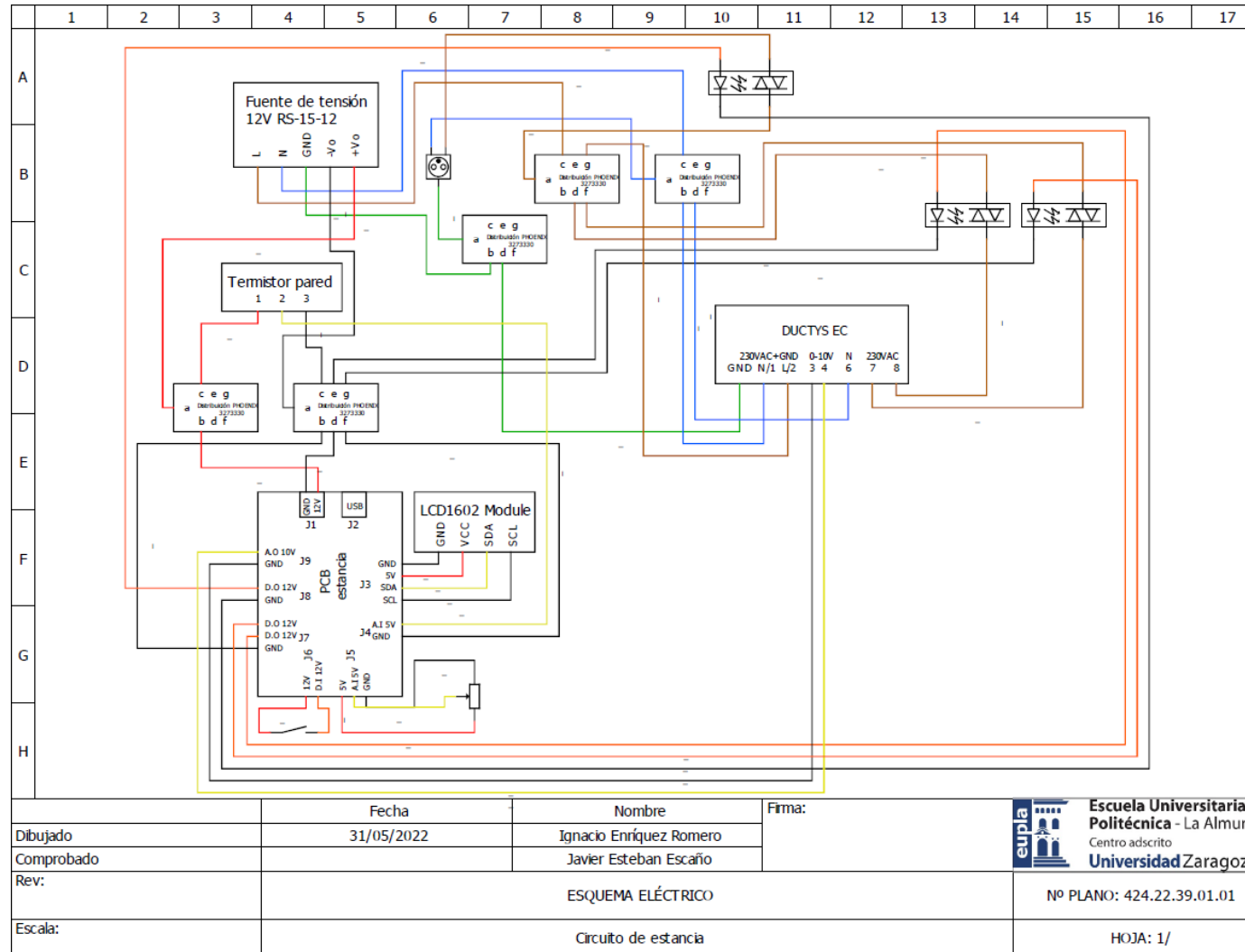
Ilustración 28: Diagrama de bloques de bajo nivel descentralizado

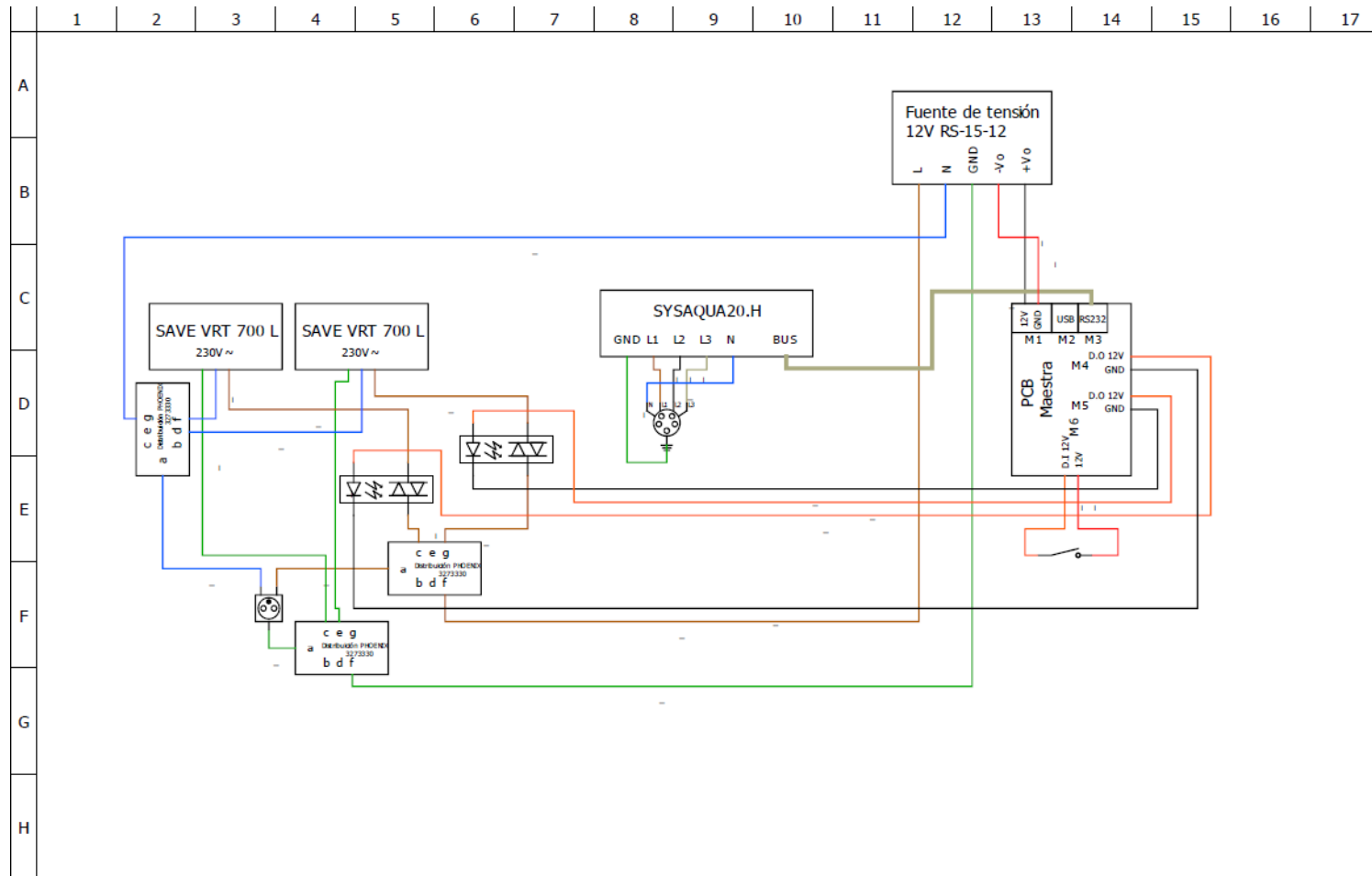
4.4. ESQUEMAS

Desarrollo

Se hacen dos diseños: de la placa maestra, de la que sólo habrá una, controlando los recuperadores de calor, el enfriador y calentador de agua y el interruptor de encendido general; y de la placa esclava, que se comunicará por Wi-Fi con la maestra y de la cual habrá una en cada estancia y leerá la temperatura que marquen los termistores, la deseada por el usuario con un potenciómetro, mostrará la información en una pantalla, tendrá un interruptor de encendido individual de la habitación y controlará la unidad fan coil de la habitación.

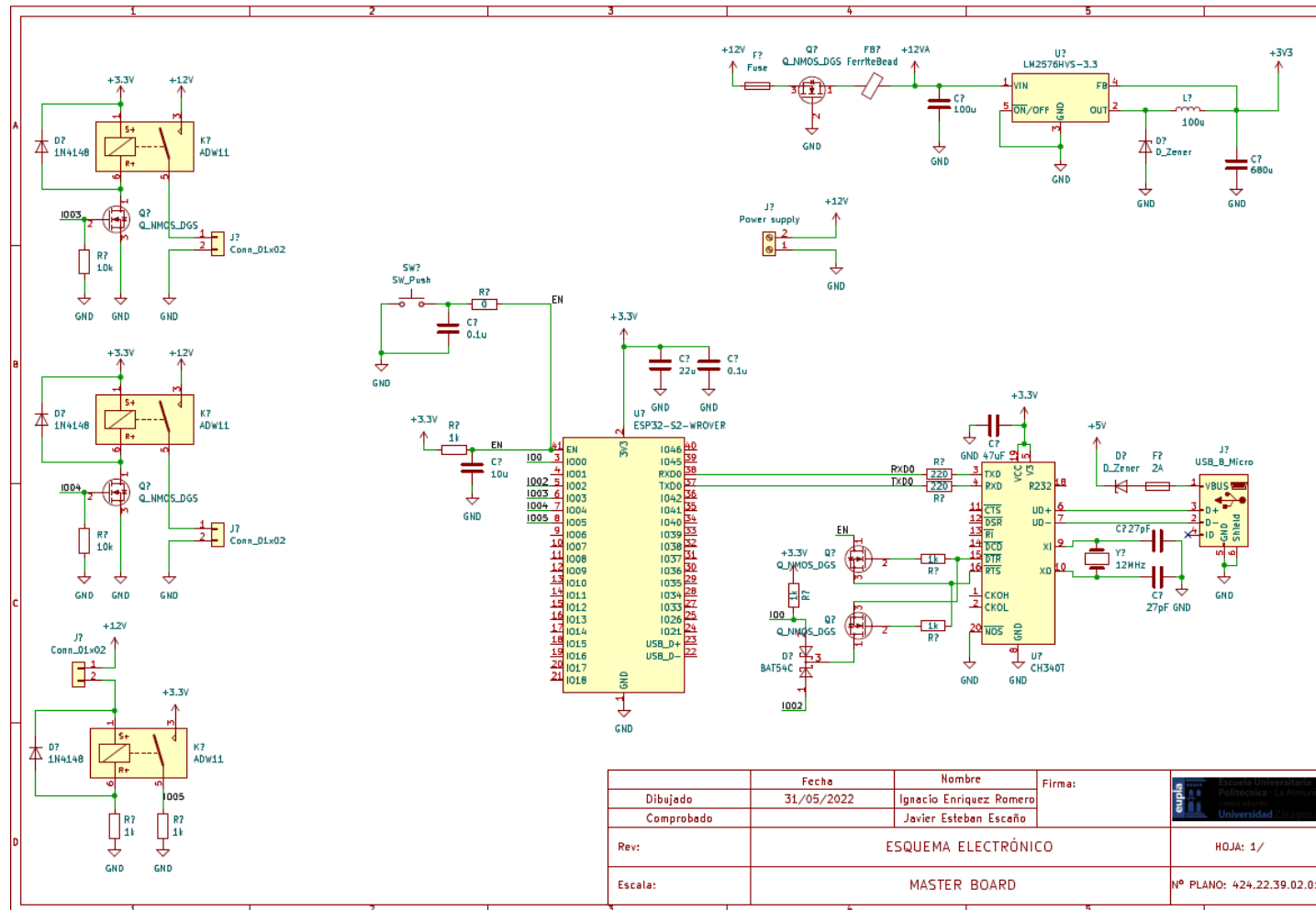
4.4.1. Esquema eléctrico

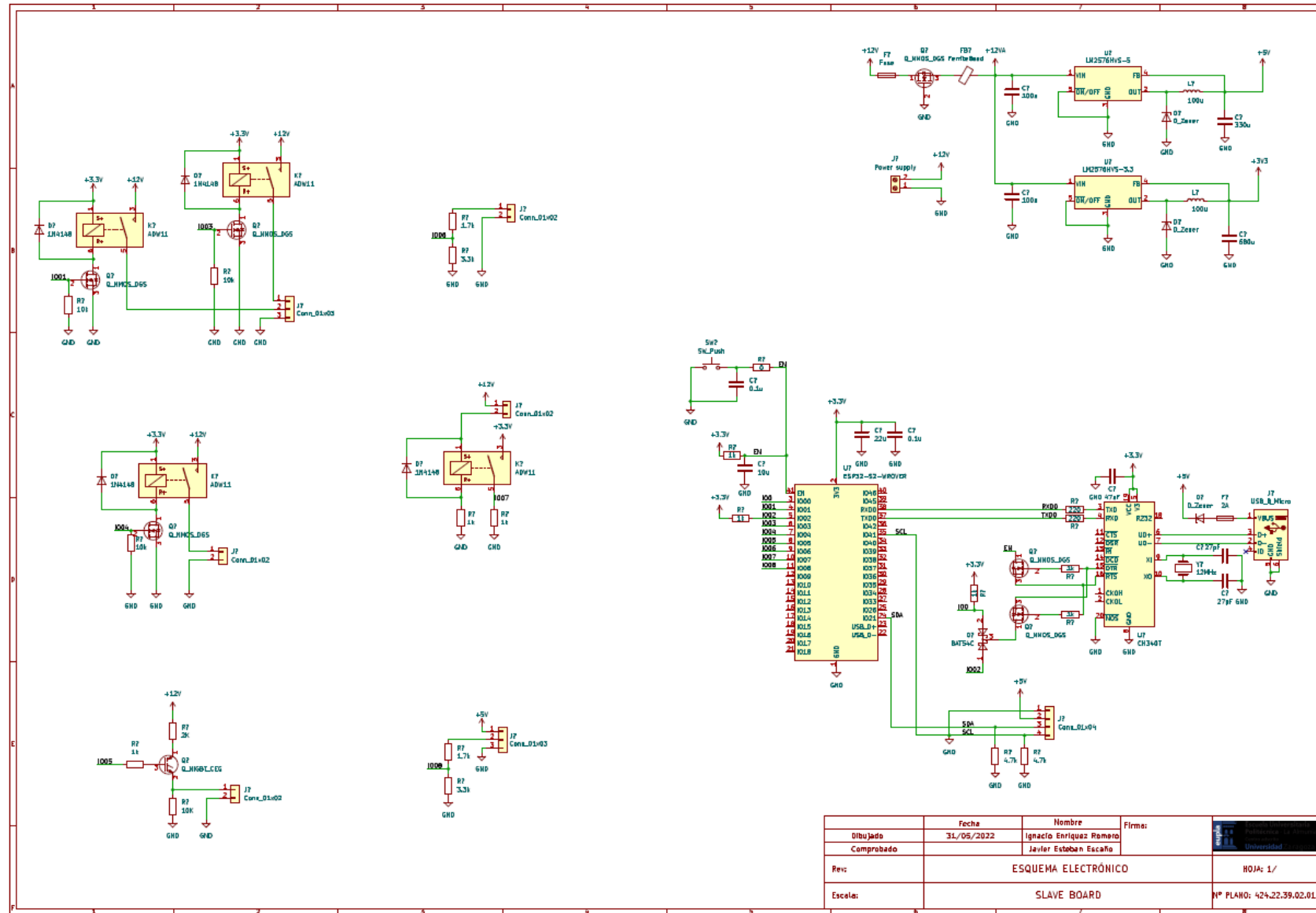




	Fecha	Nombre	Firma:
Dibujado	31/05/2022	Ignacio Enríquez Romero	
Comprobado		Javier Esteban Escaño	
Rev:	ESQUEMA ELÉCTRICO		
Escala:	Circuito principal		

4.4.2. Esquema electrónico





4.5. DISEÑO DEL CONTROLADOR

4.5.1. Teoría de control

El antecedente más similar a lo desarrollado en este trabajo es el que usa un control adaptativo de reconocimiento de patrones (PRAC) (Seem, 1998). En el estado del arte, se ve que la misma empresa, desarrolló una nueva versión del mismo tipo de control: PRAC+ (Seem, 2006), por lo que se usará como referencia para el diseño del controlador en este trabajo.

- El bloque 1 tiene como entrada la salida del proceso, que en este caso será la temperatura de la habitación, medida con un termistor. En este bloque se suaviza la señal medida y se estima el ruido en esta. Para suavizar la temperatura medida, se hará algo parecido a lo que se hace en PRAC y PRAC+: se cogeran algunas medidas anteriores, junto con la recién tomada, y se estima algunas medidas futuras, para que el ruido se atenúe, pero se le da más peso a la medida recién tomada, para que la respuesta sea más cercana a la realidad:

$$\tilde{y}_t = \frac{1}{70}(-6y_{t-2T} + 24y_{t-1T} + 34y_t + 24y_{t+T} - 6y_{t+2T})$$

Donde: \tilde{y}_t es la estimación de la temperatura en el momento t , y_{t-jT} es el valor de la temperatura en el momento $t - jT$ y T es el tiempo de muestreo.

Para estimar el ruido, se usa la probada y testada ecuación que se usa en PRAC y PRAC+:

$$\bar{n}_t = \bar{n}_{t-T} + 0.001(|\tilde{y}_t - y_t| - \bar{n}_{t-T})$$

- El bloque 2 tiene como entrada la consigna, es decir, la temperatura deseada. Su salida es verdadera si esta consigna se acaba de cambiar y es falsa si no se ha cambiado.
- El bloque 3 sólo se lleva a cabo si la salida del bloque 2 es falsa. En este bloque se calculan los valores máximos y mínimos de la pendiente de la salida del proceso, de la señal de control, de la salida del proceso, del error, así como el número de veces que ha cambiado de signo la pendiente de la salida del proceso. Su salida es verdadera cuando se han tomado el número

Desarrollo

de muestras necesario para hacer los cálculos y es negativa cuando todavía no se han tomado muestras suficientes.

- El bloque 4 sólo se lleva a cabo si la salida del bloque 3 es verdadera. Este bloque contiene las leyes de adaptación, las cuales son:
 - Si la temperatura ha sobrepasado la consigna 1.5°C en la primera toma de muestras, decrementar k_p y k_i e incrementar k_d .
 - Si no se alcanza la consigna en la primera toma de muestras, incrementar k_p y k_i y decrementar k_d .
 - Si el error máximo es mayor de 0.3°C en una toma de muestras diferente a la primera, incrementar k_i , k_p y k_d .
 - Si el error mínimo es menor que -0.3°C en una toma de muestras diferente a la primera, decrementar k_p y k_i e incrementar k_d .
- El bloque 5 se ejecuta tras el bloque 4 y realiza la adaptación de los parámetros de control, y se realiza de la siguiente manera:
 - Incrementos
 - $K_p = K_p * 1.6$
 - $K_i = K_i * 1.5$
 - $K_d = K_d * 1.9$
 - Decrementos
 - $K_p = K_p * 0.7$
 - $K_p = K_p * 0.8$
 - $K_p = K_p * 0.6$

El controlador será un PID (Proporcional, Integral y Derivativo), similar al que se explicó en el marco teórico. El componente proporcional será $P = k_p * error$, el integral será $I = I + (k_i * error)$ y el derivativo $D = D * \frac{error - error_{previo}}{T}$ y sólo se actualizará el valor de la salida si no sobrepasa los límites de ésta.

Teniendo en cuenta esto y todos los bloques mencionados, el diagrama de control completo queda así:

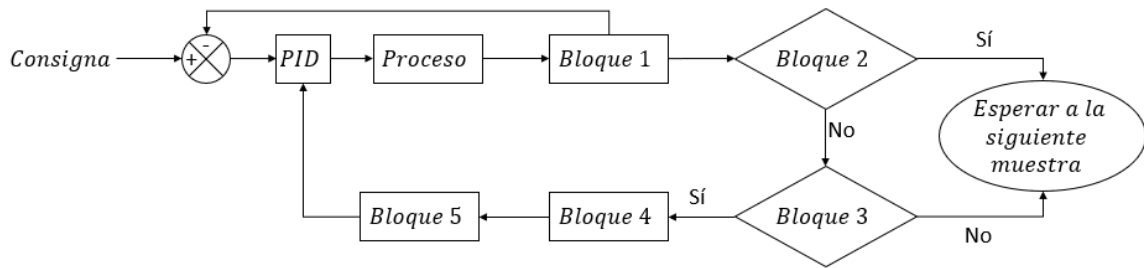


Ilustración 29: Diagrama de control

Todo el sistema, desde el control PID hasta cada uno de los demás bloques, se ejecuta una vez cada tiempo de muestreo. Para calcular este tiempo de muestreo se tienen en cuenta las siguientes relaciones:

$$0.25 \leq \frac{L}{\tau} \leq 1$$

$$0.1 \leq \frac{T}{L} \leq 1$$

Donde:

- L es el tiempo muerto, que es el tiempo que pasa desde que la salida del controlador cambia hasta que la respuesta del sistema empieza a cambiar.
- τ es la constante de tiempo, que es el tiempo que pasa desde que la salida del sistema empieza a cambiar hasta que llega al 63% de su valor objetivo.
- T es el tiempo de muestreo.

(Seem, 2006)

Para tener todos estos datos, se necesitaría probar los componentes elegidos para el sistema y medir los tiempos necesarios. Como esto no es posible, se toman datos de un sistema de climatización HVAC:

- $\tau = 20$ minutos
- $L = 2$ minutos

(Fr. Sauter AG, 2015)

Tanto el sistema referenciado como el desarrollado en este trabajo deberían estar bien dimensionados, así que la diferencia entra ambos debería ser mínima.

Así, el tiempo de muestreo queda:

$$\frac{L}{\tau} = \frac{2}{20} = 0.1$$

Desarrollo

Como se ha visto que la relación anterior debería estar entre 0.25 y 1, y como la constante de tiempo no afectará en el cálculo del tiempo de muestreo, se modifica L , para que sea 5:

$$\frac{L}{\tau} = \frac{5}{20} = 0.25$$

Y como se ha elegido un tiempo muerto más grande del tomado en la referencia, se espera una relación $\frac{T}{L}$ baja, por lo que, dentro de los límites establecidos, se escoge 0.3.

$$\frac{T}{L} = 0.3 \rightarrow T = 0.3 * L = 0.3 * 5 \rightarrow T = 1.5 \text{ minutos}$$

Por lo que el tiempo de muestreo son 90 segundos.

4.5.2. Código

4.6. DESARROLLO DEL CÓDIGO DE CONTROL Y SIMULACIÓN

4.6.1. Componentes y conexionado

Para diseñar el código de control y comprobar que funciona correctamente, se hacen simulaciones con un montaje formado por los siguientes componentes:

Elemento	Enlace
1 x ESP32-WROVER-E	https://www.amazon.es/gp/product/B09BC5CNHM/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o06_s00?ie=UTF8&psc=1
2 x placas peltier 12V	https://www.amazon.es/gp/product/B01M0K935F/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o05_s00?ie=UTF8&th=1
1 x Controlador de motor BTS7960	https://www.amazon.es/gp/product/B00WSN98DC/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o06_s00?ie=UTF8&psc=1

Sensor de temperatura SHT31-D	https://www.amazon.es/gp/product/B07ZSZW92J/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o06_s00?ie=UTF8&psc=1
1 x Fuente de 12V	https://www.amazon.es/RUIZHI-Alimentación-Transformador-Conmutación-Impresoras/dp/B0B28TN5XW/ref=sr_1_1_sspa?mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&crid=2L0A5J6NA9YOC&keywords=fuente+12V+30A&qid=1662477774&sprefix=fuente+12v+30a%2Caps%2C97&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFTTEpIWFc2NkJWNksmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTA4NTgyMzIzOTk2RVVOWkJaMVJHJmVuY3J5cHRIZEFkSWQ9QTAzNjAzMzcyUTNTUUEzN0JIMU5KJndpZGdlde5hbWU9c3BfYXRmJmFjdGlvbj1jbGlja1JlZGlyZWN0JmRvTm90TG9nQ2xpY2s9dHJlZQ==
4 x ventiladores 12V	https://www.amazon.es/gp/product/B07JRC6T7L/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o02_s00?ie=UTF8&psc=1
4 x disipadores	https://www.amazon.es/gp/product/B07ZNX839V/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o06_s00?ie=UTF8&psc=1
Caja de poliestireno expandido de 13l	https://www.amazon.es/BETTASHO-P-ES-Nevera-POREXPAN-Corcho-litros/dp/B07DL3SFMN/ref=sr_1_2?mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&crid=3RQG6L9MISNW&keywords=caja+poliestireno+13l&qid=1662477979&sprefix=caja+poliestireno+13l%2Caps%2C90&sr=8-2
Potenciómetro	-
Pulsador	-

Tabla 7: Elementos para simulación

La conexión de los componentes se muestra a continuación:

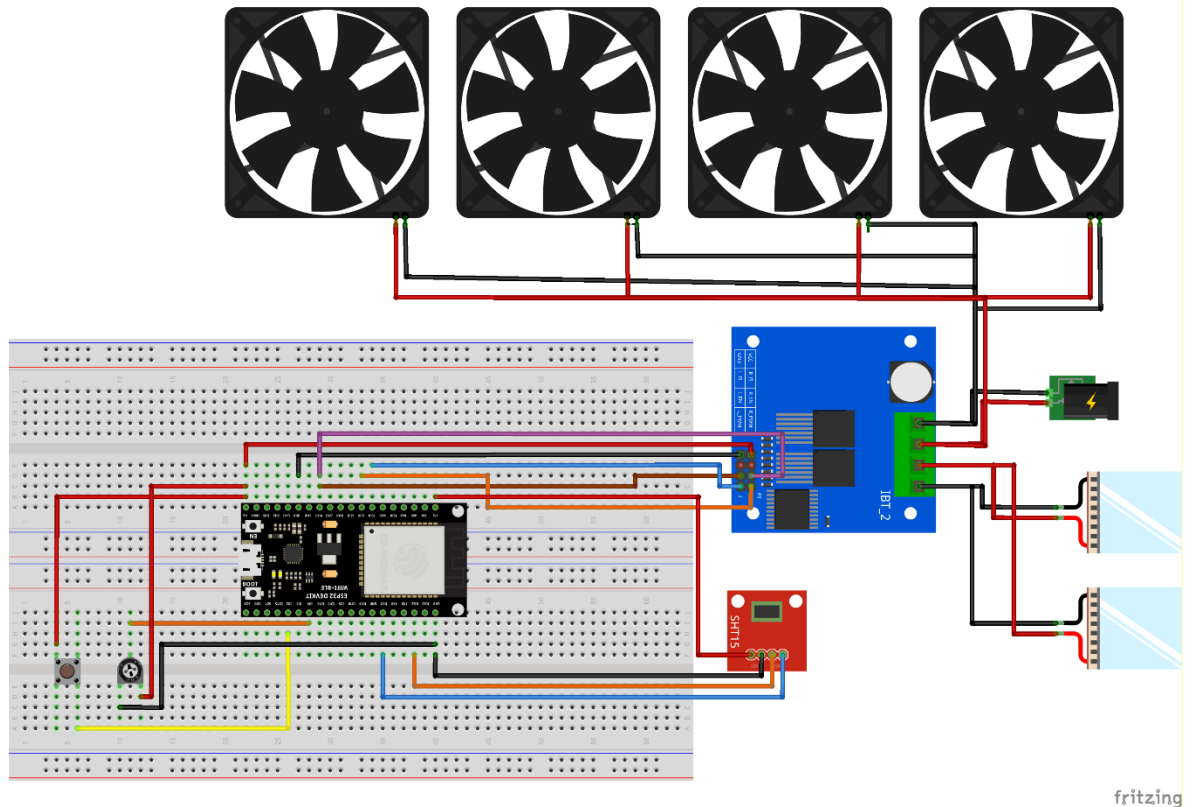


Ilustración 30: Conexión de sistema a simular

La caja de poliestireno hace de habitación, mientras que las placas peltier pueden tanto enfriar como calentar el interior de ésta (se usan dos porque su rendimiento para enfriar es bajo). Se usan disipadores en cada cara de cada placa peltier y, unidos a cada uno de ellos, un ventilador de 12V.

4.6.2. Conexión a Simulink

Para visualizar todos los datos necesarios se hace uso de MATLAB y su herramienta Simulink, a la que se envía los datos desde Arduino.

Para ello, se añade un bloque Serial Receive, el cual espera información através del puerto serial.

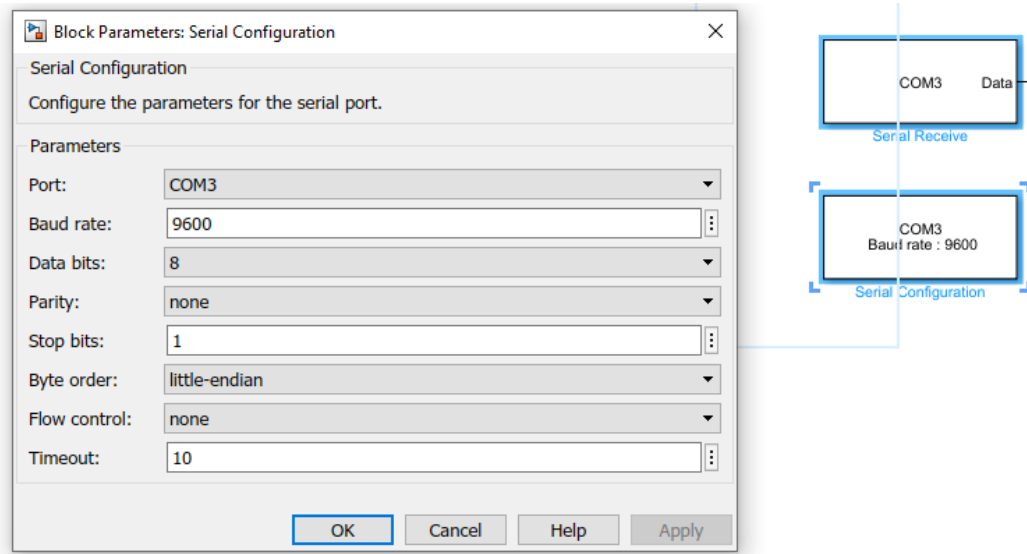


Ilustración 31: Configuración serial Simulink

Una vez configurado Simulink para recibir los datos, en Arduino se usa la función `Serial.write(x, y)`, donde `x` es el valor que se desea enviar e `y` es el número de bytes que tiene este valor. Se usa el tipo de dato `union`, para guardar datos tipo float en una dirección de memoria y leerlos como bytes, para poder mandarlos a través del puerto serial.

Para que Simulink sepa dónde empieza y acaba el envío de datos, se comienza con un:

```
Serial.write('T');
```

Y se termina con un:

```
Serial.write('\n');
```

Y en Simulink se aborda de la siguiente manera:

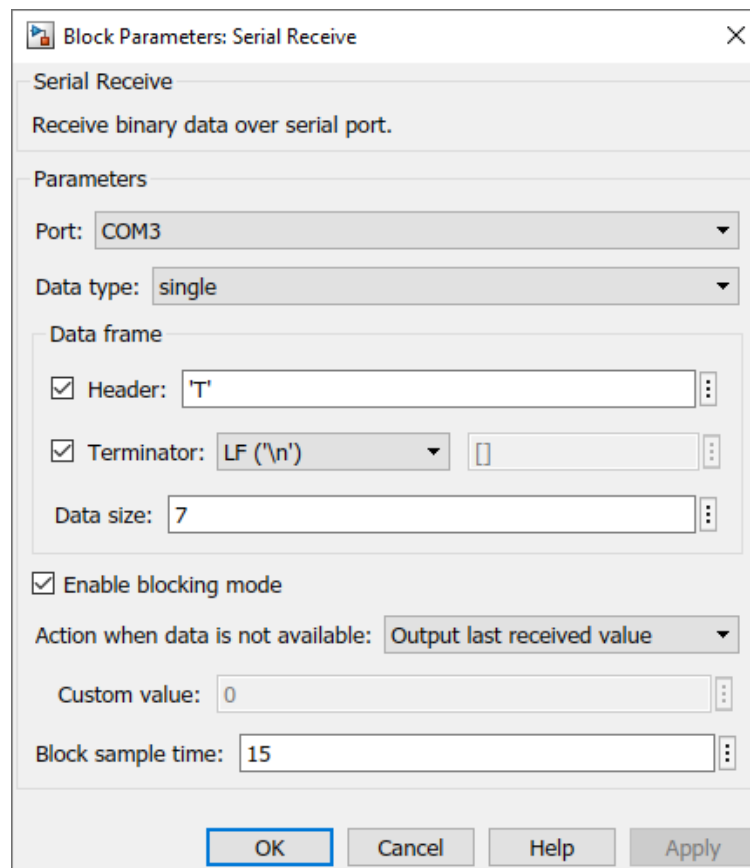


Ilustración 32: Configuración Simulink Serial Receive

Los datos recibidos se convierten a double con un bloque de conversión de datos y finalmente entran tanto a un visualizador de datos numéricos (display) como a un demultiplexor que divide toda la información en datos individuales para poder graficarlos en un scope.

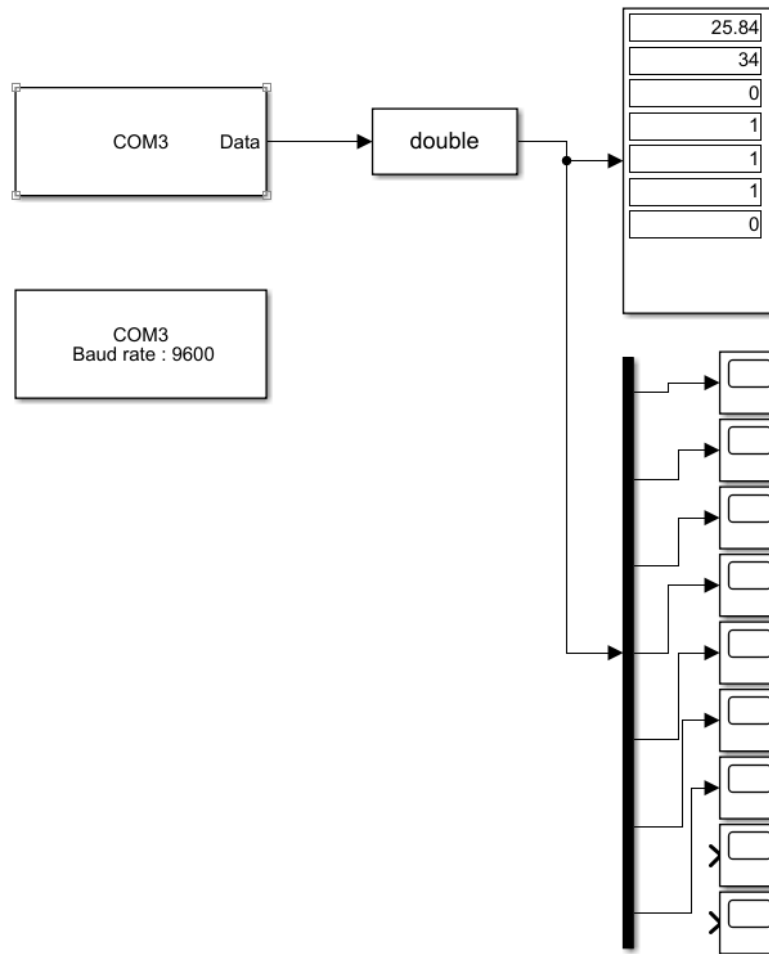


Ilustración 33: Diagrama completo Simulink

4.6.3. Diseño del algoritmo de control

Para escribir el código del sistema diseñado en este trabajo, primero se diseña el código de esta simulación, pues es necesario ver la respuesta de todo el sistema para poder mejorarla y comprobar que funciona correctamente.

Un dato importante va a ser el tiempo de muestreo que se use así que, para calcularlo, se ejecuta un control provisional para ver cuánto tarda en enfriar y llegar a la temperatura objetivo el aire del interior del habitáculo.

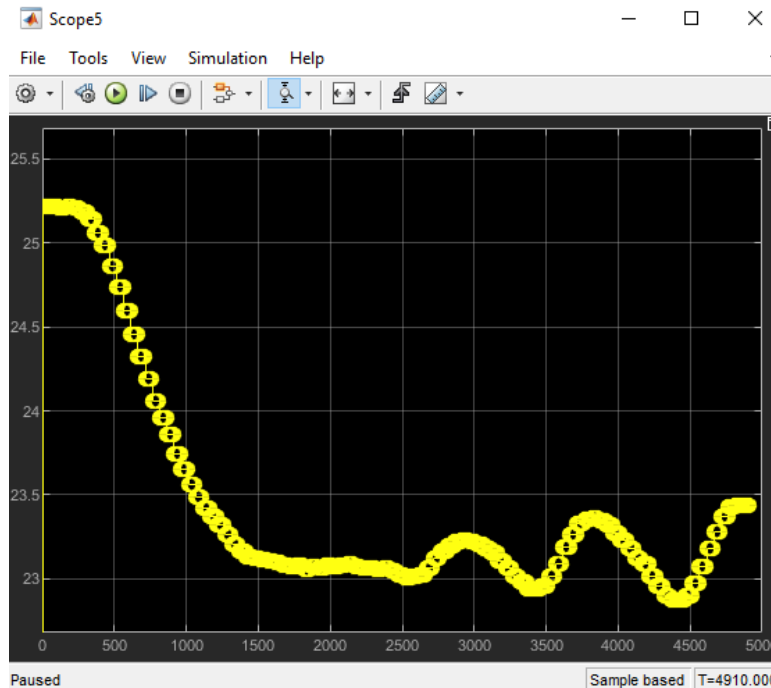


Ilustración 34: Salida de simulación enfriando para medir tiempo

En la ilustración anterior se ve que el tiempo muerto es aproximadamente 30 segundos (el tiempo se mide aproximadamente en décimas de segundo) y la constante de tiempo es aproximadamente 60 segundos (el 63% del valor objetivo es 23.8°C y esto se alcanza a los 90 segundos aproximadamente, a los que hay que restarles el tiempo muerto)

$$\tau = 60s$$

$$L = 30 s$$

$$\frac{L}{\tau} = \frac{30}{60} = 0.5$$

Esta relación se encuentra entre los límites establecidos $0.25 \leq \frac{L}{\tau} \leq 1$, por lo que de la siguiente relación $0.1 \leq \frac{T}{L} \leq 1$ se escoge un valor medio.

$$\frac{T}{L} = 0.5 \rightarrow T = 0.5 * L = 0.5 * 30 \rightarrow T = 15 \text{ segundos}$$

El rendimiento del sistema usado puede no ser el mismo al calentar y al enfriar, así que se miden los mismos tiempos calentando:

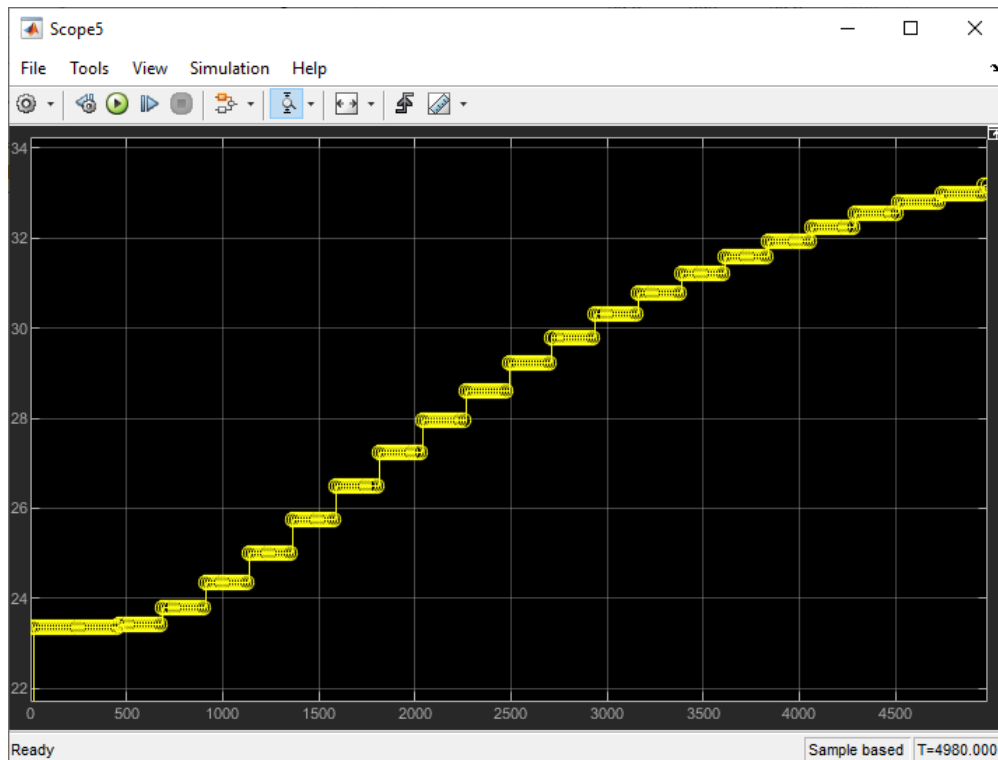


Ilustración 35: Salida de simulación calentando para medir tiempo

En este caso la simulación dura 5 minutos y medio y la temperatura objetivo es 30°C.

El tiempo muerto es de unos 35 segundos y la constante de tiempo es de 135 segundos (El 63% de la consigna es 27.5°C y se alcanza a los 170 segundos).

$$\frac{L}{\tau} = \frac{35}{135} = 0.26$$

Esta relación se encuentra entre los límites establecidos $0.25 \leq \frac{L}{\tau} \leq 1$, por lo que de la siguiente relación $0.1 \leq \frac{T}{L} \leq 1$ se puede escoger un valor para que se obtenga el mismo tiempo de muestreo que en el enfriamiento.

$$\frac{T}{L} = 0.43 \rightarrow T = 0.43 * L = 0.43 * 35 \rightarrow T = 15 \text{ segundos}$$

Con estos datos, se procede a escribir un código basado en el antecedente PRAC+, pero tras muchas versiones y modificaciones, no se llega a obtener un resultado satisfactorio, así que se opta tomar una ruta alternativa.

Se empieza con diseñar un diagrama de control sencillo que cumpla los requisitos para que sea adaptativo.

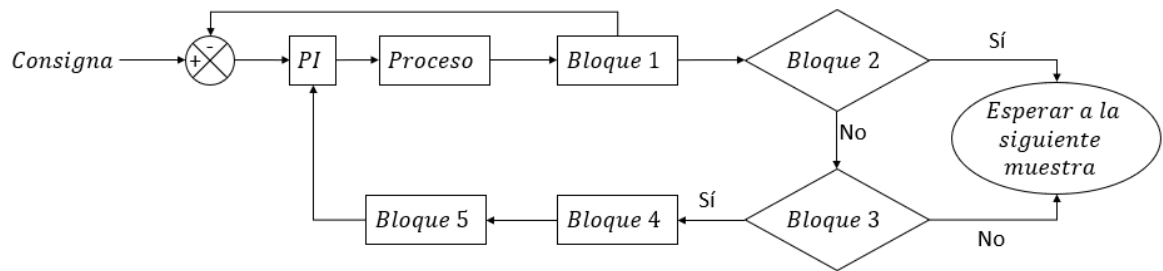


Ilustración 36: primer diagrama de control diseñado

- El bloque 1 se encarga de calcular la temperatura media, la pendiente y el ruido.
- El bloque 2 sólo se asegura de si ha habido un cambio en la consigna o no.
- El bloque 3 calcula varios parámetros y valores como los valores máximos y mínimos del error, la pendiente, la salida del controlador, etc. Este bloque sólo se ejecuta cada cierto número de muestreos, para que al sistema le de tiempo de responder y generar nuevos valores. El número de muestreos necesarios dependerá de si se ha cambiado la consigna recientemente o no, ya que se necesita más tiempo para ver la respuesta de un sistema cuando está respondiendo a un nuevo objetivo. La respuesta de este bloque es positiva una vez ha pasado el número de muestreos necesarios y se han calculado todos los valores.
- El bloque 4 contiene las leyes de adaptación, que decidirán qué parámetros se han de incrementar o decrementar.
- El bloque 5 se encarga de cambiar los parámetros de control.

Se usa un controlador PI como se usa en el antecedente que usa el control PRAC+, pero la respuesta oscila demasiado, así que se decide cambiar el controlador PI por un PID, para que exista una amortiguación dentro del control.

Las leyes de adaptación se diseñan para que, si la respuesta del sistema es a un cambio de consigna, se modifiquen k_i y k_p si la temperatura sube 2°C por encima del objetivo y que si no ha habido cambio de consigna, se modifiquen los parámetros si la temperatura sube o baja 0.5°C del objetivo.

La respuesta del sistema es la siguiente:

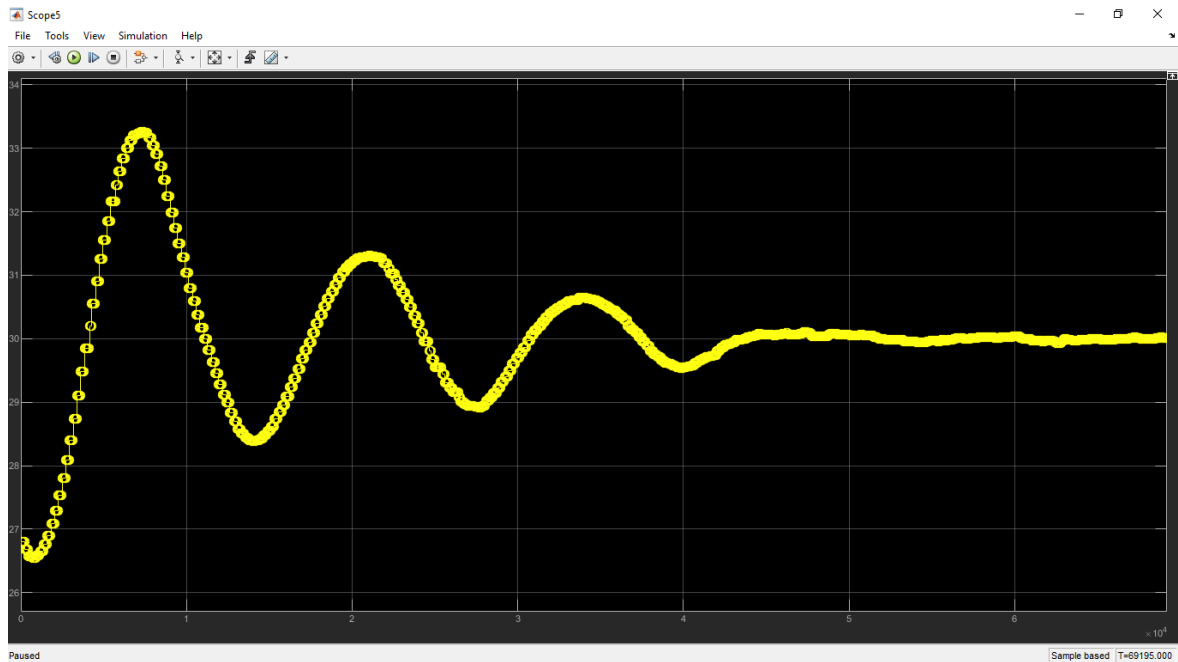


Ilustración 37: Temperatura en la simulación 1.1

Durante esta simulación suceden los siguientes cambios en los parámetros:

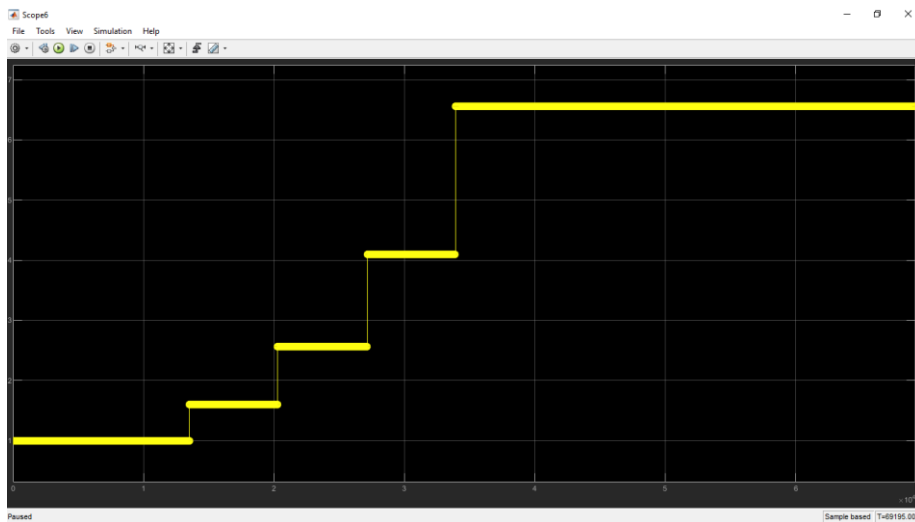


Ilustración 38: k_p en la simulación 1.1



Ilustración 39: k_i en la simulación 1.1

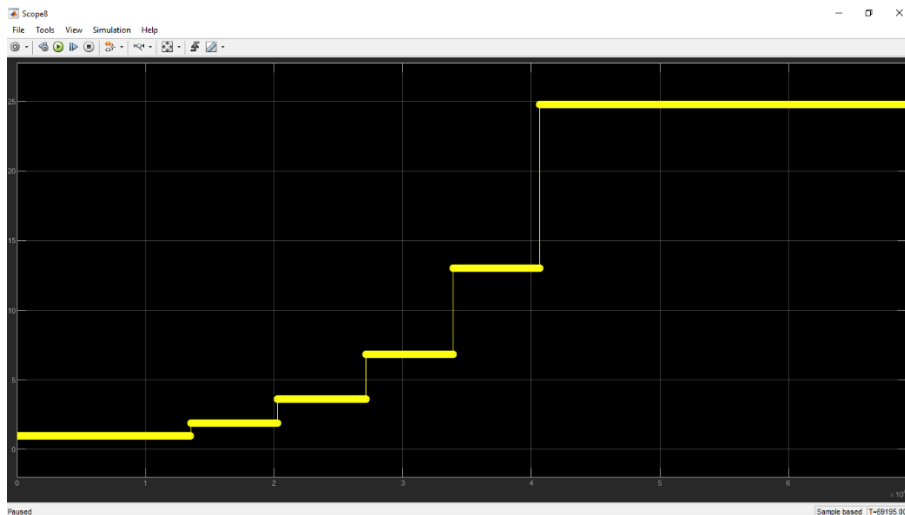


Ilustración 40: k_d en la simulación 1.1

Después de hacer este test, se hace otro exactamente igual, pero con los parámetros actualizados por el propio algoritmo:

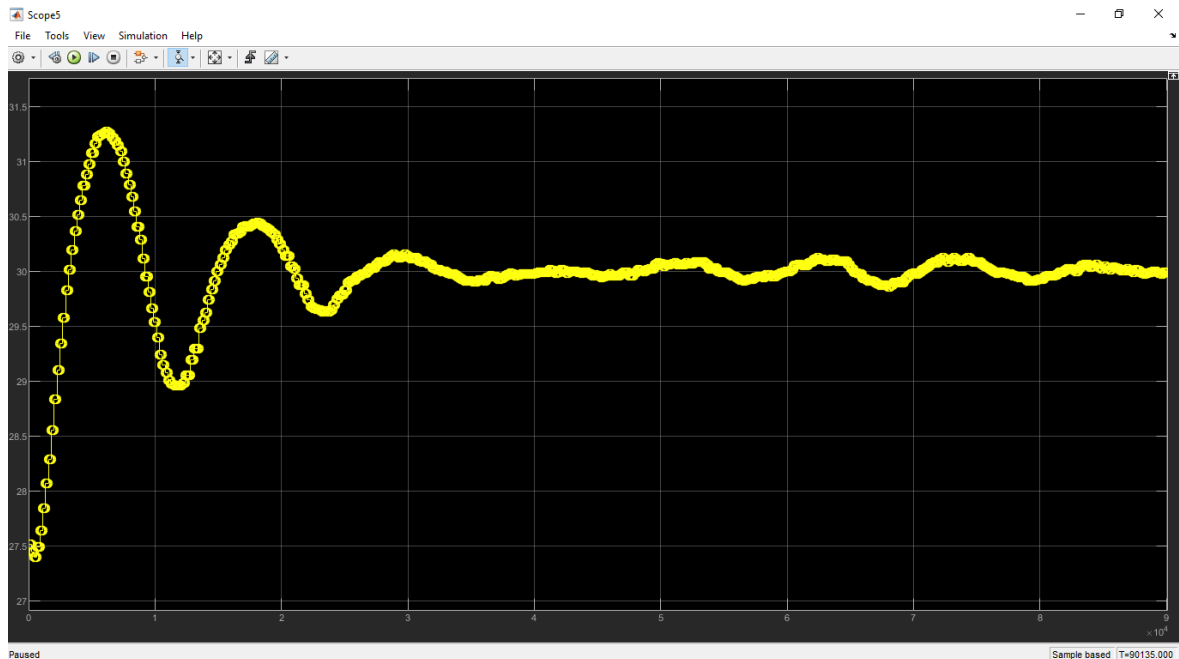


Ilustración 41: Temperatura en la simulación 1.2

La salida oscila con mucha menos amplitud, de más de 3°C en el primer test a menos de 1.5°C en el segundo.

Se hace una simulación de enfriamiento, pero para ver si el sistema es capaz de lograr mejores resultados, se reduce el límite de la primera toma de muestras de 2°C a 1.5°C y el de las demás de 0.5°C a 0.3°C y se obtiene la siguiente respuesta:

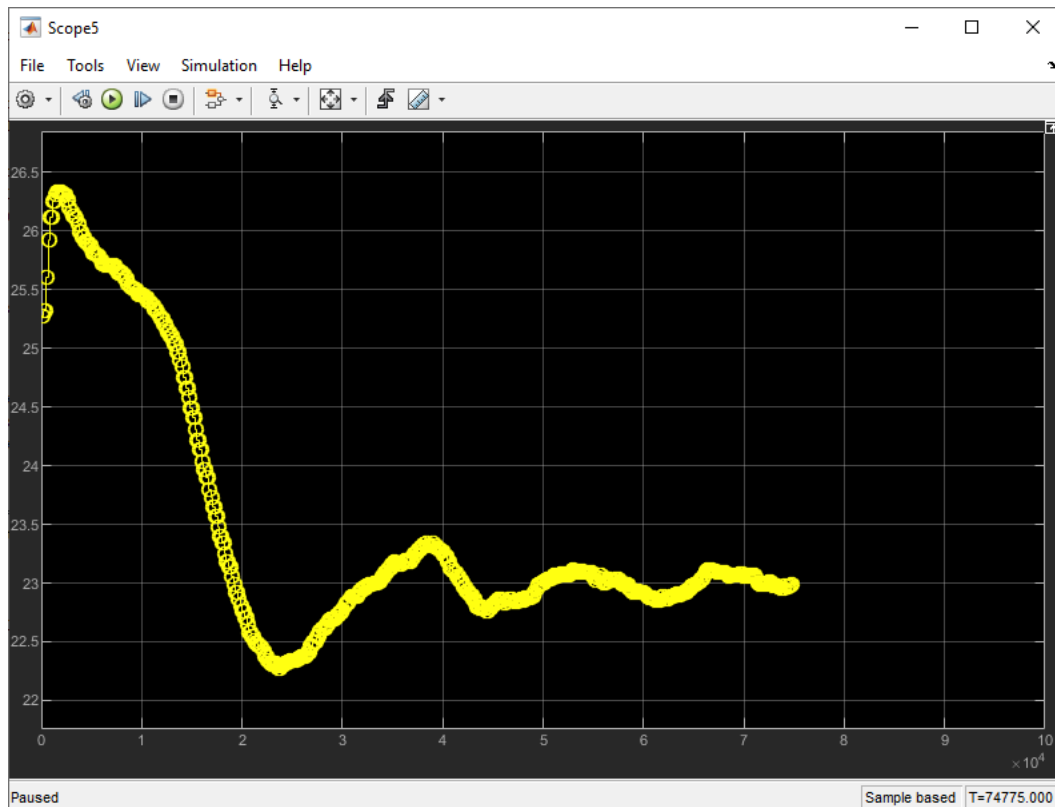


Ilustración 42: Temperatura en la simulación 2.1

Esta simulación tiene una duración de 1 hora y 23 minutos, por lo que se vuelve a hacer el cálculo del tiempo de muestreo:

- Constante de tiempo (τ) = 660s
- Tiempo muerto (L) = 100 s

$$\frac{L}{\tau} = \frac{120}{450} = 0.5$$

$$\frac{T}{L} = 0.5 \rightarrow T = 0.5 * L = 0.5 * 120 \rightarrow T = 60 \text{ segundos}$$

La respuesta puede haber sido demasiado lenta por tener unos parámetros no óptimos al comienzo, así que se reduce el tiempo de muestreo a $T = 45$ segundos para el enfriamiento.

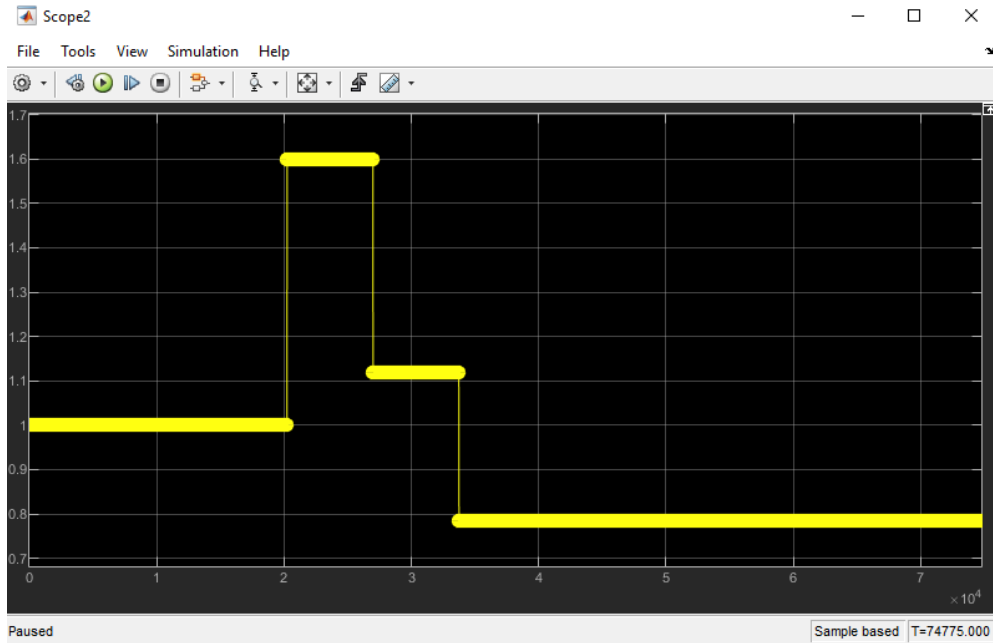


Ilustración 43: k_p en la simulación 2.1

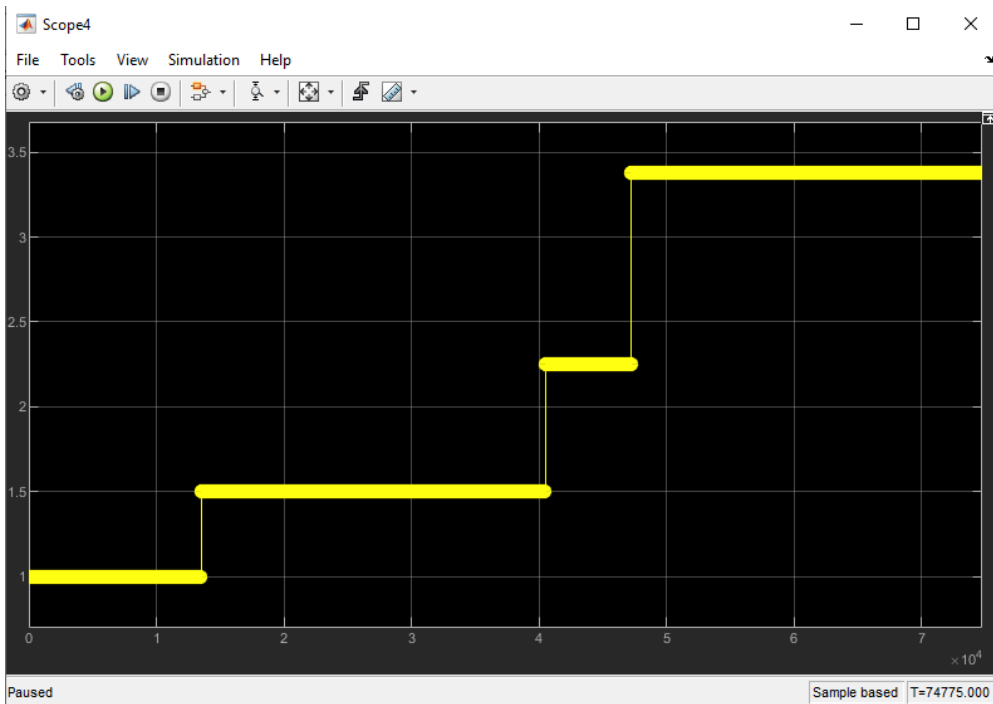


Ilustración 44: k_i en la simulación 2.1

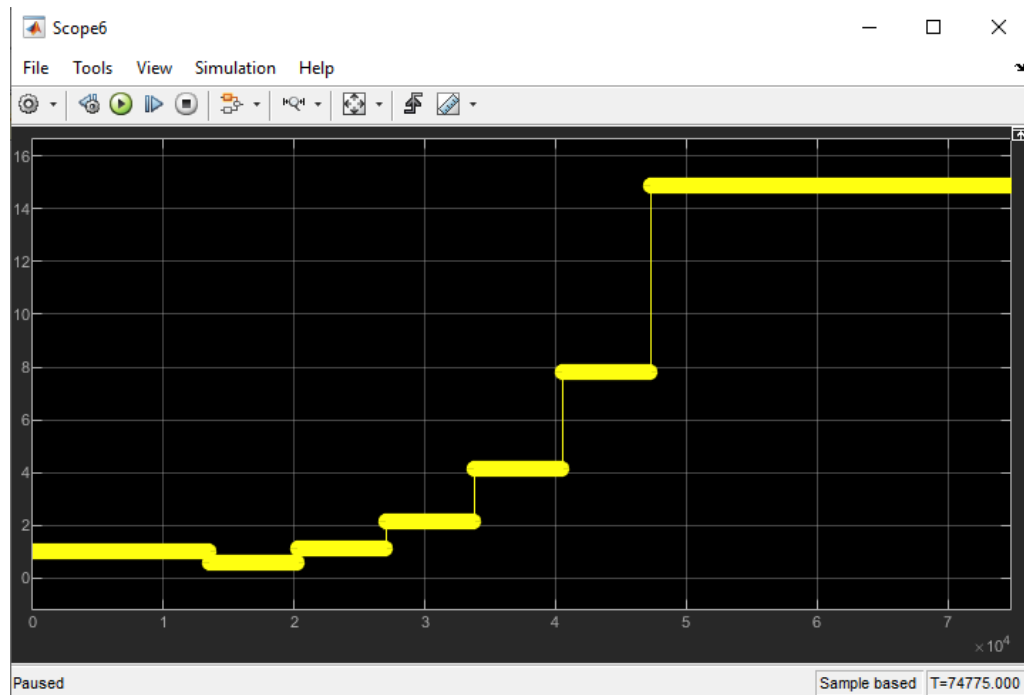


Ilustración 45: kd en la simulación 2.1

Hasta ahora, los parámetros k_i y k_d se han actualizado para hacer que la oscilación final esté dentro de los límites establecidos, y se ha hecho satisfactoriamente. Sin embargo, si la consigna no se alcanza dentro de la primera toma de muestras, sólo se incrementa k_i y se decrementa k_d ; para conseguir una mejor respuesta, se modifica teniendo en cuenta el número de oscilaciones de la salida y se disminuye el número de muestras a contar, es decir, el tiempo necesario para alcanzar el objetivo, de 59 muestras a 50. Después de los últimos cambios, las leyes de adaptación definitivas son las siguientes:

En la primera toma de muestras:

- Si la sobreoscilación sobrepasa 1.5°C
 - o Si la pendiente cambia de signo menos de 4 veces:
 - Se incrementa k_p
 - Se decrementa k_i
 - Se incrementa k_d
 - o Si la pendiente cambia de signo 4 o 5 veces
 - Se decrementa k_p
 - Se incrementa k_d

- Si la pendiente cambia de signo más de 5 veces
 - Se decrementa k_d
- Si no se ha alcanzado la consigna
 - Se incrementa k_p
 - Se incrementa k_i
 - Se decrementa k_d

En el resto de tomas de muestras

- Si la sobreoscilación sobrepasa 0.3°C por debajo de la consigna
 - Si la pendiente cambia de signo menos de 4 veces:
 - Se incrementa k_p
 - Si la pendiente cambia de signo 4 o 5 veces
 - Se decrementa k_p
 - Se incrementa k_d
 - Si la pendiente cambia de signo más de 5 veces
 - Se incrementa k_p
 - Se incrementa k_i
 - Se decrementa k_d
- Si la sobreoscilación sobrepasa 0.3°C por encima de la consigna
 - Si la pendiente cambia de signo menos de 4 veces:
 - Se decrementa k_i
 - Se incrementa k_d
 - Si la pendiente cambia de signo 4 o 5 veces
 - Se decrementa k_p
 - Se incrementa k_d
 - Si la pendiente cambia de signo más de 5 veces
 - Se decrementa k_p
 - Se decrementa k_d

Desarrollo

Además, se limitan los parámetros para que no hayan comportamientos no deseados: $Límite_{kp} = 100$, $Límite_{ki} = 10$, $Límite_{kd} = 1000$

Después de estos cambios, se realizan simulaciones hasta que la salida está dentro de los límites impuestos:

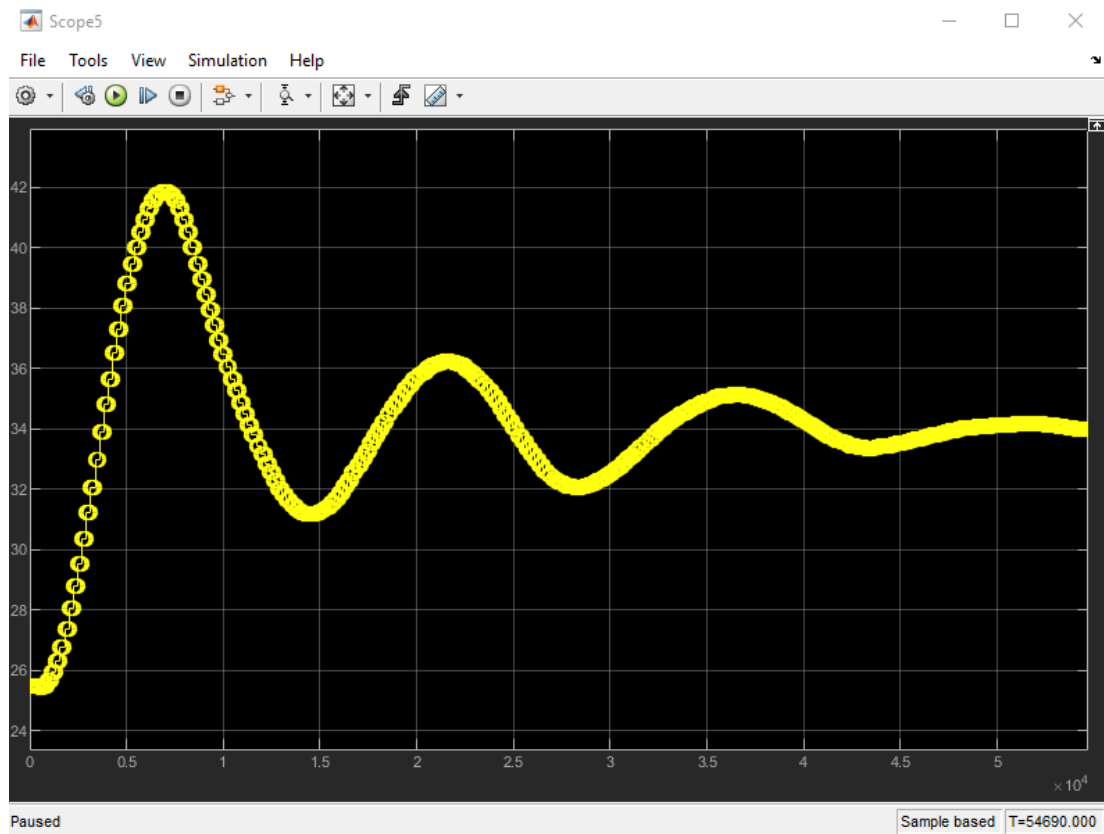


Ilustración 46: Temperatura en la simulación 3.1

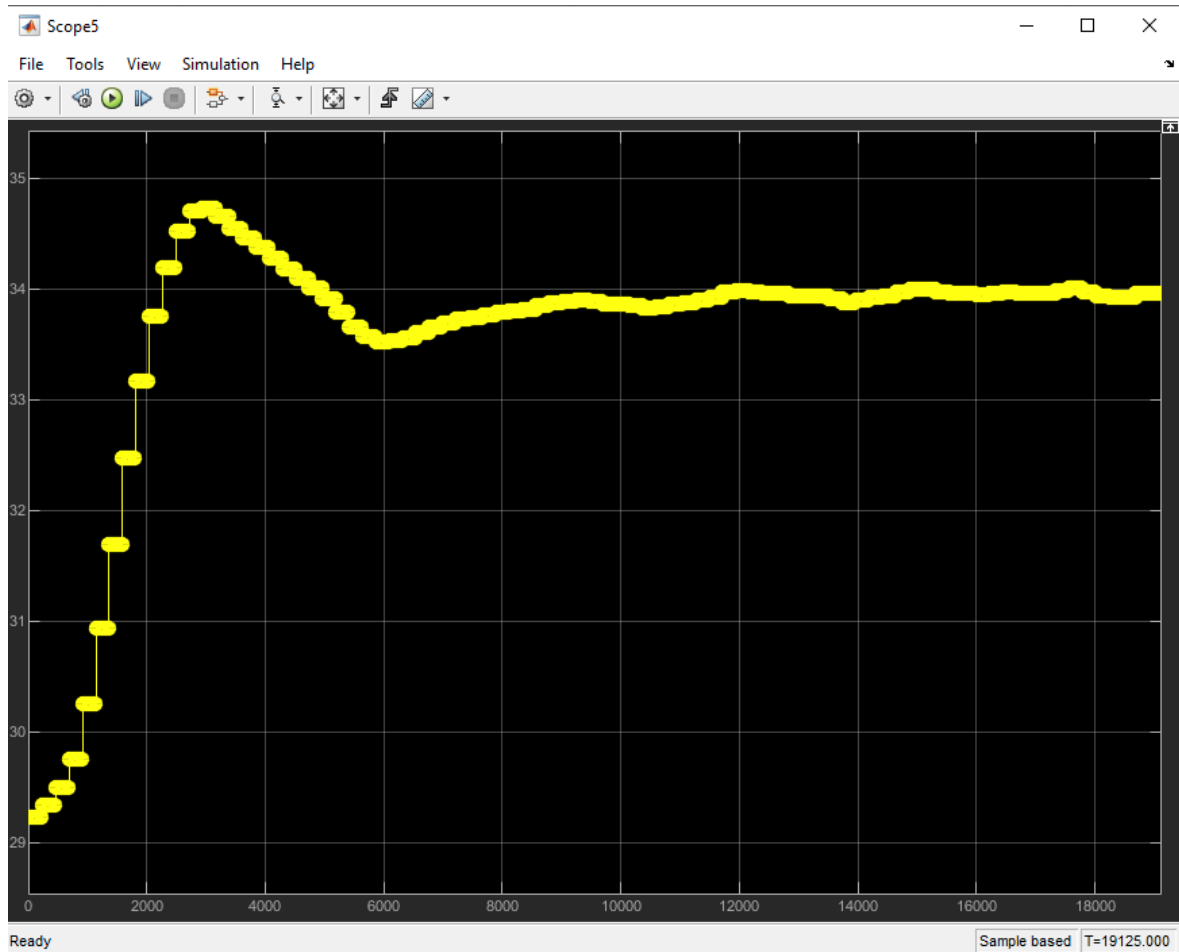


Ilustración 47: Temperatura en la simulación 3.2

Se puede ver cómo en la simulación 3.1 se tarda aproximadamente una hora en que la temperatura esté estable mientras que, en la 3.2, se alcanza la estabilidad antes de los 10 primeros minutos. También se mejora la primera sobreoscilación de 8°C a menos de 1.5°C. Las pequeñas oscilaciones de la simulación 3.8 se deben a un valor de kd muy alto, pero el algoritmo no cambia este valor, pues la respuesta está dentro de los límites deseados. Los parámetros finales son los siguientes:

- $K_p = 74.44$
- $K_i = 3.302$
- $K_d = 1346$

5. CONCLUSIONES

Se ha conseguido diseñar un sistema que cambie sus parámetros para tener una mejor respuesta, independientemente del sistema usado y del medio en que funcione. Aun así, las leyes de adaptación no hacen que los parámetros lleguen a ser óptimos, como se hace en alguno de los antecedentes estudiados. En un futuro, se podría implementar unas leyes de control que optimicen los parámetros al máximo para que el sistema sea lo más eficiente posible.

6. BIBLIOGRAFÍA

6.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cedar Lake Ventures, Inc. (2022). *Climate and Average Weather Year Round in La Almunia de Doña Godina*. Weather Spark.
<https://weatherspark.com/y/40534/Average-Weather-in-La-Almunia-de-Do%C3%B1a-Godina-Spain-Year-Round>

Cifuentes Estrada, D. G., Urbina Belteton, E. J., Flores Yordano, J., Castellanos Sulecio, G. A., Vicente Quelex, Á. A., & Jorge Iván, C. C. (2015). *CONTROLADORES ÓPTIMOS, LINEALES, NO LINEALES Y PID*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

Fr. Sauter AG. (2015). *TSHK 670...672: Fan-coil room-temperature controller, heating/cooling sequence*. <https://www.sauter-controls.com/wp-content/uploads/2019/02/859616.pdf>

Gough, B., & Don Matovich. (1997). *Predictive-Adaptive Temperature Control of Molten Glass*. 5. <http://ieeexplore.ieee.org/document/603511/>

Hovakimyan, N., & Cao, C. (2010). *L1 adaptive control theory: Guaranteed robustness with fast adaptation*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Iñigo, G. (2013, marzo 13). PID en Step7: Ejemplo de control de temperatura. *PROGRAMACIÓN SIEMENS*. <https://programacionsiemens.com/pid-en-step7/>

Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, de medidas de sostenibilidad económica en el ámbito del transporte, en materia de becas y ayudas al estudio, así como de medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural., BOE-A-2022-12925 (2022).
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-12925>

Bibliografía

KRUEGER. (2012). *FAN COIL ENGINEERING*. https://www.krueger-hvac.com/file/9263/Fan_Coil_Engineering.pdf

Documento Básico HS, (2019). <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DBHS.pdf>

Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios., Pub. L. No. Real Decreto 1027/2007, BOE-A-2007-15820 (2007). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-15820>

Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, Pub. L. No. Real Decreto 178/2021, BOE-A-2021-4572 33748 (2021). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/03/23/178>

Morris, B. (2022, mayo 2). FAN COIL UNITS | What, Where & How. *CONSTRUCT AND COMMISSION*. <https://constructandcommission.com/what-is-a-fan-coil-unit/>

Nguyen, N. T. (2018). *Model-Reference Adaptive Control*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56393-0>

Ponce, J. (2011, marzo 26). Cálculo de la carga térmica en calefacción según el RITE 2.007. *Javier Ponce Formación Técnica*. <http://javiponce-formatec.blogspot.com/2011/04/calculo-de-la-carga-termica-en.html>

Regional Controls Team, & Johnson Controls, Inc. (2010). *Introduction to PRAC (Pattern Recognition Adaptive Control)*.

Seem, J. E. (1998). A New Pattern Recognition Adaptive Controller with Application to HVAC Systems. *Automatica*, 34(8), 969-982. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(98\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(98)00033-8)

Bibliografía

Seem, J. E. (2006). *AN IMPROVED PATTERN RECOGNITION ADAPTIVE CONTROLLER*.

Johnson Controls, Inc, Milwaukee Wisconsin, USA.

Slotine, J.-J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. Prentice Hall.

Sotomayor Zajarov, D. J. (2014). *Simulación numérica del comportamiento de un intercambiador de calor de flujo transversal aleteado* [Pontificia Universidad

Católica del Perú].

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5421>

Woolf, P. J. (2009). *Chemical Process Dynamics and Controls*. University of Michigan Engineering Controls Group.

6.2. OTRAS FUENTES DE APOYO BIBLIOGRÁFICO

Morris, B. (2022, mayo 2). FAN COIL UNITS | What, Where & How. *CONSTRUCT AND COMMISSION*. <https://constructandcommission.com/what-is-a-fan-coil-unit/>

KRUEGER. (2012). *FAN COIL ENGINEERING*. https://www.krueger-hvac.com/file/9263/Fan_Coil_Engineering.pdf



Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria	74	páginas
<input type="checkbox"/> Anexos	63	páginas

La Almunia, a 20 de Septiembre de 2022

Firmado: Ignacio Enríquez Romero