

Trabajo integrador de Sistemas de Control I

Sistema de Control de humedad ambiente en un Datacenter Sumergido



Alumnos:

- Facundo Lorenzo 41411627
 - Emiliano Godoy 41524015
-

Índice

Definición del problema	2
Análisis del datacenter	5
Conclusiones	14

Definición del problema

Introducción

A principios del año 2020 la compañía [Microsoft](#) y varios colaboradores dieron a conocer los resultados del proyecto [Natick](#), el cual consiste en sumergir un datacenter y evaluar sus resultados con respecto a un datacenter “gemelo” situado en tierra. Los resultados indican que el datacenter sumergido fue mucho más eficiente en aspectos como consumo energético y fallas de componentes en comparación con su hermano en terrestre. Este descubrimiento demuestra que la correcta implementación de la ingeniería en el trabajo puede lograr ahorrarnos mucho dinero y recursos en el proyecto.

Principio de funcionamiento del Sistema de Control

Un data center debe mantener la temperatura dentro de un rango de 18° a 27° y una humedad relativa entre el 25 y el 80%. Entonces para lograr dichos valores se controla la temperatura con un sistema de aire acondicionado, el cual reduce la humedad ambiente, y se implementa un sistema de control de humedad para regular la misma.

¿Qué buscamos controlar?

Se busca controlar la humedad relativa del ambiente la cual debe estar alrededor de **30%** considerando que el sistema de aires acondicionados nos otorga una temperatura constante de 22° .

Variable de Salida

La variable a medir por el sensor de humedad relativa es el porcentaje de agua que existe en el aire en determinado momento, el sensor nos otorga una señal eléctrica la cual está relacionada matemáticamente por una función lineal con el porcentaje de humedad que existe en el aire en ese momento (humedad relativa %).

Esta señal es insuficiente para los pines GPIO del microcontrolador, por eso debe ser sometida a un aumento en la ganancia para que el microcontrolador sea capaz de leerla.

Acción de Control

La acción de control la llevará a cabo el humidificador. El microcontrolador evaluará la señal del sensor de humedad y, en función de la diferencia entre la humedad medida y la humedad deseada (set point), activará el humidificador para agregar humedad al entorno del datacenter. El microcontrolador ajustará la duración de la operación del humidificador para mantener la humedad en el rango deseado.

Perturbaciones

Se considerarán las siguientes posibles perturbaciones en el sistema.

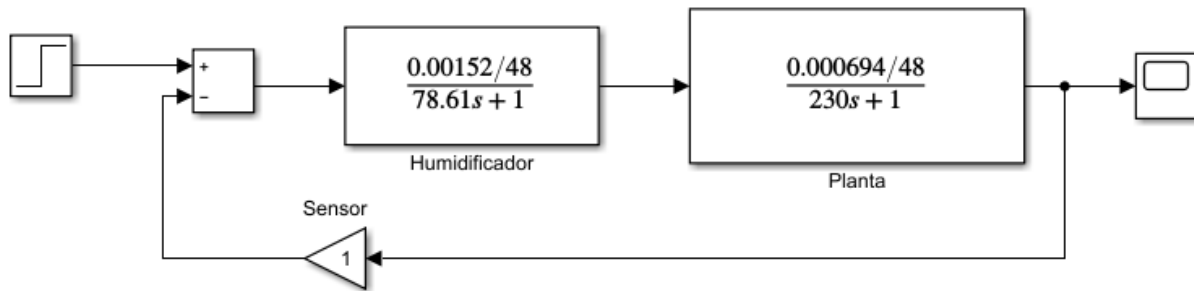
- Cambios en la temperatura y humedad externa. Se considera una variación mínima debido a los cuidados en la infraestructura del datacenter.
- Variaciones en la presión atmosférica. También se suponen variaciones mínimas, esto se debe a que el datacenter está bajo a una profundidad constante.
- Posibles fugas de agua. Es una posibilidad prácticamente nula a menos que ocurra un incidente grave.

Medición de variables y nivel de entrada y salida

- Sensor de humedad resistivo:
 - Entrada: Señal eléctrica entre 0 y 5[v]
 - Salida: Señal eléctrica (para 30% HR) 0,9 [v]
- Microcontrolador:
 - Entrada: Señal eléctrica entre 5[v]
 - Salida: Señal eléctrica PINOUT GPIO 5[v]
- Humidificador
 - Entrada: Señal eléctrica de 42[v]
 - Salida: Humedad relativa HR% en 5,5 [lts/hr]

Análisis del datacenter

Diagrama de bloques



Modelo Matemático

El siguiente paso de nuestro análisis es definir el modelo matemático del data center, comenzamos por su forma de cilindro con un volumen calculable de $44,2 \text{ m}^3$. Sabemos que cuenta con 12 racks de 2 m^3 cada uno lo que nos deja un volumen restante de aire dentro del datacenter de **$20,2 \text{ m}^3$** .

Mediante una herramienta de software libre ([link 4 del anexo](#)) que calcula el porcentaje de humedad relativa en el aire según las condiciones que seteamos calculamos que la densidad del aire para una *humedad relativa del 30%, a 0 metros sobre el nivel del mar y a 22°C* obtenemos $1,19 \text{ kg/m}^3$. Con esta información y multiplicando el volumen de aire por su densidad obtenemos **el peso del aire con "agua" es $24,03 \text{ kg}$** . La herramienta nos provee la información de cuantos gramos de agua encontramos por kg de aire con "agua", la relación es de 1 kg por cada 4.96 gr de agua.

Concluimos que para lograr **$24,03 \text{ kg}$** (de aire con agua) necesitamos **$0.1195 \text{ litros de agua}$** .

Ahora analizamos elemento por elemento del diagrama:

- Humidificador

El modelo matemático del humidificador debe representar la relación eléctrica entre la señal de entrada con la cantidad de humedad que agrega el ambiente.

En el mercado encontramos un humidificador que consume 48 voltios y provee 5,5 litros de agua por hora, lo que es lo mismo decir $1.52 \cdot 10^{-3}$ L/s. Para completar nuestros 0.1195 L de agua necesitamos 78.61 segundos el humidificador encendido.

La relación entre la señal de control (entrada) y la humedad agregada (salida) se puede representar mediante la siguiente función de transferencia:

$$FTH = \frac{\frac{1.52 \cdot 10^{-3}}{48}}{78.61 s + 1}$$

- Sensor de humedad

Como el sensor es alimentado y su información procesada todo íntegramente por el microcontrolador, lo vamos a representar con una ganancia unitaria debido a que el dato lo aporta al sistema tal cual es obtenido, luego de haber sido procesado por el microcontrolador.

Esto es: $G_{\text{sensor}} = 1$

$$FTSH = 1$$

- Función de transferencia de la planta

Como sabemos el aire acondicionado será el encargado de mantener nuestra temperatura a 22°, el cual no solo enfría el aire, al mismo tiempo reduce la humedad ambiente del datacenter.

Esta pérdida de humedad está determinada numéricamente por la relación 2.5L/h, de esta forma nuestro sistema de control deberá sistemáticamente corregir esta pérdida de humedad para poder mantener nuestro sistema con la temperatura esperada.

Supongamos que en un principio por las condiciones de ambiente de nuestra planta se encuentra con una humedad relativa del 70% , esto nos dice que el aire en este momento tendrá 11.57g/Kg (de agua/kg aire seco), si calculamos la diferencia con nuestro valor esperado para una humedad relativa del 30%,es decir, 4.96g/Kg, obtenemos que deberíamos perder 6.61g/Kg y que al tener una densidad promedio de 1,19 kg/m vamos a tener un peso total del aire del 24 kg, es decir, 158.8g para todo el volumen del cilindro. Si tenemos en cuenta que que esta pérdida está determinada por la relación 2.5L/h que es lo mismo que decir 694.5 e-6 L/s y que los 158.8g equivalen 0.1588 L, entonces podemos determinar que esta pérdida concluye en el transcurso de **230s**.

De esta forma estamos en condiciones de definir la función de transferencia de la planta:

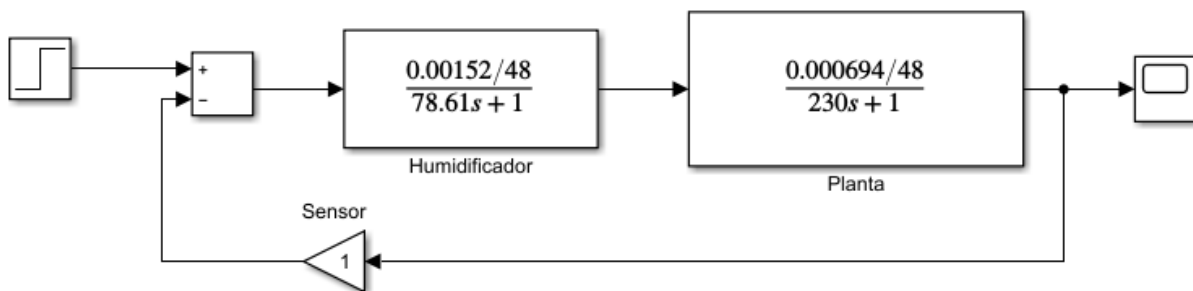
$$FTS = \frac{\frac{0.0003945}{48}}{230s+1}$$

Función de transferencia

A partir del diagrama de bloques y los modelos matemáticos de cada componente podemos expresar la función de transferencia a lazo abierto del sistema completo y poder describir la relación entre la señal de control y la humedad relativa del ambiente.

La función de transferencia según los bloques se vería de la siguiente manera:

$$F_{tla} = Humidificador * Sensor * Ganancia$$



Utilizando la herramienta de software Matlab obtendremos la expresión final:

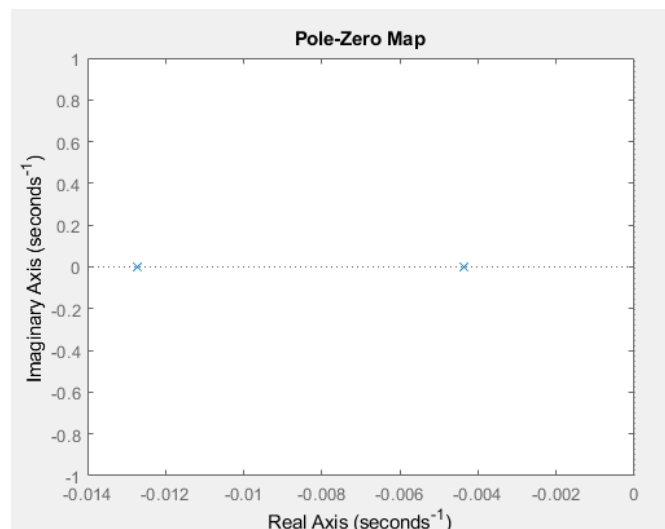
$$\frac{4.578e-10}{1.808e04 s^2 + 308.6 s + 1}$$

Análisis de estabilidad absoluta

Una vez que tenemos la función de transferencia a lazo abierto podemos comenzar el análisis de estabilidad absoluta que consiste en buscar las raíces del denominador de la FTLA.

Expresando en función de sus ceros y polos, obtenemos:

$$\frac{2.5322e-14}{(s+0.01272)(s+0.004348)}$$



polo 1 de la FTLA = -0.01272

polo 2 de la FTLA = -0.004348

Estudiando el gráfico de polos de la función de lazo abierto podemos asegurar que los polos del sistema se encuentren en el semiplano izquierdo del plano complejo, como todos

los polos tienen partes reales negativas, el sistema será **estable** desde el punto de vista absoluto.

Análisis de la respuesta temporal

El análisis de la respuesta temporal nos permitirá conocer cómo el sistema responde a diferentes señales de entrada. Vamos a realizar simulaciones de una señal de entrada del tipo escalón para observar la respuesta ante cambios en la humedad deseada (set point).

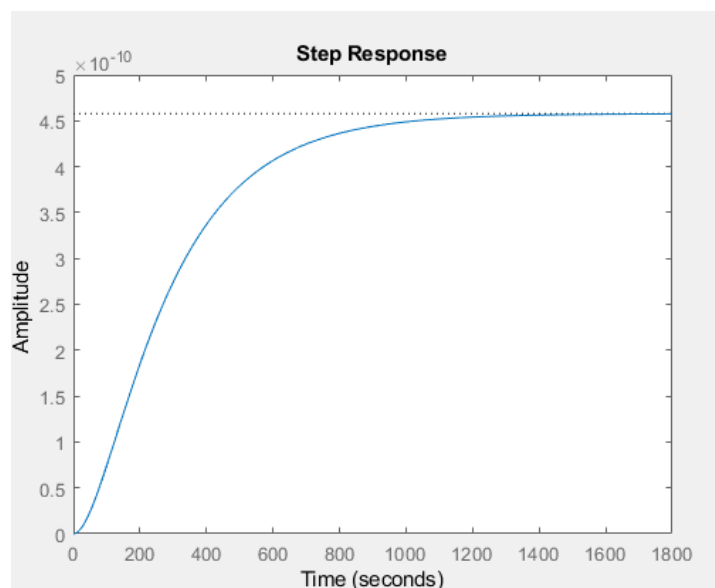
Para ello, calculamos la función de transferencia de lazo cerrado:

$$\frac{8.278e-06 s^2 + 1.413e-07 s + 4.578e-10}{3.269e08 s^4 + 1.116e07 s^3 + 1.314e05 s^2 + 617.2 s + 1}$$

Ahora expresando en función de ceros y polos, obtenemos:

$$\frac{2.5322e-14 (s+0.01272) (s+0.004348)}{(s+0.01272)^2 (s+0.004348)^2}$$

Realizamos la gráfica de su respuesta a un escalón.



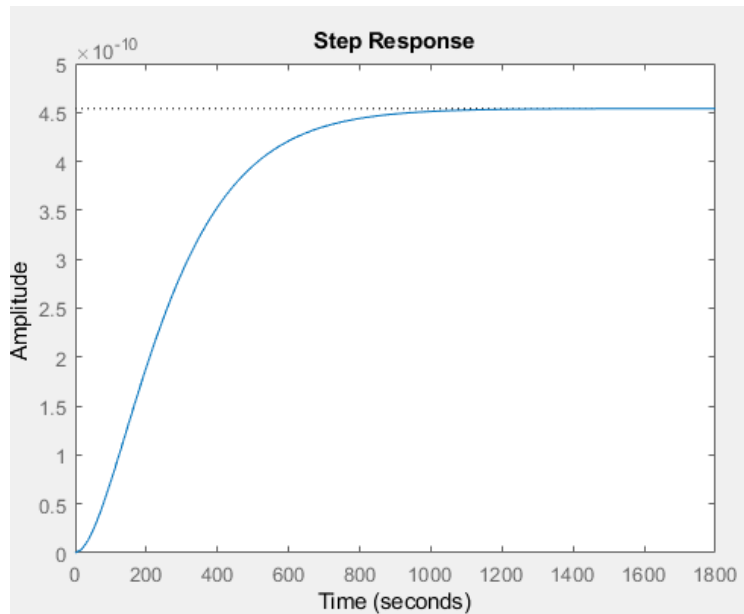
Verificación del modelo matemático a partir de la respuesta temporal.

Dada nuestra función de transferencia podemos observar que sus polinomios son de grado 4, lo cual dificulta el análisis matemático del sistema, con el fin de simplificar la misma vamos a reducir el grado de sus polinomios a partir de la gráfica obtenida como respuesta de un escalón.

La nueva función de transferencia de lazo cerrado será:

$$\frac{4.57e-10}{19600 s^2 + 280 s + 1}$$

Como podemos observar la gráfica de su respuesta a un escalón es prácticamente igual.



Determinación de polos dominantes y tipo de sistema

Para encontrar los polos dominantes debemos encontrar los que tengan partes reales más grandes. Estos polos tienen un mayor impacto en la respuesta del sistema y pueden determinar su estabilidad y comportamiento general.

Para determinar qué tipo de sistema tenemos, debemos examinar la ubicación en el plano complejo de los polos de la función de transferencia.

A partir del gráfico de la respuesta temporal a la señal escalón unitario podemos obtener varias conclusiones, una de ellas es confirmar que mientras más próximos al origen están los polos de un sistema, la respuesta se vuelve más lenta. Se puede corroborar esto en la función de transferencia aquí analizada, debido a que el polo está ubicado en -0.0071, por lo que la respuesta transitoria de este sistema será moderadamente lenta.

La otra conclusión es que podemos ver la existencia de un error de estado estable lo cual tiene sentido si consideramos que nuestro sistema no tiene ningún polo en el origen por lo tanto, se considera un sistema de tipo 0.

TIPO	0	1	2
e_p	$\frac{1}{1+K_p}$	0	0
e_v	∞	$\frac{1}{1+K_v}$	0
e_a	∞	∞	$\frac{1}{1+K_a}$

Debido a esto, podemos concluir que sería ideal tener un sistema de tipo 1 con el objetivo de que el error de estado estable sea cero, esto se puede lograr utilizando un integrador, el cual tiene función de transferencia:

$$y(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$

y al aplicar la transformada de Laplace:

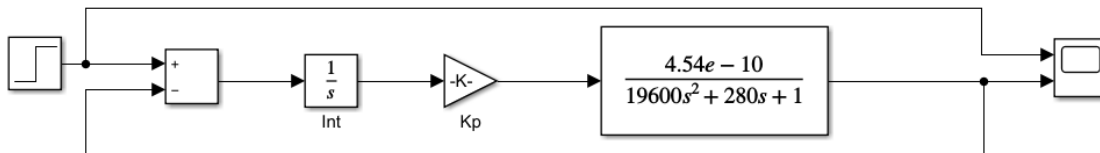
$$Y(s) = \frac{1}{T_i s} * E(s)$$

$$I(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s}$$

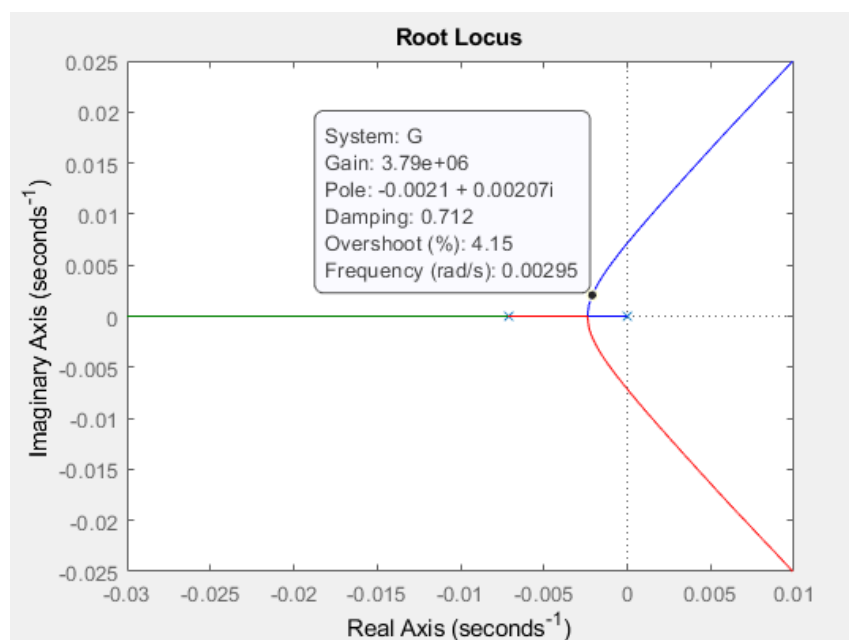
$$K_i = \frac{1}{T_i}$$

$$I(s) = \frac{K_i}{s}$$

Diagrama de bloques:

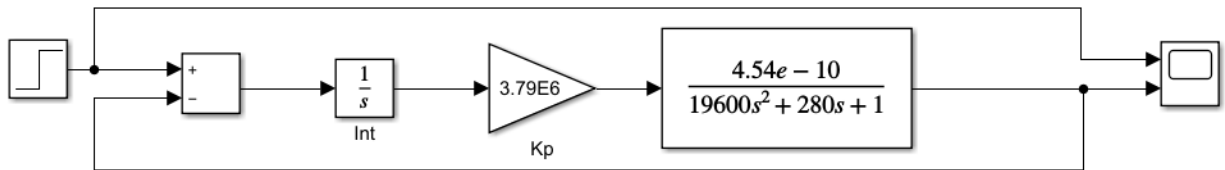


También podemos ver como agregamos un controlador del tipo proporcional al cual vamos a utilizar para mejorar nuestra respuesta al intentar controlar los siguientes parámetros: sobrepaso, tiempo de pico, tiempo de establecimiento y factor de amortiguamiento.

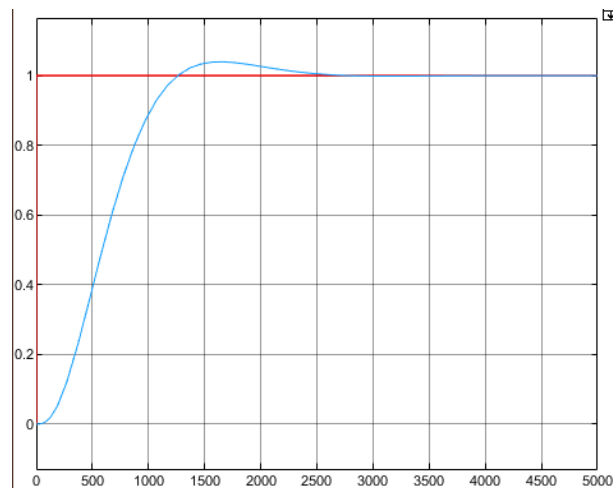


Podemos ver que logramos un sobrepaso inferior al 5% y que el factor de amortiguamiento será 0.712, los cuales son valores óptimos para el correcto funcionamiento del sistema, para que esto sea posible debemos darle un valor de $3.79E6$ a la variable K_p correspondiente al controlador proporcional.

Diagrama de bloques:



En la siguiente imagen podemos ver el correcto funcionamiento de nuestro sistema frente a una entrada del tipo escalón.



El análisis de la respuesta temporal del sistema proporciona información valiosa sobre cómo el sistema se comporta en el tiempo y cómo responde a diferentes estímulos o perturbaciones. A partir de este análisis, podemos obtener varias conclusiones importantes:

-
- Estabilidad: Podemos determinar que el sistema es estable. Un sistema estable retornará a su estado deseado después de que se haya producido una perturbación.
 - Tiempo de respuesta: Podemos ver que el sistema alcanza su estado deseado después de aproximadamente 2200 segundos de que se haya aplicado una perturbación.
 - Amortiguamiento: El gráfico nos permite identificar que las oscilaciones se disipan como un sistema subamortiguado.

Conclusiones

La solución que encontramos para mantener la humedad estable a lo largo del tiempo fue hacer uso de un microcontrolador que accione temporalmente un humidificador.

En el proyecto fueron de gran utilidad softwares matemáticos como Matlab junto con su herramienta Simulink, lo cual significó una gran ayuda simplificando cálculos complejos como también para desarrollar gráficos y diagramas.

En el desarrollo del proyecto nos encontramos con un sistema con un sistema estable con polos cercanos al origen, lo cual genera una respuesta moderadamente lenta. A su vez la función de transferencia resultó de grado 4 por lo cual se decidió realizar una simplificación del mismo como se detalló previamente.

Luego, al estudiar el comportamiento de sistema frente a una señal del tipo escalón notamos que presentaba un error de estado estable, lo cual tiene sentido ya que no presenta polos en el origen, es decir se trataba de un sistema de tipo 0.

Con el fin de reducir este error se consideró agregar un integrador con el objetivo de convertirlo en un sistema de tipo 1. A su vez se agregó un controlador proporcional para finalizar la corrección del error mencionado anteriormente considerando una sobrepaso del 4% y también un factor de amortiguamiento del 0.712.

Finalmente, el sistema compensado tiene un factor de amortiguamiento y sobrepasamiento tales que permiten obtener resultados muy satisfactorios, cumpliendo con las especificaciones planteadas: No presentar error en estado estable y presentar pequeños sobrepasamientos. También cabe mencionar que con la realización de este trabajo pudimos llevar a la práctica y unir todos los conceptos vistos durante el cursado de la materia, que muchas veces nos resulta un tanto abstracto, pero ante la presencia de la temática escogida y de las problemáticas surgidas, pudimos utilizar cada una de las herramientas aprendidas.

Bibliografía

- Ingeniería de Control Moderna (3ra Edición) - Katsuhiko Ogata
- Sistemas de Control Automático (7ma Edición) - Benjamin C. Kuo
- Control automático de procesos industriales - Alfredo Roca
- <https://controlautomaticoeducacion.com/>
- Apuntes de la cátedra
- https://github.com/Facu-hub-code/TPF-SC_datacenter