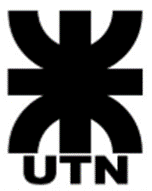
**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL (FRBA)**

**TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR**

TEORIA DE CONTROL K-4011

Prof. Omar Oscár Civale



Sistema de Control de Lazo Cerrado para Control de Temperatura en Notebook

Alumnos:

* María Emilia Andersen - 2088745
* Tomás Agustín Fabrizio - 2084820

**Pautas para el desarrollo del Trabajo Final de Teoría de Control**

1. Objeto de este documento

Proporcionar una guía de orientación para el desarrollo del Trabajo de Integración de Teoría de Control (oportunamente explicitado en sucesivas clases desde el inicio de la cursada).

Contiene el propósito, objetivos del trabajo, las pautas a seguir y las recomendaciones correspondientes.

2. Propósito

* Aplicar la totalidad de los conceptos fundamentales de la Teoría de Control a un sistema controlado elegido por cada equipo de trabajo.

3. Objetivos Generales

* Seleccionar un sistema de control aplicado a una solución tecnológica (preferentemente, del área de sistemas de la información).
* Fundamentar el sistema propuesto utilizando, a modo de marco teórico, los conceptos, fundamentos, enfoques y estrategias de la Ingeniería de Control.
* Aplicar diferentes técnicas o herramientas informáticas, en forma creativa, para realizar gráficos, modelos, cuadros comparativos, y, en general para expresar el análisis del problema y la solución propuesta.

4. Pautas

Desarrollo del trabajo

El trabajo de investigación será desarrollado por equipos de no más de dos integrantes. La fecha de entrega del Trabajo Final será informada mediante la plataforma del webcampus. Esta fecha permitirá la corrección del mismo antes de la primera fecha de llamado a final.

Para el caso de que el TP no sea aprobado y requiere de correcciones y/o mayor desarrollo, o no haya sido presentado hasta la fecha indicada, se estipulará una nueva fecha tope de entrega mediante el mismo procedimiento. (Preferentemente, y por la condición excluyente de aprobación de la materia se sugiere entregarlo antes de las fechas indicadas).

Una vez aprobado el TP, y en caso de tener cumplimentadas la totalidad de las actividades obligatorias pautadas, el alumno estará en condiciones de firmar la libreta. Para ello, se pautarán fechas a tal efecto.

La entrega se realizará en formato de archivo PDF por cada alumno en el web campus del curso (en el sitio dedicado a tal efecto).

En cada trabajo se incluirá en la carátula el listado de integrantes del grupo. Pueden realizarse consultas durante el período de desarrollo.

Composición del Trabajo de Investigación

El trabajo, desde el punto de vista formal, estará compuesto de las siguientes partes:

* Carátula: incluye el tema e integrantes del equipo de trabajo.
* Copia del presente documento.
* Indice: contenido del documento elaborado por el equipo.
* Introducción: se referirá al “segmento / mercado” en que se encuadra el trabajo (por ejemplo, “...el control del riego y la fertilización de una plantación...”).
* Objetivos: cuales son los objetivos de control a ser alcanzados y cual es la solución que se plantea u ofrece.
* Alcance: definir la estructura del sistema considerado, describiendo e identificando clara y explícitamente las diferentes funcionalidades correspondientes al mismo (por ejemplo: contexto; puntos de interconexión con el mundo exterior; tio de transductores; variables que se desea controlar, tipos unidades y rangos de entradas y salidas, amplificador de error; señales de error y realimentación; elementos de medición, características y variables componentes de las transferencias presentes en el sistema ; características de la respuesta; perturbaciones externas e internas a considerar; características y tipo de error; caracterización de la estabilidad; ley de control y tipo de actuación utilizada; relaciòn entre señales analógicas y discretas / digitales; carga/s asociadas al sistema).

El trabajo deberá incluir un programa confeccionado en LOGO (en lenguaje de bloques), que permita simular y verificar la funcionalidad del sistema.

**IMPORTANTE:** Tal lo explicitado en clase, no se solicita la descripción genérica del sistema controlado sino la identificación y descripción de su estructura.

En definitiva, “encontrar” la totalidad de los contenidos y conceptos trabajados y estudiados desde el dominio de la teoría de control.

* Descripción, desarrollo y fundamentación de la propuesta: debe ser clara, recomendándole técnicas de escritura conceptual y gráfica.
* Conclusión: A modo de conclusión, establecer la necesidad y ventajas comparativas del sistema de control propuesto. Es importante incluir opiniones del grupo en cuanto a posibles mejoramientos, objeciones, etc., que permitan establecer un cierto criterio ingenieril desde la perspectiva del equipo de trabajo.
* Consideraciones especiales: si aplica, indicar.
* Bibliografía: citar libros, documentos de texto y fotografías, folletos de dispositivos transductores, actuadores, sitios web y papers consultados.

*Prof. Mgtr. Omar Civale*

# Índice

[**Índice 3**](#_81gke5t0e3ql)

[**Introducción 4**](#_2vg8lgbxyy1y)

[**Objetivos 4**](#_jor8ttu6kr5g)

[**Alcance 5**](#_s6axpjd4dw3z)

[Contexto 5](#_3aqc3zcl3jo1)

[Puntos de interconexión con el mundo exterior: 5](#_li7zaiwcedft)

[Diagrama de bloques 6](#_4hltiau0eg55)

[Carga del sistema 7](#_tb3isn3y6gsf)

[Transferencias del Sistema 7](#_4tykd533y6by)

[Relación de solidaridad entre las revoluciones del cooler y la temperatura de la CPU 7](#_n7scxhw512u5)

[Entrada 8](#_4fwtwftbvdgh)

[Tipo de Control 8](#_uywf16eltr83)

[Tipo de Actuación utilizada: 9](#_6nsv5duqs548)

[Señales de error y retroalimentación 9](#_b616zv50od9y)

[Tipo de transductores 9](#_qhtojrjcmurh)

[Características y tipo de error 9](#_6dt93qmcsw88)

[Estabilidad 10](#_73lqsxd44kww)

[Perturbaciones 10](#_yij9i0asrd1j)

[Características de la respuesta 10](#_4b8a1zosd8lo)

[Transitoria: 10](#_ds4g23fpxm05)

[Estable: 11](#_glpbxg5zs6mc)

[**Conclusión 11**](#_kf1d0przm4gn)

[**Bibliografía 11**](#_pxd53tdfdu3w)

# Introducción

Este trabajo se enmarca dentro del estudio de un sistema de control aplicado al ámbito de la informática personal, particularmente en lo referido al manejo térmico en dispositivos portátiles. En estos entornos, la necesidad de mantener condiciones operativas seguras y estables para los componentes electrónicos se vuelve crítica, dado el espacio físico limitado y la creciente demanda de procesamiento.

El análisis se centrará en un caso representativo: la regulación de temperatura en una notebook de alto rendimiento. La problemática principal radica en las variaciones térmicas producidas por el uso intensivo del hardware, que deben ser gestionadas de forma rápida y eficiente para evitar daños o pérdida de rendimiento.

A través de este estudio se busca comprender de qué manera se aplica la teoría del control en un sistema real, analizando los conceptos clave que permiten regular su comportamiento frente a distintas condiciones de funcionamiento.

# Objetivos

El objetivo de control que se quiere alcanzar es mantener la temperatura interna de la notebook dentro de un rango seguro que permita un funcionamiento óptimo del hardware y evite daños por sobrecalentamiento. Esta temperatura está directamente relacionada con la velocidad de los ventiladores encargados de disipar el calor generado por los componentes internos.

Cuando la temperatura del procesador aumenta, el sistema incrementa la velocidad de los ventiladores para mejorar la ventilación y reducir la temperatura. Por el contrario, cuando la temperatura disminuye, el sistema reduce la velocidad de los ventiladores para minimizar el consumo energético y el ruido generado.

De esta forma, el sistema controla dinámicamente la temperatura interna, adaptándose a las variaciones en la carga de trabajo y las condiciones ambientales, asegurando un equilibrio entre el enfriamiento necesario y la eficiencia energética.

# Alcance

## Contexto

El sistema que tomaremos como referencia para analizar el control de temperatura de una pc es la Notebook Lenovo Legion 5, la cual cuenta con un procesador Intel i5 11600 H el cual opera a una frecuencia base de 2.9 GHz, 32 GB de memoria RAM DDR4 a 3200 Hz y cuenta con una unidad de procesamiento gráfico Nvidia RTX 3060 Mobile. Este sistema puede operar hasta temperaturas que alcanzan los 100°C, pero su valor normal de funcionamiento es de aproximadamente unos 65°C.

El sistema cuenta con ventiladores duales con control PWM (Modulación por Ancho de Pulso), ajustando la velocidad de los ventiladores, variando el tiempo de los pulsos eléctricos. La velocidad máxima de los ventiladores es de alrededor de 5000 a 6000 RPM.

Dependiendo de la temperatura del procesador se tomara alguna de las siguientes acciones detalladas a continuación:

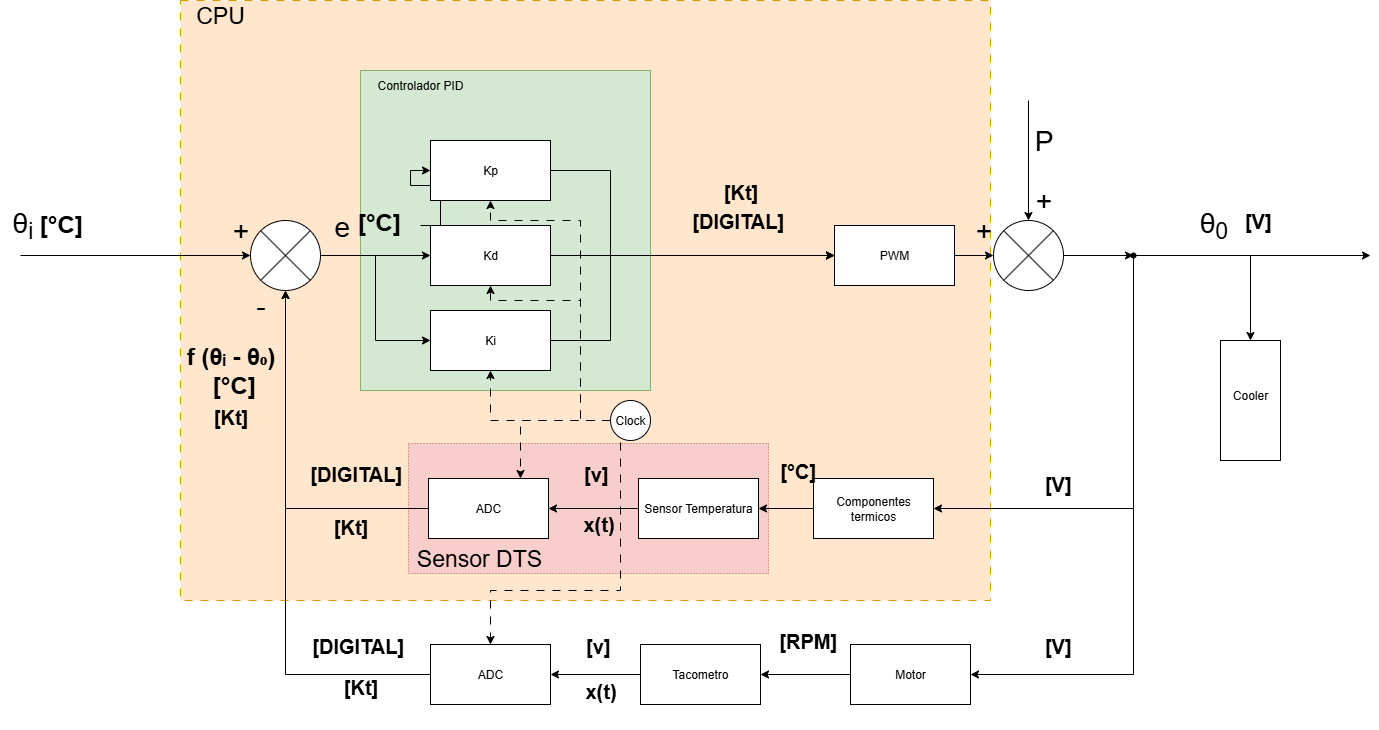
* **Debajo de 85°C:** Los ventiladores funcionan a una velocidad baja (10-30%), asegurando que la temperatura se mantenga estable sin generar ruido o consumir energía excesiva.
* **85°C-90°C**: Los ventiladores aumentan su velocidad (40% a 60%).
* **90°C-95°C**: Los ventiladores funcionan a máxima velocidad (80% a 100%).
* **Sobre 95°C**: Thermal throttling (reduce el rendimiento) para evitar daños.
* **100°C**: El sistema puede apagarse automáticamente.

## Puntos de interconexión con el mundo exterior:

El principal punto de interconexión con el mundo exterior es la temperatura del procesador y de la GPU, las cuales varían dependiendo del uso que se le esté dando a la computadora.

Otro punto de interconexión importante es el medio de conexión entre la CPU y el Cooler, principalmente son los cables de cobre que los conectan, aunque también podemos encontrar las distintas pistas de la placa base.

## Diagrama de bloques



**Controlador PID:** El sistema de control de temperatura de una computadora posee un controlador PID, lo que le permite atender a cualquier situación. Desde repentinos aumentos en la temperatura hasta aumentos progresivos y paulatinos.

**PWM:** se encarga de transformar la salida digital del controlador PID en una salida pseudoanalógica modulada en ancho de pulso con resolución de 8 bits, que sirve para controlar la velocidad del Cooler de la CPU.

**Tacometro:** Es un elemento de medición que ayuda a determinar la verdadera velocidad a la que se encuentra el cooler. Este genera una señal eléctrica analógica en forma de voltaje, cuya magnitud varía en función de la velocidad del ventilador: a mayor velocidad, el voltaje es más alto. Esta señal analógica es enviada al conversor analógico-digital (ADC), típicamente de 10 bits de resolución, que la convierte en un valor digital proporcional a la magnitud del voltaje dentro de un rango determinado. El sistema utiliza este valor digital para calcular la velocidad del ventilador en revoluciones por minuto (RPM) mediante una relación previamente calibrada entre voltaje y velocidad. Esta información es fundamental para ajustar la señal de control PWM, garantizando que el ventilador funcione a la velocidad necesaria para mantener la temperatura dentro del rango deseado.

**Componentes térmicos:** Son los componentes del procesador que van a reaccionar ante los cambios en los voltajes que llegan al cooler. Estos componentes actúan como un conversor de voltaje a temperatura..

**Sensor de temperatura:** mide la temperatura real de la CPU. El sensor genera una señal analógica en voltios (V) proporcional a la temperatura detectada. Esta señal es convertida por un convertidor analógico-digital (ADC) interno en un valor digital, que el sistema utiliza para controlar la velocidad del cooler y mantener la CPU dentro de un rango térmico seguro.

**ADC:** son conversores de señales analógicas a señales digitales. Estos bloques funcionales son altamente necesarios ya que nuestro sistema opera de forma digital, por lo que hay que adaptar las señales analógicas a digitales. Como se mencionó anteriormente, el ADC utilizado en nuestro sistema tiene una resolución de 10 bits, lo que permite representar la señal analógica con una precisión suficiente para el control térmico.

**Motor:** representa al motor del cooler, transforma el voltaje en un movimiento circular el cual es posteriormente medido utilizando el tacómetro. Físicamente se trata de un motor de corriente continua y es alimentado por el voltaje provisto por el PWM.

## Carga del sistema

La carga del sistema está representada por el cooler, el cual posee una relación directa con la temperatura de los componentes electrónicos durante el funcionamiento del equipo, principalmente la CPU y la GPU. Esta carga varía en función del nivel de exigencia al que se somete el sistema: tareas simples como la navegación web generan poca carga, mientras que actividades intensivas como juegos o renderizado aumentan significativamente la generación de calor.

El sistema de control debe detectar esta variación y actuar en consecuencia, ajustando la velocidad de los ventiladores para disipar el calor y mantener la temperatura dentro de los límites operativos seguros.

## Transferencias del Sistema

El sistema presenta 3 transferencias que nos interesan para el estudio del mismo, una transferencia que es característica de los sistemas del lazo cerrado que corresponde a la trayectoria directa y presenta dos transferencias de realimentación.

En la trayectoria directa encontramos que la transferencia estaría compuesta por la transferencia del controlador PID y por la transferencia del módulo PWM.

En la primera transferencia de realimentación encontraremos al tacómetro del Cooler, lo que nos permite verificar si el Cooler alcanza o no las revoluciones deseadas y lo que nos permite determinar si tenemos o no que aumentar el ancho de pulso de la señal.

En la segunda transferencia de realimentación encontramos a la CPU y a el Sensor de temperatura. En esta transferencia hay una relación de solidaridad entre las revoluciones que debería tener el cooler y la temperatura de la CPU.

## Relación de solidaridad entre las revoluciones del cooler y la temperatura de la CPU

Como se mencionó en otros apartados, la salida del sistema será un voltaje modulado en ancho de pulso, el cual sirve para determinar la velocidad con la que girará el cooler de una CPU. Normalmente, a mayor velocidad del cooler, menor temperatura en la CPU, pero esta relación no siempre es asi, ya que dependiendo la carga que se le esté administrando a la CPU es si podremos disminuir la temperatura o no.

Sin embargo, en condiciones normales de operación del sistema, donde la carga que se le impone a la CPU y/o a la GPU no son extremas, se puede suponer una relación de solidaridad que a mayor cantidad de revoluciones por minutos del cooler, menor será la temperatura de la CPU.

## Entrada

La entrada del sistema es la temperatura objetivo (θᵢ) a la que se desea que opere la CPU. Para nuestro análisis, consideraremos 60°C como temperatura de referencia, un valor típico para el funcionamiento normal de una notebook. Este valor nominal puede configurarse directamente en la BIOS o UEFI del sistema.

En las computadoras tanto los coolers como el sensor de temperatura operan con un voltaje nominal de 12V, por lo que es posible suponer que, teniendo en cuenta que una CPU opera entre 0°C y 100°C, 60°C corresponde aproximadamente a unos 7,2V de salida del sensor de temperatura.

En cuanto a la salida del tacómetro del cooler, sabemos que la velocidad del cooler es baja (entre un 10% y 30% de la velocidad máxima) pero la velocidad exacta dependerá de la configuración en la BIOS o UEFI del sistema. Si asumimos que a 60 °C el cooler opera al 20 % de su velocidad máxima, entonces la salida correspondiente del tacómetro sería de aproximadamente 2,4 V.

## Tipo de Control

Si bien el tiempo de scan depende del software utilizado para analizar la temperatura, si utilizamos el administrador de recursos que viene incluido con Windows, podemos determinar que el scan es cada 1 segundo.

Nuestro sistema implementa un control de tipo Proporcional - Integral - Derivativo (PID), teniendo un comportamiento proporcional por umbrales. Los distintos umbrales ya fueron explicados en el contexto.

Se opta por un controlador PID, y no por uno PI o PD, porque permite una regulación más precisa en un sistema con variaciones tanto rápidas como sostenidas de temperatura. La acción proporcional, presente en todo tipo de controlador, actúa de forma inmediata ante cualquier diferencia entre la temperatura deseada y la obtenida, ajustando la respuesta del sistema en función del error actual. La acción integral permite corregir errores pequeños pero persistentes que, si no se corrigen, mantienen al sistema funcionando a temperaturas por encima del valor nominal (65°C). La acción derivativa, en cambio, permite anticiparse a aumentos bruscos de temperatura, como los que ocurren al iniciar tareas intensivas, evitando que se alcance el umbral de thermal throttling (95°C) o incluso el apagado automático (100°C). Así, el controlador PID logra mantener el valor nominal deseado, pudiendo anticiparse a cambios bruscos en la temperatura y pudiendo adaptarse a cambios leves en la misma.

El controlador recibe una señal de error en volts e(t) = θi - f(t), que se corresponde con la resta entre la temperatura de CPU deseada y el valor de retroalimentación, que esta compuesto por la temperatura actual de la CPU y por la velocidad del cooler actual.

## Tipo de Actuación utilizada:

El sistema utiliza una actuación del tipo electro-mecánica, ya que la señal de control generada por el controlador PID es procesada por un módulo PWM, que transforma la señal en pulsos digitales de ancho variable.

Esta señal PWM luego es aplicada directamente a los ventiladores del sistema, los cuales poseen controladores internos capaces de interpretar dicha modulación y ajustar la velocidad de rotación del motor en consecuencia. De esta forma se transforma la señal de control digital en una acción mecánica.

## Señales de error y retroalimentación

Señal de error: la señal de error está principalmente compuesta por la señal de retroalimentación proveniente del sensor de temperatura. Aunque cabe recalcar que la señal proveniente del tacómetro también afecta a la señal de error, pero lo hace en menor medida.

Señal de retroalimentación: esta señal está compuesta por dos señales, la señal proveniente del sensor de temperatura y por la señal proveniente del tacómetro del cooler.

## Tipo de transductores

El procesador intel I5 11600 H no utiliza un transductor en el sentido convencional para medir la temperatura el mismo, sino que integra sensores térmicos digitales directamente en el silicio del chip. Estos sensores térmicos digitales (DTS por sus siglas en inglés) funcionan de la siguiente manera: mide una diferencia relativa con respecto a la temperatura máxima segura del procesador.

Los coolers para medir las revoluciones utilizan un sensor de tipo Hall o codificadores rotativos para medirlas. Los sensores de efecto Hall detectan cambios en el campo magnético generado por imanes en el eje del ventilador, mientras que los codificadores rotativos proporcionan una medida más precisa de la posición angular y el sentido de rotación.

## Características y tipo de error

El error a la salida de nuestro sistema se representa como una variación en la velocidad del cooler, lo que representa una variación en la temperatura de la CPU. Esto produce que la CPU no se encuentre adecuadamente refrigerada, afectando la capacidad del sistema a responder ante los cambios de temperatura del sistema.

El rango de error admisible en el valor de salida es de 10°C a 95°C, ya que a temperaturas superiores a los 95°C tendríamos que empezar a limitar la capacidad de procesamiento de la CPU para evitar que la misma se siga sobrecalentando, y a temperaturas inferiores a los 10°C encontramos una alta probabilidad de que la humedad del aire se condense en los componentes de la PC, pudiendo causar fallas catastróficas en el sistema. Por lo que nos encontraremos en falla a temperaturas inferiores a los 10°C y a temperaturas superiores a los 95°C.

El error en estado estable que presenta el sistema tiende a cero, esto es posible afirmarlo por el tipo de control del sistema. Como el mismo presenta un controlador PID, es posible afirmar que el mismo responderá de forma adecuada a cada situación que se le presente, lo que hace que el sistema tienda al valor nominal.

## Estabilidad

Teniendo en cuenta que la estabilidad de un sistema es la capacidad de, ante una variación brusca en la entrada, es capaz de volver a un estado estable, es posible afirmar que nuestro sistema será estable debido a que presenta un controlador PID, lo que le permite responder de forma acorde a cualquier situación que se pueda presentar, que a su vez implica que el sistema siempre podrá volver al valor nominal de temperatura. Aunque cabe recalcar que esta estabilidad sólo es alcanzable siempre y cuando los valores de temperatura no sobrepasen los límites que corresponden al estado de falla. Si bien existen temperaturas de falla donde el sistema todavía se puede recuperar (temperaturas inferiores a los 110 °C), cualquier temperatura superior a estas implica que la computadora se apagará. La estabilidad del sistema también fue verificada a través de la simulación realizada.

## Perturbaciones

El sistema que analizamos puede presentar varias perturbaciones. Las más relevantes son:

* Deriva térmica: este fenómeno se produce cuando los componentes que se encuentran en el sistema de refrigeración generan más calor de lo que puede disipar el sistema de refrigeración, causando un repentino aumento en la temperatura del sistema.
* FMI (Interferencia electromagnética): generadas por campos electromagnéticos provenientes de fuentes como transformadores o motores eléctricos cercanos. Estas interferencias pueden afectar el funcionamiento del ADC o del sensor de temperatura, provocando lecturas incorrectas y, por ende, una respuesta inadecuada del sistema de control.
* RFI (Interferencia de radiofrecuencia): Es causada por señales de radiofrecuencia emitidas por dispositivos como teléfonos móviles, routers Wi-Fi o equipos de comunicaciones. Al igual que la FMI, puede generar distorsiones en las señales analógicas o digitales, lo que compromete la precisión de las mediciones y el control de la temperatura.

Mientras que la temperatura ambiente elevada constituye una perturbación sostenida, las interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia son típicamente transitorias, aunque su impacto puede ser significativo si afectan componentes sensibles como el sensor o el ADC.

## Características de la respuesta

### Transitoria:

En una instancia inicial el procesador de la computadora se encontrará a temperatura ambiente, una vez encendida la PC se observa un rápido y abrupto crecimiento en la temperatura de la misma, ya que se realizan todos los procesos de iniciación del computador y a su vez es posible oír y observar como los coolers aumenta sus revoluciones repentinamente para poder mantener la temperatura del procesador lo más cercana posible al valor nominal.

### Estable:

Una vez que el sistema alcanza el valor nominal, podemos afirmar que se ha llegado al estado estable. Este estado presenta las siguientes características:

* Error en estado estable: el error tiende a cero o se mantiene dentro de la banda de error (10; 95 °C). Esto es posible gracias a la acción del controlador PID.
* Ausencia de oscilaciones sostenidas: el ventilador varía su velocidad de forma suave y adaptativa. Esto implica que el mismo no se está encendiendo y apagando rápidamente e implica que la velocidad del ventilador no realiza muchos cambios de frecuencia.
* Precisión: debido al tipo de controlador que utiliza el sistema, es posible obtener exactamente las revoluciones necesarias en cada instante, lo que no solo hace que el consumo energético baje, sino que implica que el ruido del sistema es menor.

# Conclusión

El control de temperatura en una notebook como la Lenovo Legion 5 es esencial para asegurar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil del equipo. Una ventaja clave del sistema propuesto es su capacidad de respuesta dinámica ante cambios térmicos, evitando sobrecalentamiento sin generar ruido ni consumo excesivo en condiciones normales. La retroalimentación dual, mediante el sensor de temperatura y el tacómetro, mejora la precisión y estabilidad del control.

Desde nuestra perspectiva, se podrían incorporar mejoras como sensores adicionales para medir temperatura ambiente y humedad, o algoritmos adaptativos que ajusten el controlador PID según el uso y condiciones externas. También es vital considerar mecanismos de seguridad frente a fallas en sensores o actuadores.

En conclusión, el sistema analizado ofrece una solución robusta y eficiente para el control térmico en notebooks, aunque siempre hay espacio para optimizar su desempeño, reflejando la importancia de aplicar criterios ingenieriles y pensamiento crítico en el diseño de sistemas de control.

# Bibliografía

Lenovo. *Lenovo Legion 5 15ITH6H Specifications*. <https://psref.lenovo.com/syspool/Sys/PDF/Legion/Lenovo_Legion_5_15ITH6H/Lenovo_Legion_5_15ITH6H_Spec.pdf>

Wikipedia. (2024). *Processor power dissipation*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Processor_power_dissipation>

Wikipedia. (2024). *Computer fan control*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_fan_control#Hardware>

Microchip Technology Inc. *PID Fan Speed Control for 4-Wire Fans* (Application Note 00003530A). <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ApplicationNotes/ApplicationNotes/PID-Fan-Speed-Control-for-4-Wire-Fans-00003530A.pdf>

Linus Tech Tips Community. (2022). *Are fan speed readings in BIOS accurate when using fan splitter.* <https://linustechtips.com/topic/1276697-are-fan-speed-readings-in-bios-accurate-when-using-fan-splitter/>