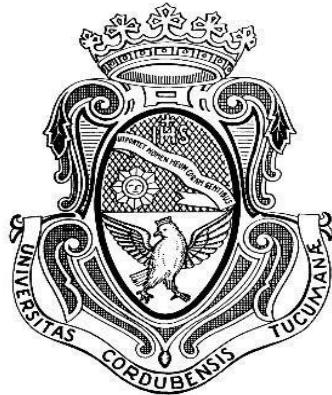




Sistemas de control 1

Trabajo Final Integrador



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

Tema del trabajo
Control de humedad en una cava de vinos

Estudiante:

- Capdevila Gastón - 43365894

Docentes:

- Agüero Adrián,
 - Pedroni Juan
-

Índice:

Introducción	3
Definición del problema	4
Principio de funcionamiento del sistema	4
Variables del sistema	6
Posibles perturbaciones	6
No linealidades involucradas	7
Análisis de la planta	7
Sensor	7
Ganancia K	8
Humidificador	8
Recinto o cava	10
Función de transferencia	11
Función de transferencia de lazo abierto:	11
Estabilidad absoluta	11
Análisis de la respuesta temporal	12
Determinación del tipo de sistema	13
Error en estado estable	14
Especificaciones de diseño	15
Diseño del controlador	16
Función de transferencia del compensador:	18
Función de transferencia lazo abierto del sistema compensado:	18
Función de transferencia lazo cerrado del sistema compensado:	18
Diagrama de bloques del sistema compensado	19
Simulación	19
Respuesta temporal del sistema	19
Estabilidad absoluta del sistema compensado	20
Estabilidad relativa del sistema compensado	21
Margen de Ganancia	21
Margen de Fase	22
Error en estado estable del sistema compensado	22
Conclusiones	23

Introducción

La conservación adecuada del vino requiere condiciones ambientales estrictamente controladas. En general siempre hablamos de la temperatura correcta en la estiba o guarda de vinos, y nos olvidamos de prestarle atención a la humedad interna en las cavas para vinos climatizadas. Un factor crucial para una correcta conservación.

Una humedad insuficiente puede provocar el secado de los corchos, generando filtraciones de aire y oxidación prematura del vino, mientras que una humedad excesiva puede favorecer la proliferación de hongos y el deterioro de etiquetas y materiales orgánicos presentes en la cava. Debido a esto, diversos estándares de la industria vitivinícola recomiendan mantener la humedad relativa dentro del rango del 65% al 75% para asegurar la estabilidad y calidad del producto durante su almacenamiento.

En una cava de vinos, la humedad tiende a variar por múltiples factores: intercambio de aire con el exterior, fluctuaciones de temperatura, apertura de puertas, evaporación interna, e ineficiencias del sistema de climatización. Estas perturbaciones generan un ambiente dinámico cuya variable de interés la humedad relativa cambia con el tiempo y no siempre permanece dentro del rango deseado. Por lo tanto, es necesario implementar un sistema de control automático capaz de regular dicha variable.

Aunque existen productos comerciales que controlan la humedad de una cava, el propósito de este trabajo es analizar, diseñar y simular un sistema de control de humedad para una cava de vinos. Para ello, se seleccionará un modelo simplificado de la evolución de la humedad en un lugar cerrado, se desarrollará la función de transferencia correspondiente, se analizará el comportamiento del sistema en lazo abierto y se procederá al diseño del controlador más adecuado para cumplir las especificaciones de desempeño. Finalmente, se realizarán simulaciones en Octave que permitirán validar el diseño y verificar su comportamiento bajo distintas condiciones y perturbaciones representativas del funcionamiento real de una cava.

El sistema real puede existir, pero el diseño del controlador sigue siendo un problema válido.

Definición del problema

Principio de funcionamiento del sistema

Se hará una descripción básica del funcionamiento del sistema, en función de la cual se realizará la modelización matemática y se construirá el diagrama de bloques que represente al mismo.

La humedad relativa dentro de una cava de vinos es el resultado del equilibrio dinámico entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la capacidad del ambiente para retenerlo a una determinada temperatura. En un recinto cerrado, este valor depende principalmente de los procesos de aporte de humedad, extracción de humedad y renovación de aire, así como de la temperatura interior y exterior. En una cava de vinos, el objetivo es mantener la humedad relativa dentro del rango óptimo del 65% al 75%. Para lograrlo, es necesario incorporar un sistema que modifique activamente la cantidad de vapor de agua presente en el aire mediante un humidificador eléctrico y un sensor de humedad que permita retroalimentar el sistema.

El ambiente de la cava se comporta como un volumen cerrado donde la humedad tiende a estabilizarse debido a fenómenos naturales de intercambio: filtraciones mínimas con el exterior, absorción del agua por materiales porosos (como madera o corcho), y variaciones de temperatura que desplazan la presión de vapor. La apertura de la puerta o la presencia de aire exterior más seco constituyen perturbaciones que tienden a disminuir la humedad interna del recinto.

El controlador determina la intensidad o duración de la actividad del humidificador, entregando una acción de control que busca minimizar el error y mantener la humedad dentro del rango deseado.

Como humidificador podemos tener en cuenta el [External-Driving Atomiser Module](#) de Holtek.

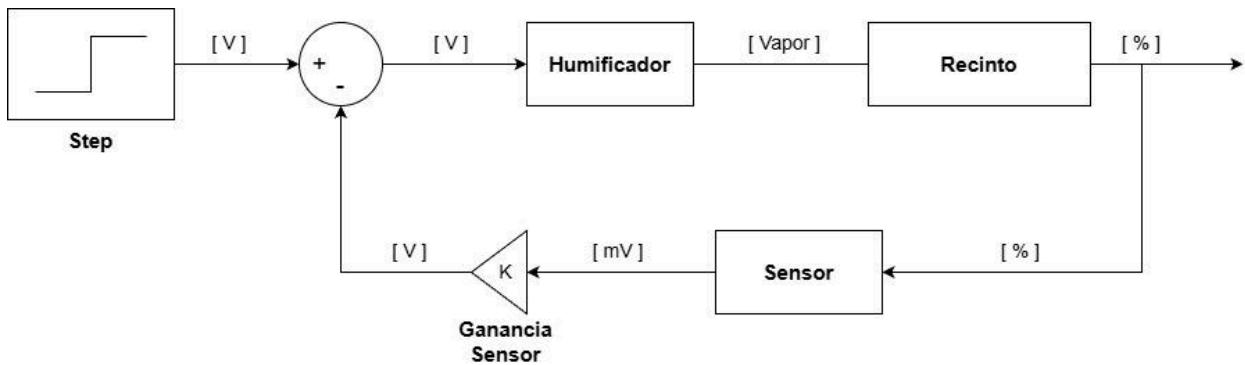
La razón principal para mencionar este módulo como referencia es su disponibilidad comercial, su control documentado (mediante voltaje variable VR y PWM) y el hecho de que demuestra que existen atomizadores reales que pueden ajustarse continuamente, lo que justifica el planteo de un modelo proporcional en el controlador.

Sin embargo, es importante aclarar que este módulo se emplea **solo como ejemplo**, no implica que necesariamente sea usado exactamente en la implementación física de la cava de vinos, sino que sirve para fundamentar y validar teóricamente el modelo de actuador proporcional. En una aplicación real, se podría seleccionar otro modelo de humidificador según los requisitos específicos de la cava. Por lo tanto, en este trabajo se plantea un *humidificador ideal* basado en parámetros hipotéticos que permiten explorar el diseño de control de manera adecuada.

Uno de los desafíos al usar el módulo **WAS-2B02EN** como ejemplo es que el datasheet de Holtek no proporciona una curva exacta de voltaje (modo VR) vs tasa de atomización (o flujo de vapor), ni datos precisos de humedad generada vs tensión.

1. **El Holtek WAS-2B02EN se usa solo como ejemplo** para demostrar que existen atomizadores comerciales con control analógico / PWM.
2. **El modelo ideal no depende exclusivamente de ese módulo:** se define un humidificador ideal con parámetros elegidos para facilitar el diseño del lazo de control.
3. **La idealización es justificada** dada la falta de datos precisos en el datasheet y el objetivo del TFI (modelado + control + simulación), más que la implementación física real inmediata.
4. La humedad del recinto, será medida con el sensor **HIH-4030**, que convierte dicho valor de porcentaje de humedad en una tensión proporcional en el orden de los mV.
5. El recinto considerado será para 28 botellas teniendo un **tamaño** de:
 - a. Alto 80 Cm
 - b. Profundidad 50 Cm
 - c. Ancho 50 Cm
6. La **variable de entrada** es una tensión que varía entre 0 y 5 V. La relación de esta tensión con la cantidad de vapor suministrada es: 0 V equivale al humidificador apagado y 5 V a la cantidad de vapor necesario para alcanzar un 100% de humedad relativa en el recinto. Un escalón de entrada de 3.5V corresponde a un setpoint aproximado de **70% HR**, que es el valor objetivo de operación de la cava.

Variables del sistema



Bloque	Entrada	Salida	Descripción
Step		V	SetPoint en V que representa porcentaje de humedad relativa.
Humificador	V	g/min de vapor	Convierte 0-5V en aporte de humedad.
Recinto	g/min de vapor	%HR	Sistema dinámico que acumula vapor y tiene pérdidas
Sensor	%HR	mV	Mide la humedad del recinto entregando un valor en tensión a su salida en mV.
Ganancia	mV	V	Esta ganancia es utilizada para adaptar la salida del sensor al nivel de voltaje que se utiliza como entrada.

Posibles perturbaciones

- Apertura de puerta (entrada de aire exterior):** entrada de aire con distinta HR y temperatura.
- Renovación o fuga de aire (ventilación/filtraciones):** intercambio continuo con el exterior por ventilación natural o pérdidas del recinto.
- Variación de temperatura interior/exterior:** la temperatura altera la presión de vapor de saturación.

-
- 4. Generación/absorción interna de humedad:** materiales porosos (madera, corchos) que absorben o liberan humedad; recipientes con agua.
 - 5. Condensación local o formación de gotas:** la humedad medida puede saturarse localmente; pérdida efectiva de vapor al condensarse.

No linealidades involucradas

- 1. Saturación del actuador:** el humidificador tiene un flujo máximo y no genera más por más señal.
- 2. Dead-zone / mínimo operativo:** señales pequeñas pueden no producir vapor (o producir salida inestable).
- 3. Dependencia no lineal temperatura:** la misma masa de vapor produce HR distinta si cambia T; puede producir fenómenos de condensación.
- 4. Saturación energética / temperatura del actuador:** rendimiento del humidificador puede reducirse por sobretemperatura; tiempo de recuperación lento.

Análisis de la planta

Sensor

El sensor entrega una tensión de salida equivalente a 30mV/>. Y el tiempo que tarda en alcanzar el 63% del valor final, obtenido de su hoja de datos, es $\tau = 5$ seg.

Función de transferencia del sensor:

$$G_{\text{sensor}}(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0.03}{5s + 1}$$

HIH-4030/31 Series

TABLE 1. PERFORMANCE SPECIFICATIONS (At 5 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	–	–	–	–	–
0% RH to 59% RH	-5	–	5	% RH	–
60% RH to 100% RH	-8	–	8	% RH	–
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	–	+3.5	% RH	1
Hysteresis	–	3	–	% RH	–
Repeatability	–	±0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH in a year)	–	±1.2	–	% RH	2
Stability (at 50% RH in a year)	–	±0.5	–	% RH	3
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc	4
Current supply	–	200	500	µA	–
Voltage output (1 st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$, typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temp. coefficient at 50% RH, 5 V	–	-4	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity (HIH-4030)	0	See Figure 1.	100	% RH	5
Operating humidity (HIH-4031)	0	See Figure 1.	100	% RH	–
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C[°F]	–
Storage humidity	See Figure 2.			% RH	5

Ganancia K

La salida de tensión del sensor debe ser adaptada convenientemente para ser restada con la entrada. Por lo tanto, una salida máxima de 3 V del sensor debe equivaler a la máxima entrada posible, es decir 5 V.

$$K = \frac{5}{3}$$

Humidificador

Para el diseño del sistema de control se toma como referencia el módulo de atomización ultrasónica **WAS-2B02EN** de Holtek, ampliamente utilizado en aplicaciones de humidificación comercial. Este módulo presenta las siguientes características técnicas:

Parámetro	Valor
Tasa de atomización	> 200 mL/h
Eficiencia de atomización	> 13.5 mL/(W·h)
Frecuencia de atomización	1.7 MHz
Corriente de atomización	0.67 ± 0.07 A @ 24V

Capacidad máxima de atomización:

$$A_{max} = 200 \text{ mL/h} = 200 \text{ mL / 60 min} = 3.33 \text{ mL / min}$$

Operación en modo VR (Variable Resistor):

- 0V → humidificador apagado
- 5V → flujo máximo

$$Kh = \frac{A_{max}}{V_{max}} = \frac{3.33 \text{ g / min}}{5 \text{ V}} = 0.66 \frac{\text{g / min}}{\text{V}}$$

Los atomizadores ultrasónicos presentan una respuesta dinámica dominada por el tiempo de calentamiento del transductor piezoelectrónico y la estabilización del flujo de vapor. Se modela como un **sistema de primer orden** con constante de tiempo:

$$\tau = 5 \text{ s}$$

Función de transferencia del humidificador:

$$G_{humidificador}(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0.66}{5s + 1}$$

Recinto o cava

El modelo se basa en el principio de que la **tasa de cambio de la masa de vapor de agua** dentro del recinto es igual al flujo de vapor que ingresa menos el flujo de vapor que se pierde o sale. Se puede utilizar un **modelo lineal simplificado de primer orden**, similar al que se usa en sistemas térmicos para recintos cerrados (balance de energía), pero aplicado al balance de vapor de agua.

Función de transferencia del recinto:

$$G_{cava}(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Cálculo de la Ganancia

$$K_{cava} = \frac{\Delta HR}{\Delta Fin} = \frac{(100 - 0)\%HR}{(3.33 - 0)g/min} = 30 \frac{\%HR}{g/min}$$

Fin: flujo de vapor del humidificador entrante. [g / min]

A max = 3.33 g/min asumiendo densidad del agua 1 g/mL

Volumen del recinto: $0.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} = 0.2 \text{ m}^3$

Masa total necesaria: $200 \text{ L} \times 0.0173 \text{ g/L} \approx \mathbf{3.46 \text{ g}}$

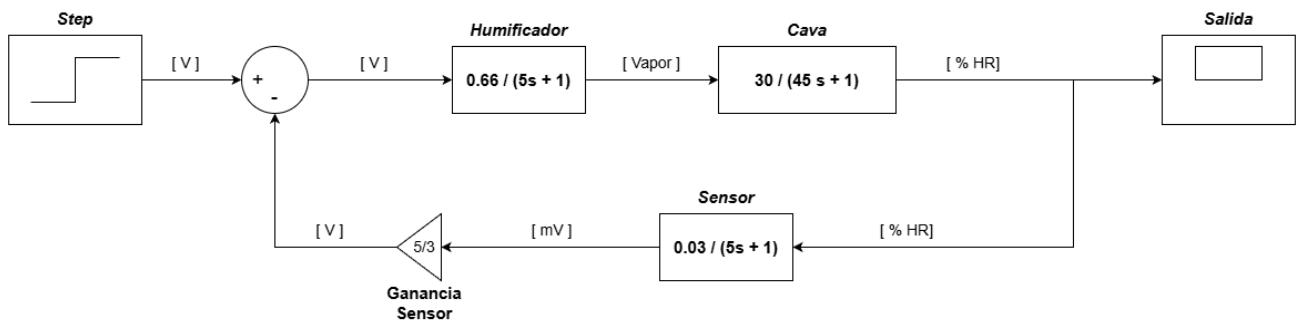
0.0173 g/L es la humedad absoluta de saturación del aire a una temperatura de 20° C.

Constante de Tiempo

Podemos alcanzar el 100%HR en ~75 s, con la T interior a 20° C, considerando pérdidas y renovaciones de aire por hora, entonces:

$$\tau = \sim 45 \text{ s}$$

$$G_{cava}(s) = \frac{30}{45s + 1}$$



Función de transferencia

Función de transferencia de lazo abierto:

$$G(s) * H(s) = FdTLA = \frac{0.66}{5s+1} * \frac{30}{45s+1} * \frac{0.03}{5s+1} * \frac{5}{3}$$

$$FdTLA = \frac{1}{1125s^3 + 475s^2 + 55s + 1} = \frac{0.00088}{s^3 + 0.4222s^2 + 0.04889s + 0.0008889}$$

Estabilidad absoluta

Polos:

$$\begin{aligned} &-0.2000 + 0.0000i \\ &-0.2000 - 0.0000i \\ &-0.0222 + 0i \end{aligned}$$

Se puede observar que el sistema posee un polo localizado en: $s = -0.0222$, otros dos en $s = -0.20$. Debido a que todos los polos se encuentran en el semiplano negativo, se puede determinar que el **sistema es estable**.

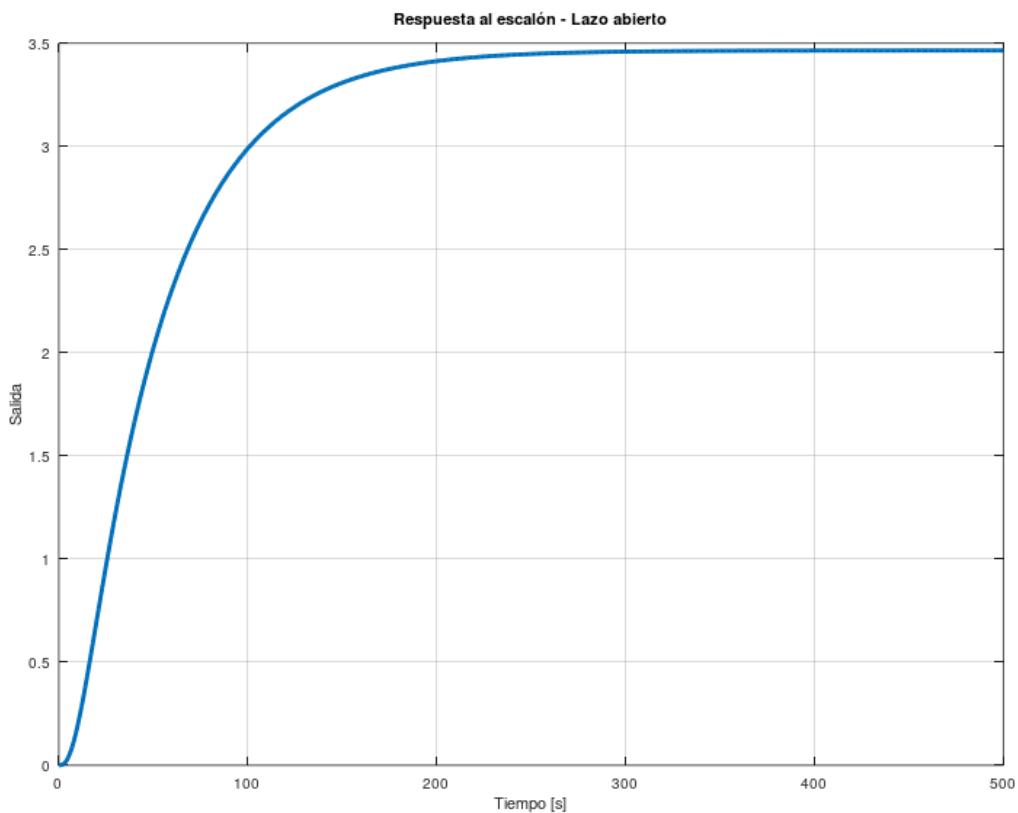
El polo dominante es:

$$S_d = -0.0222$$

Porque:

- Es el más lento (el menos negativo).
- Es el que tarda más en desaparecer en el tiempo.
- Controla el tiempo de establecimiento del sistema.

Análisis de la respuesta temporal



```
=====
ANALISIS DE RESPUESTA TEMPORAL
=====
    Valor final : 3.4649
    Tiempo de establecimiento : 138.00 s
    Tiempo de subida : 136.00 s
    Sobrepasso SO : 0.00 %
    K estatica : 0.99
=====
```

1. Tiempo de establecimiento criterio del $\pm 5\%$:

$$\tau = \frac{1}{P_d} = \frac{1}{0.0222} \approx 45 \text{ s}$$

$$Te = 3 * \tau \approx 135 \text{ s}$$

2. Tiempo de subida (del 5% al 95%):

$$Ts = 2.94 * \tau \approx 132 \text{ s}$$

3. Sobrepasso: SO = 0

El análisis de la respuesta temporal de la planta evidencia que el comportamiento dinámico del sistema está fuertemente condicionado por la presencia de un polo real lento, ubicado en $s = -0.0222$. Como consecuencia de este polo dominante, la planta presenta un tiempo de establecimiento elevado.

Asimismo, la respuesta no tiene sobrepasso, lo cual es consistente con la ausencia de polos complejos conjugados en la planta. Este comportamiento garantiza que el sistema no presenta oscilaciones ni características resonantes. Estos resultados permiten concluir que la planta es estable, fuertemente amortiguada y con un comportamiento dominado por un único polo lento.

Determinación del tipo de sistema

Se define el tipo de un sistema realimentado como el número N de polos en el origen de la función de transferencia en lazo abierto .

$$G(s) \cdot H(s) = \frac{K \cdot (1 + T_a s) \cdot \dots \cdot (1 + T_m s)}{s^r \cdot (1 + T_1 s) \cdot \dots \cdot (1 + T_n s)}$$

Para sistemas con realimentación constante se cumple:

TIPO	0	1	2
e_p	$cte=1/(1+K_p)$	0	0
e_v	∞	$cte=1/K_v$	0
e_a	∞	∞	$cte=1/K_a$

$$FdTLA = \frac{1}{1125 s^3 + 475 s^2 + 55 s + 1} = \frac{0.00088}{s^3 + 0.4222 s^2 + 0.04889 s + 0.0008889}$$

En nuestro caso el análisis del denominador de la función de transferencia en lazo abierto muestra que no existe ningún polo en el origen, es decir, la función de transferencia no posee integradores puros. Por lo tanto, la planta es de **tipo 0**, lo que implica que ante un escalón en lazo cerrado se obtendrá un error en régimen permanente distinto de cero.

Error en estado estable

Cuando el sistema alcanza su estado de régimen, generalmente existe un “Error en estado estable” si la respuesta de la salida del sistema no concuerda exactamente con la referencia deseada. Dicho error depende del tipo de sistema del que se trate, es decir del número de polos en $s = 0$ que posea la función de lazo abierto del sistema.

Para una entrada escalón unitario:

$$\varepsilon_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} = \frac{1}{1 + K_p}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s)$$

$$FdTLA = \frac{1}{1125 s^3 + 475 s^2 + 55 s + 1} = \frac{0.00088}{s^3 + 0.4222 s^2 + 0.04889 s + 0.0008889}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} FdTLA = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1125 s^3 + 475 s^2 + 55 s + 1} \approx 1$$

$$\varepsilon_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} = \frac{1}{1 + 1} \approx 0.50$$

Esto quiere decir que el error en estado estable para el sistema es del 50%. Para una entrada de 3.5 V. Esto significa que la planta solo alcanza aproximadamente el 50% del valor deseado.

Especificaciones de diseño

Las especificaciones en el dominio del tiempo son las siguientes:

- ❖ Sobrepasamiento máximo de 0%.
- ❖ Disminuir el tiempo de establecimiento.
- ❖ Error en estado estable para entrada escalón de aproximadamente 0%.

Todas las especificaciones propuestas son **técnicamente alcanzables** para este sistema.

La planta es estable, lineal, de bajo orden y con polos reales, lo que facilita la aplicación de un controlador que permita cumplir los objetivos sin comprometer la estabilidad.

Diseño del controlador

Se decidió utilizar un compensador PI (Proporcional-Integral) por cancelación de polo dominante.

1. **Elimina el error en estado estable:** El integrador añade un polo en el origen, convirtiendo el sistema de tipo 0 a tipo 1. Esto garantiza error nulo ante entrada escalón.

-
- 2. Mejora la velocidad de respuesta:** La acción proporcional puede acelerar la respuesta del sistema con K_p , reduciendo el tiempo de establecimiento actual.
- 3. Mantiene el sobreceso en 0:** La planta actual no tiene sobreceso. El PI, bien sintonizado, no introduce polos complejos conjugados, por lo que puedes mantener $SO = 0$ o muy bajo.

La función de transferencia del compensador es:

$$PI(s) = \frac{K_p (Ti * s + 1)}{Ti * s} = \frac{K_p (s + \frac{1}{T})}{s}$$

Como se desea eliminar el polo dominante:

$$\frac{1}{T} = P = 0.0222$$

$$PI(s) = \frac{K_p (s + 0.0222)}{s}$$

```
%% ===== FUNCION PARA EVALUAR =====
function val = tf_eval(G, s0)
    [num, den] = tfdata(G, "vector");
    Ns = polyval(num, s0);
    Ds = polyval(den, s0);
    val = Ns / Ds;
end

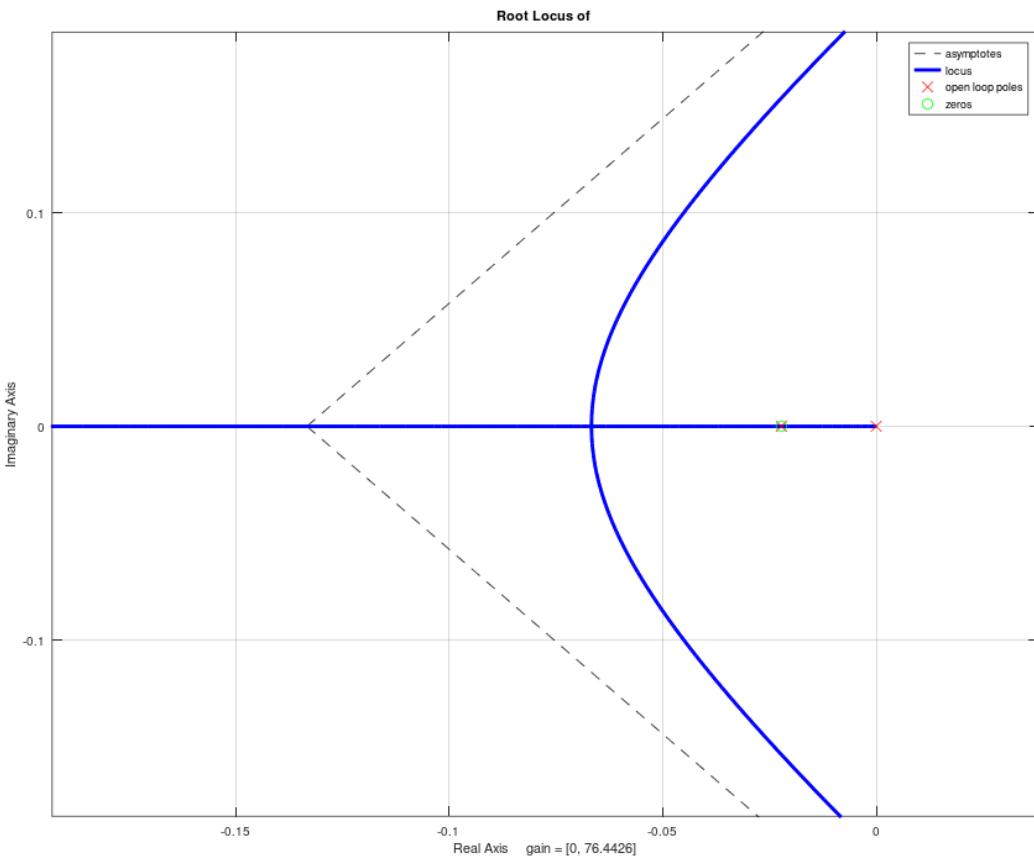
Pi = (s + 0.0222)/s
%rlocus(Pi*FdTLA)
s0 = -0.0665;

invK = tf_eval(Pi*FdTLA, s0)

Kp = 1 / abs(invK)
```

Utilizando método del lugar de raíces:

$$K_p = 1.3461$$



Función de transferencia del compensador:

$$PI(s) = \frac{1.3461(s + 0.0222)}{s}$$

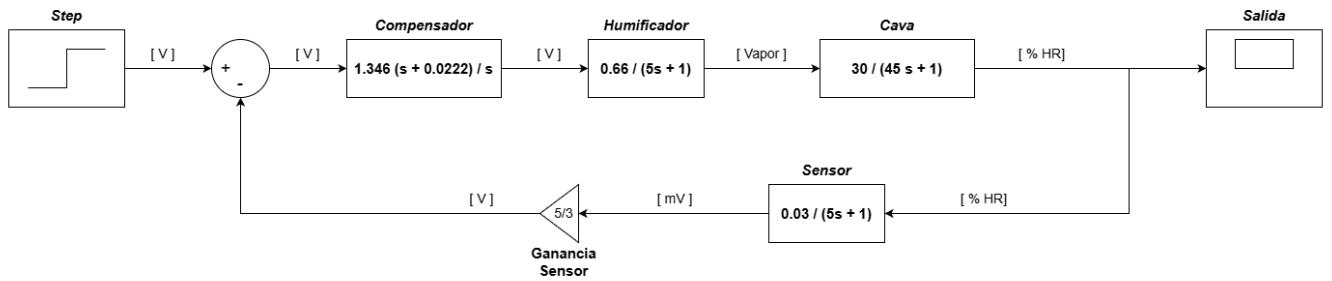
Función de transferencia lazo abierto del sistema compensado:

$$FdTLA_{comp} = PI * G * H = \frac{1.333s + 0.02959}{1125s^4 + 475s^3 + 55s^2 + s}$$

Función de transferencia lazo cerrado del sistema compensado:

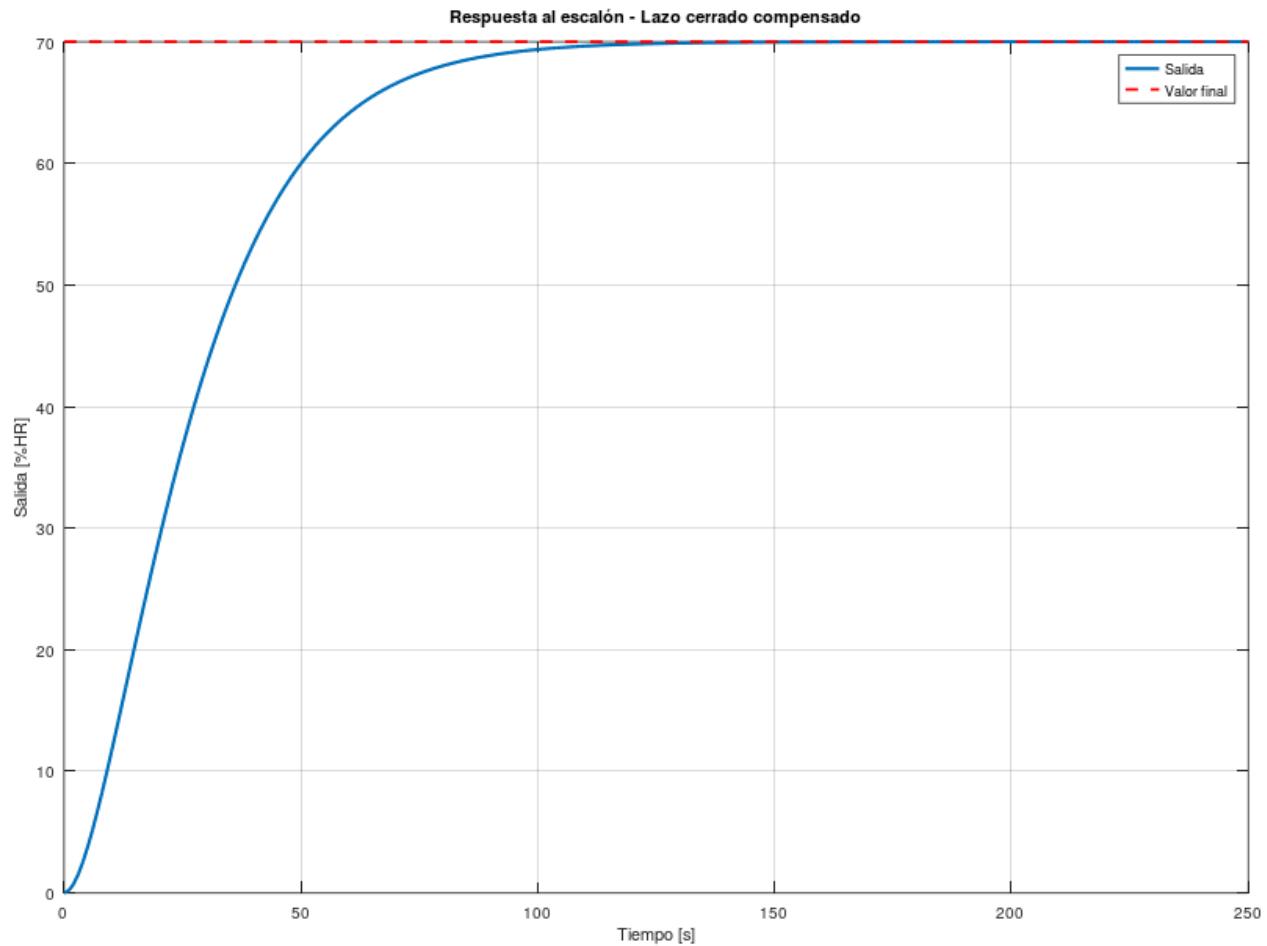
$$FdTLC_{comp} = \frac{133.3s^2 + 29.61s + 0.5917}{1125s^4 + 475s^3 + 55s^2 + 2.333s + 0.02959}$$

Diagrama de bloques del sistema compensado



Simulación

Respuesta temporal del sistema



```

=====
RESPUESTA TEMPORAL LAZO CERRADO COMPENSADO
=====
    Valor final          : 69.9991
    Tiempo de establecimiento : 69.00 s
    Tiempo de subida        : 65.00 s
    Sobrepasso SO           : 0.00 %
=====
```

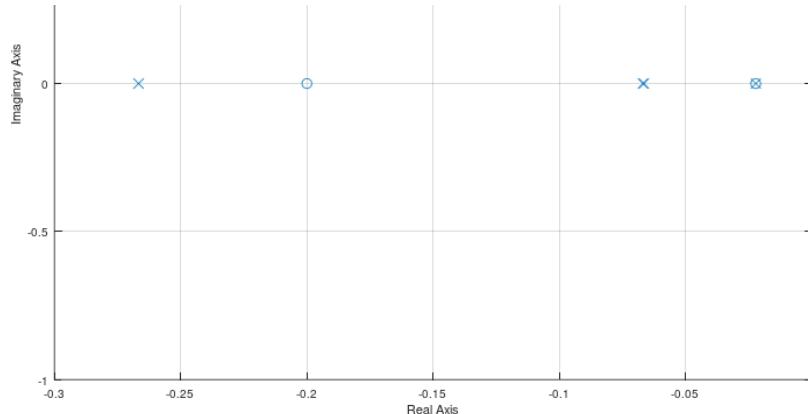
En el modelo desarrollado, la salida del sistema compensado corresponde directamente a la humedad relativa en la cava, expresada en %HR. Por lo tanto, al simular la respuesta del lazo cerrado, el valor final obtenido (70) representa directamente 70 % de humedad relativa, lo cual es coherente con la referencia aplicada y también es nuestro valor de %HR al que queríamos llegar.

Estabilidad absoluta del sistema compensado

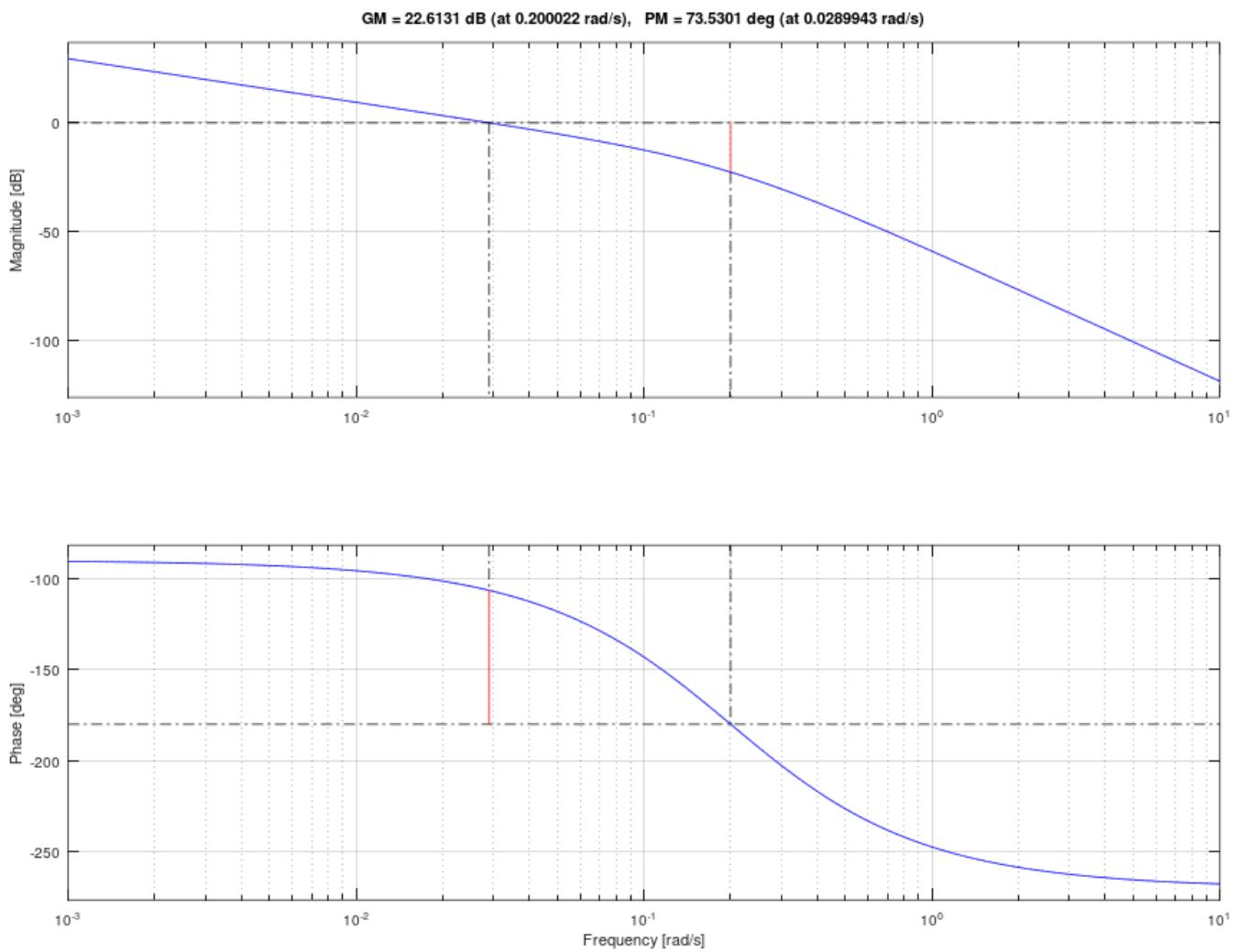
Polos de la FdTLC compensado:

-0.266654
 -0.066900
 -0.066500
 -0.022168

Todos los polos tienen parte real negativa, el sistema compensado es absolutamente estable.



Estabilidad relativa del sistema compensado



Margen de Ganancia

El sistema presenta un margen de ganancia de 22.6 dB, equivalente a un factor lineal de aproximadamente 13.5. Este valor indica que la ganancia del sistema podría incrementarse en más de 13 veces antes de alcanzar la condición de inestabilidad. Esto significa que el sistema tolera incrementos significativos en la ganancia proporcional sin riesgo de inestabilidad por cruce de fase. Este margen supera ampliamente el criterio mínimo establecido ($MG \geq 1.7$).

Margen de Fase

El margen de fase obtenido es de $\sim 73^\circ$. Este valor cumple con el criterio mínimo de estabilidad establecido ($MF \geq 30^\circ$).

Un margen de fase de esta magnitud garantiza:

- Alta tolerancia ante retardos no modelados en actuadores y sensores
- Excelente amortiguamiento de la respuesta
- Robustez superior frente a perturbaciones de alta frecuencia
- Estabilidad asegurada ante variaciones en las constantes de tiempo del sistema

En conclusión el sistema compensado presenta estabilidad relativa satisfactoria. Tanto el margen de ganancia como el margen de fase superan ampliamente los criterios mínimos establecidos, garantizando un sistema robusto, estable y con excelente comportamiento dinámico.

Error en estado estable del sistema compensado

$$\varepsilon_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)H(s)} = \frac{1}{1 + K_p}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s)$$

$$FdTLA_{comp} = PI * G * H = \frac{1.333 s + 0.02959}{1125 s^4 + 475 s^3 + 55 s^2 + s}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} = \frac{1.333 s + 0.02959}{1125 s^4 + 475 s^3 + 55 s^2 + s} = \infty$$

$$\varepsilon_{ss} = \frac{1}{1 + K_p} = 0$$

Error en estado estable del sistema compensado

K_ess_comp = Inf

Error en estado estable: 0.0000

Conclusiones

En el presente trabajo se logró diseñar exitosamente un sistema de control de humedad relativa para una cava de vinos mediante un compensador PI con cancelación de polo dominante. El análisis comparativo entre el sistema en lazo abierto y el sistema compensado evidencia mejoras sustanciales en todos los parámetros de desempeño críticos.

El desarrollo de este trabajo permitió aplicar de manera integral los conocimientos adquiridos a lo largo de la asignatura Sistemas de Control. El sistema de control diseñado cumple satisfactoriamente con todos los objetivos planteados, transformando una planta con respuesta lenta y con error permanente, en un sistema tipo 1 con respuesta rápida, error nulo y estabilidad robusta. El análisis de estabilidad relativa confirma que el diseño posee márgenes suficientes para tolerar incertidumbres del modelo y perturbaciones operacionales, garantizando un funcionamiento confiable en condiciones reales de operación de la cava. La utilización de Octave como herramienta de simulación resultó fundamental para la verificación del comportamiento del sistema y la validación del diseño propuesto.

Este proyecto promovió el desarrollo de habilidades prácticas para el diseño de soluciones de control aplicables en escenarios reales, demostrando la aplicabilidad exitosa de técnicas clásicas de control. En definitiva, el trabajo representó una instancia en la que consolidamos los conocimientos teóricos y prácticos, fortaleciendo tanto la capacidad analítica como la toma de decisiones fundamentadas en criterios técnicos.