



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES.

**“CONTROLADOR EN MODO DESLIZANTE APLICADO A UN TANQUE DE
LLENADO CON TIEMPO MUERTO”.**

AUTOR: NARANJO LICINTUÑA, ALEX FRANCISCO
DIRECTOR: ING. PILATÁSIG PANCHI, MARCO ANTONIO MGS.



Este trabajo simula la aplicación del controlador SMC en procesos no lineales. La librería y aplicación se aplican en un tanque de llenado no lineal con tiempo muerto. Fomenta la investigación y diseño de controladores SMC buscando promover su uso en ingeniería.

Objetivo general

Diseñar y simular un controlador en modo deslizante para un tanque de llenado con tiempo muerto.

Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica de la modelización de sistemas no lineales con retardo o tiempo muerto, y de los fundamentos del controlador en modo deslizante.
- Diseñar y sintonizar un controlador por modos deslizantes con base en los índices de desempeño ITSE y TVu.
- Simular un tanque de llenado, para realizar pruebas frente a perturbaciones y cambios de referencia de al menos 10%.
- Comparar el esquema de control propuesto, frente a PID, para constatar la mejora en el rendimiento y robustez de la propuesta mediante la cuantificación de los resultados a través de los índices de desempeño, ITSE y TVu, sobre -pico y tiempo de asentamiento

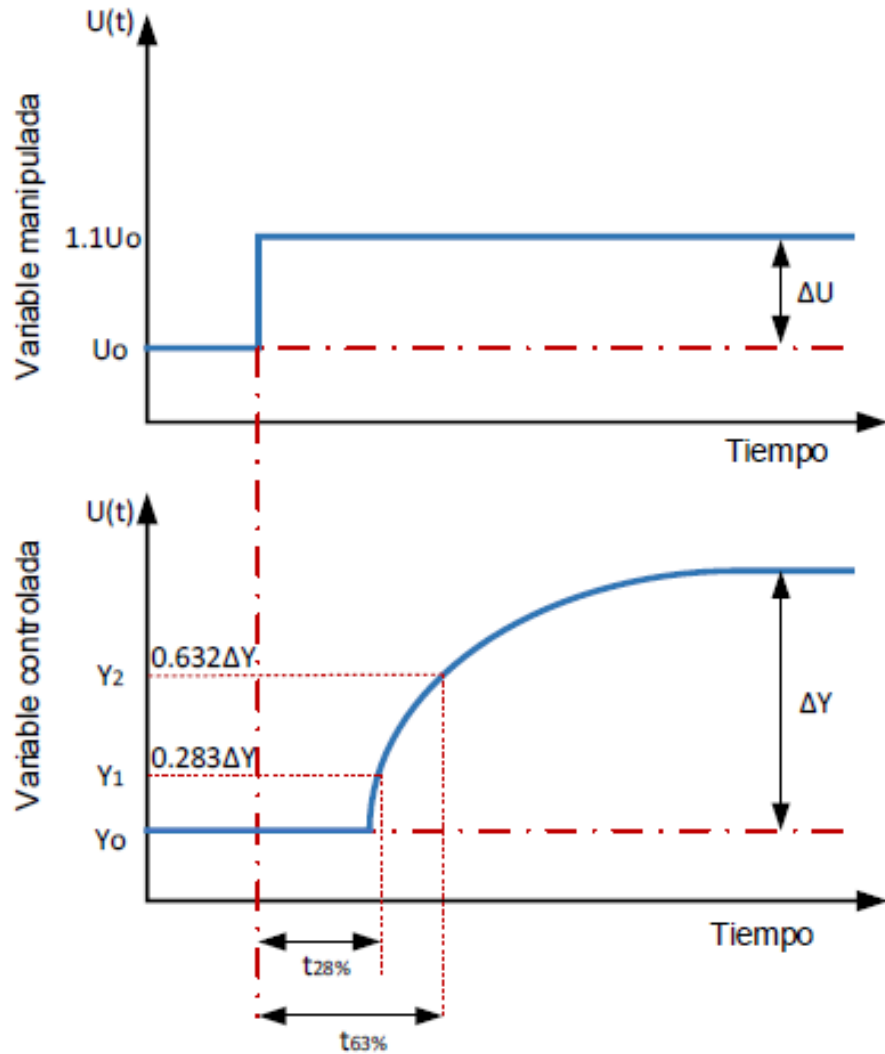
Planta de primer orden con retardo

$$G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_o s}$$

K: es la ganancia del proceso

τ : Es al constante de tiempo de proceso, es decir a cantidad de tiempo que se llega a tomar la variable controlada.

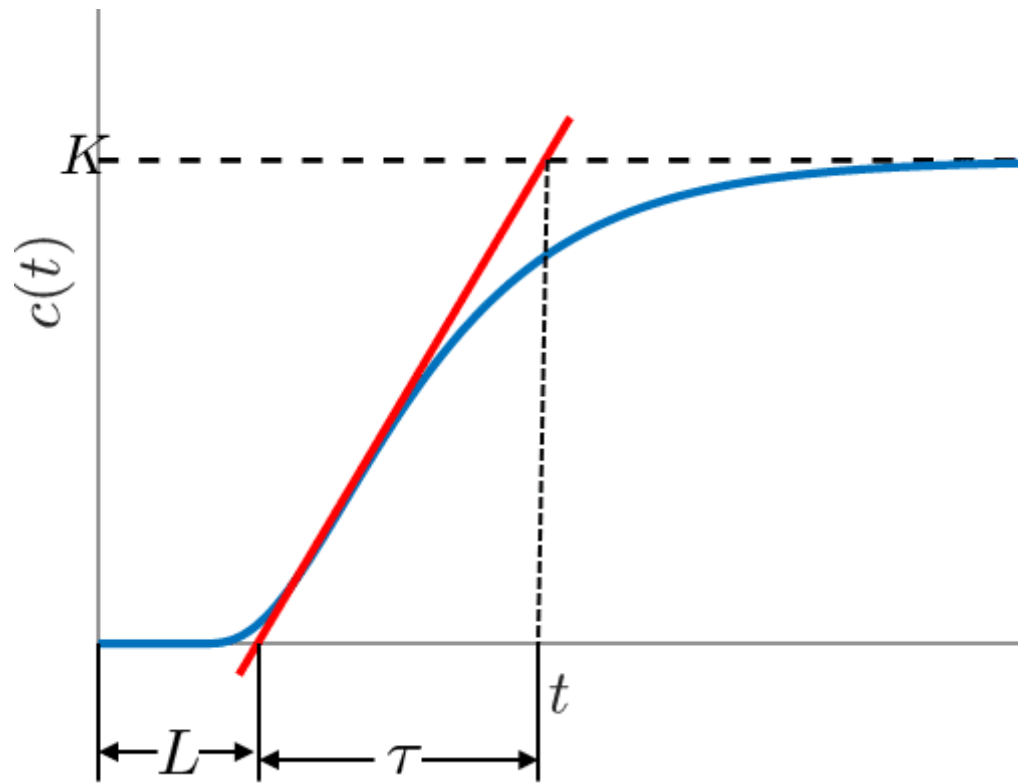
t_o : Es el tiempo muerto, la relación de la variación de la entrada con respecto a lo que tarda en responder para la salida.



El método mencionado ubica dos puntos en la respuesta cuando se alcanza el 28.3% y el 63.2% con referencia al valor final o su valor en estado estable como se muestra en la Figura 2, luego se calcula los tiempos en cada uno de los puntos mencionados y se emplean en el cálculo de los parámetros K , t_0 y τ del modelo FOPDT.

$$\tau = 1.5 (t_{63.2\%} - t_{28.3\%})$$

Controlador tipo PID Ziegler - Nichols



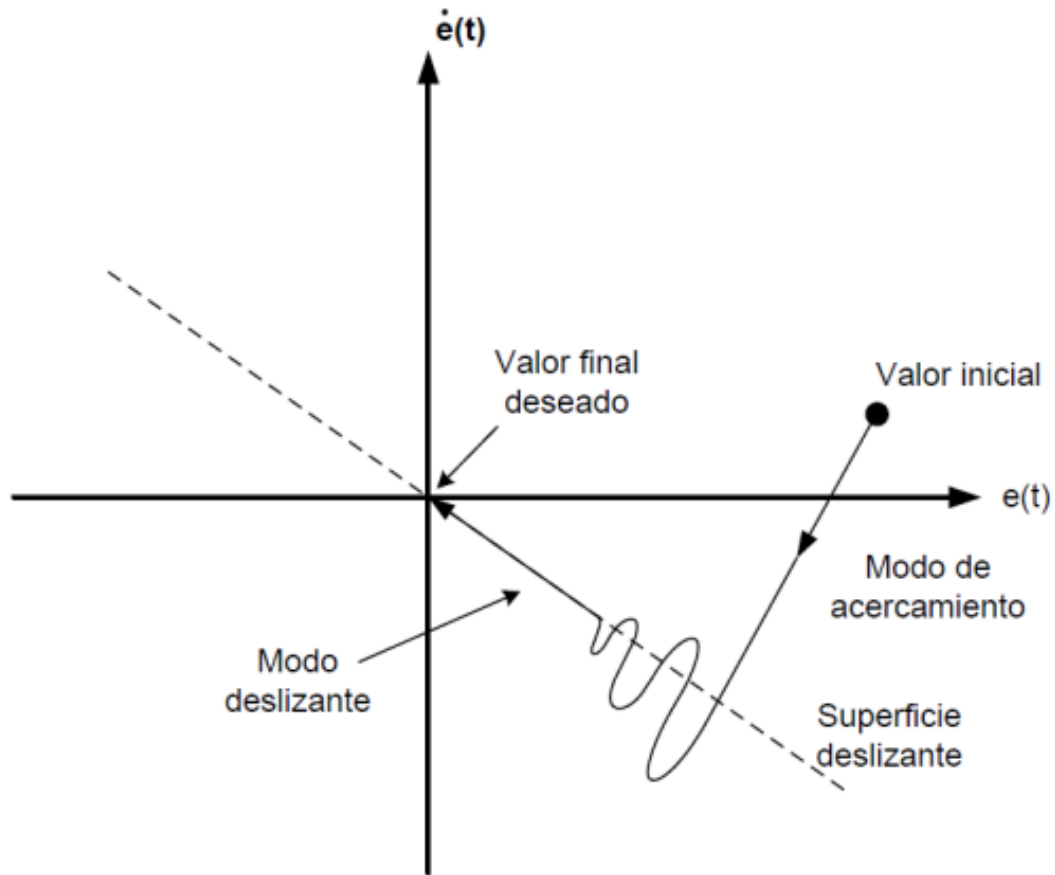
| Controlador | K_p | T_i | T_d |
|-------------|-----------------------|-----------------|-------|
| P | $\frac{\tau}{KL}$ | ∞ | 0 |
| PI | $0.9 \frac{\tau}{KL}$ | $\frac{L}{0.3}$ | 0 |
| PID | $1.2 \frac{\tau}{KL}$ | 2L | 0.5 L |

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

$$G_c(s) = 1.2 \frac{\tau}{KL} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right)$$



Control SMC (sliding mode controller)



$$U_{smc}(t) = U_{CSMC}(t) + U_{DSMC}(t)$$

$$U_{SMC}(t) = \frac{1}{K_m} [\tau_m t_o \lambda_o e(t) + Y(t)] + K_d \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta}$$

| | Parámetros | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|
| Controlado r | $\lambda_o [Tien]$ | $\lambda_1 [Tien]$ | $K_d [pu]$ | $\delta [pu /Tiempo]$ |
| SMC- Superficie Integral | $\leq \frac{\lambda_1^2}{4}$ | $\frac{\tau_m + t_o}{\tau_m t_o}$ | $\frac{0.51}{ K_m } \left(\dots \right)$ | $0.68 + 0.12 K_m K_d \lambda_1$ |
| SMC- Superficie Diferencial | ----- | $\frac{\tau_m + t_o}{\tau_m t_o}$ | $\frac{0.51}{ K_m } \left(\dots \right)$ | $0.68 + 0.12 K_m K_d \lambda_1$ |



Índices de desempeño

$$ITSE = \sum_{k=0}^{\infty} t * (e_k)^2$$

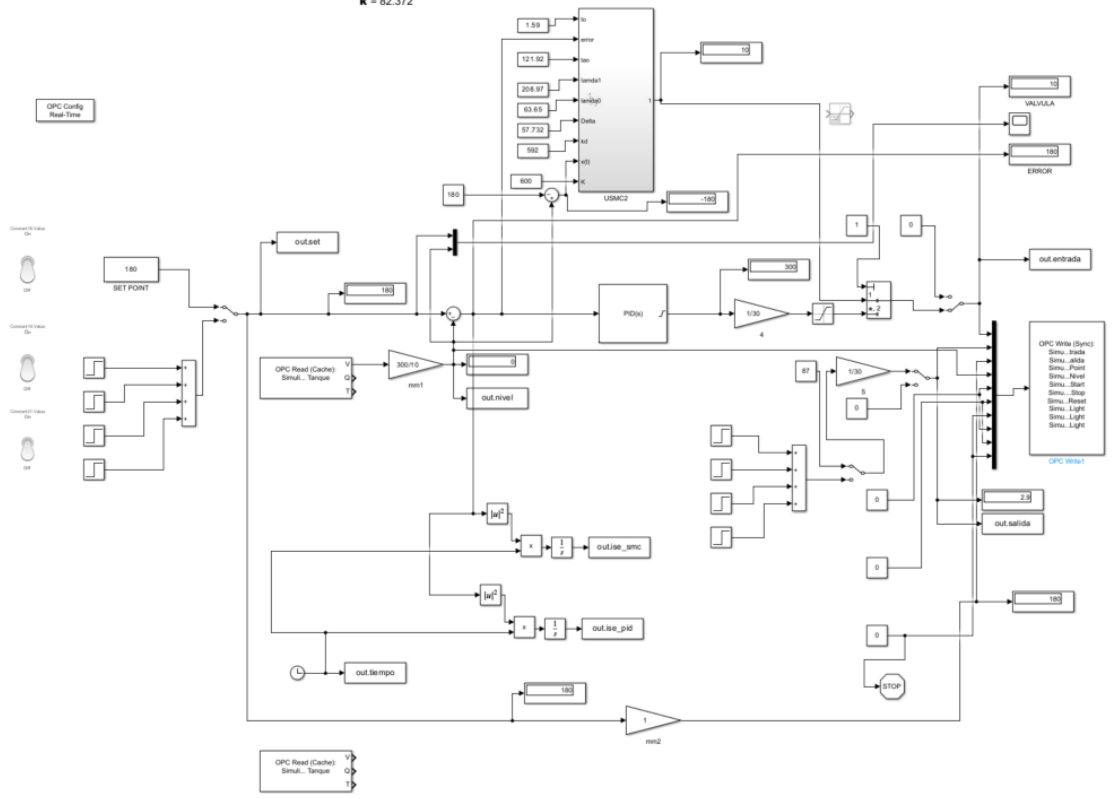
El ITSE (Integral del Error Cuadrático) mide la suma de los errores cuadráticos de seguimiento de la variable controlada a lo largo del tiempo. Cuanto menor sea el valor de ITSE, mejor será el rendimiento del controlador en términos de seguimiento preciso de la variable controlada (González, 2020).

$$TV_u = \sum_{k=1}^{\infty} |u_{k+1} - u_k|$$

Por otro lado, el TVu (Valor Absoluto Máximo del Error) mide el valor absoluto máximo de la diferencia entre la respuesta del sistema y la referencia en un período de tiempo determinado. Un valor menor de TVu indica una mejor capacidad del controlador para seguir la referencia sin grandes desviaciones.

Diseño del sistema

$KD=0.1794 \cdot 300 = 53.83$
 $L1=0.696 = 208.93$
 $L0=0.121 = 36.376$
 $\Delta=1.914 = 574.266$
 $k = 82.372$



Diseño del sistema

The image shows two screenshots of industrial software. The top screenshot is the 'KEPServerEX 6 Configuration' window, which is connected to a runtime. It displays a tree view on the left with 'Device1' selected, and a table on the right showing tag configurations. The table has columns for Tag Name, Address, Data Type, and Scan Rate. The bottom screenshot is the 'OPC Quick Client' window, which shows a tree view of the connected device's structure and a table of data points. The table has columns for Item ID, Data Type, Value, Timestamp, Quality, and Update Count.

| Tag Name | Address | Data Type | Scan Rate |
|--------------------------|---------|-----------|-----------|
| Altura Tanque | K0000 | Float | 100 |
| Apertura válvula entrada | K0003 | Float | 100 |
| Apertura válvula salida | K0002 | Float | 100 |

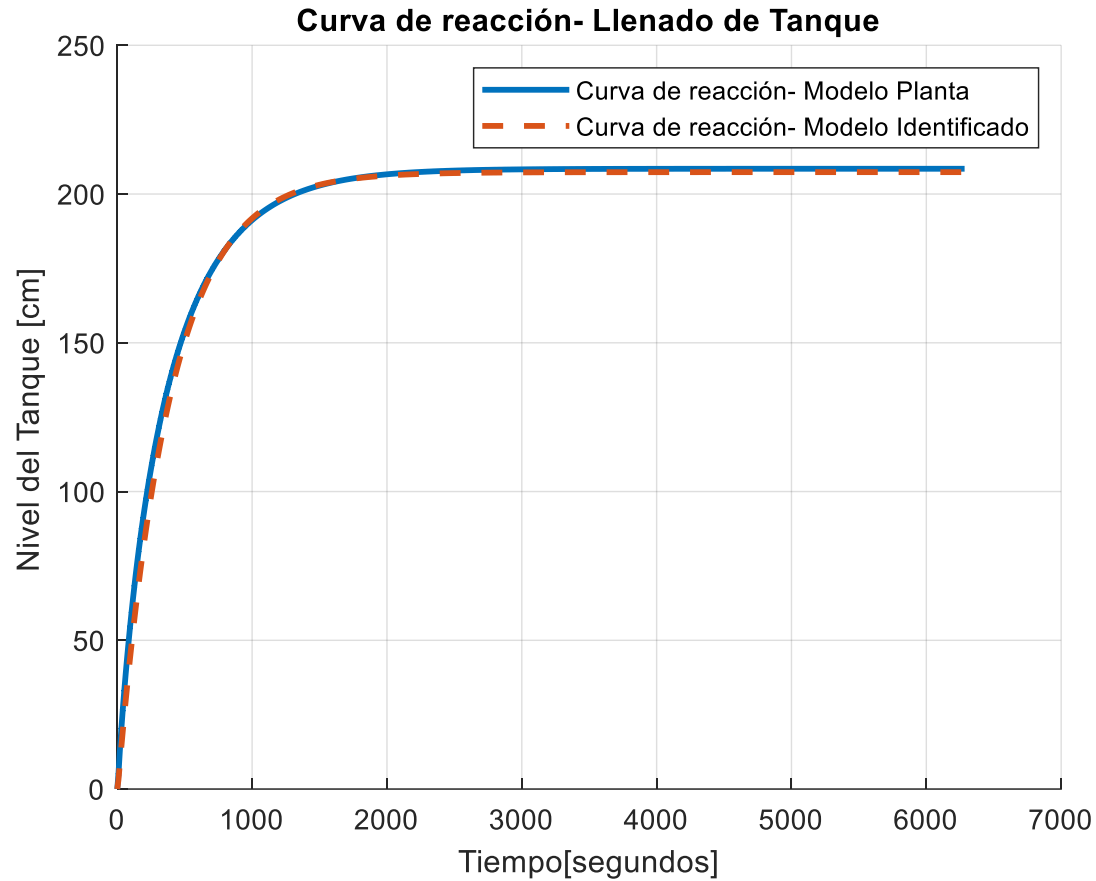
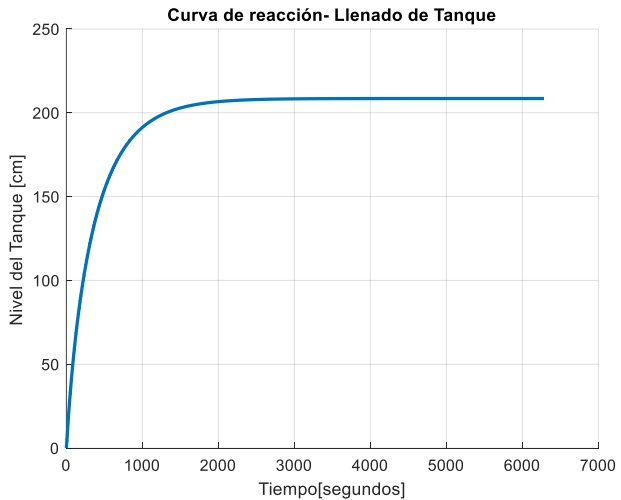
| Date | Time | Source | Event |
|-----------|----------|---------------------|---------------------------------------|
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | Security Policies Plug-in V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | Local Historian Plug-in V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | IDF for Splunk V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | Scheduler Plug-in V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | IoT Gateway V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | Profile Library Plug-in V6.13.250.0 |
| 12/5/2023 | 19:58:28 | KEPServerEX\Runtime | Runtime project replaced. |

| Item ID | Data Type | Value | Timestamp | Quality | Update Count |
|---|-----------|-------|--------------|---------|--------------|
| Simulink Device1.Altura Tanque | Float | 0 | 20:00:29.648 | Good | 1 |
| Simulink Device1.Apertura válvula entrada | Float | 0 | 20:00:29.648 | Good | 1 |
| Simulink Device1.Apertura válvula salida | Float | 0 | 20:00:29.648 | Good | 1 |

Conexión OPC

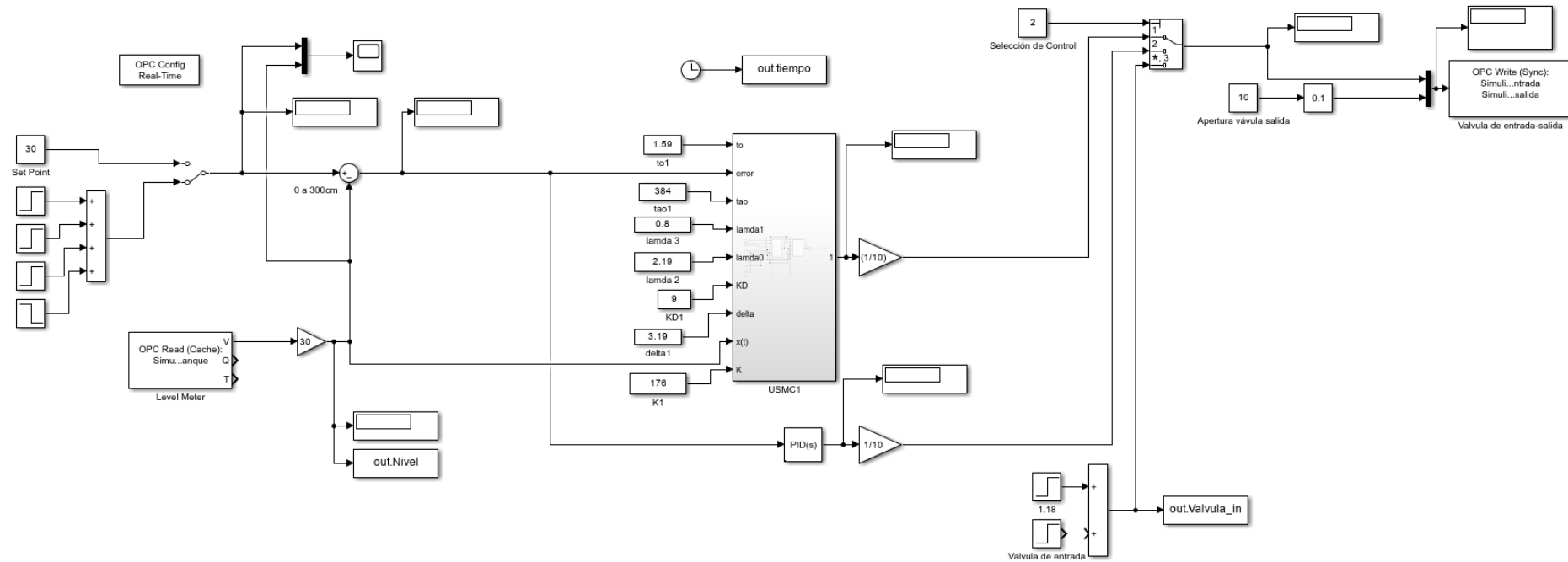
La conexión OPC KepServer se ha usado como protocolo de comunicación para la integración de diferentes dispositivos y que permitan el intercambio de datos en tiempo real.

Diseño del sistema



Se puede visualizar la curva de reacción del modelo de la planta en lazo abierto y el modelos de la planta identificada, en la cual se puede visualizar que su comportamiento es similar.

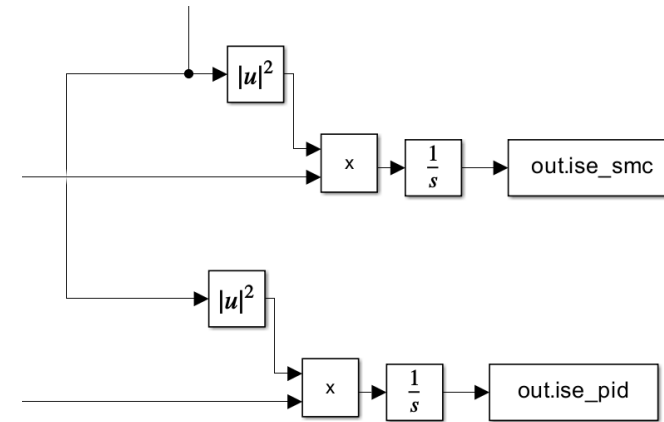
Diseño del sistema



Diseño del sistema

Este código invierte la matriz para obtener la integral del valor, lo que permite determinar el área bajo la curva y, por ende, el desempeño del sistema. Con esta técnica se acelera el proceso de cálculo y se obtiene un resultado con mayor índice de precisión.

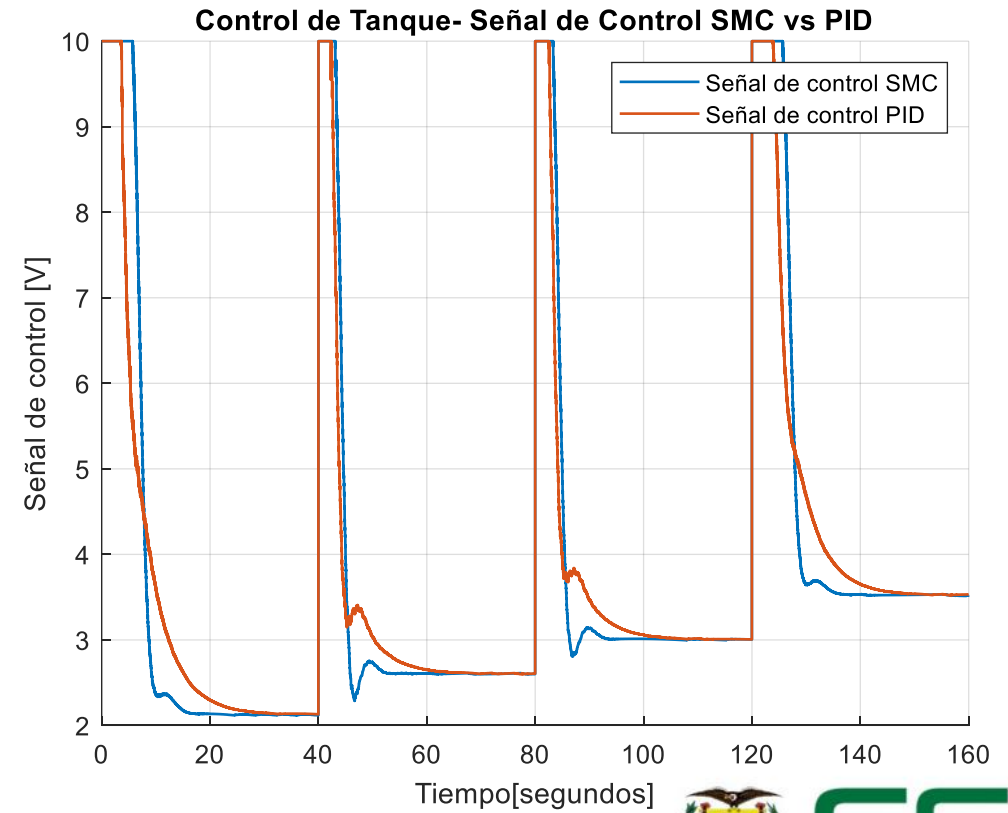
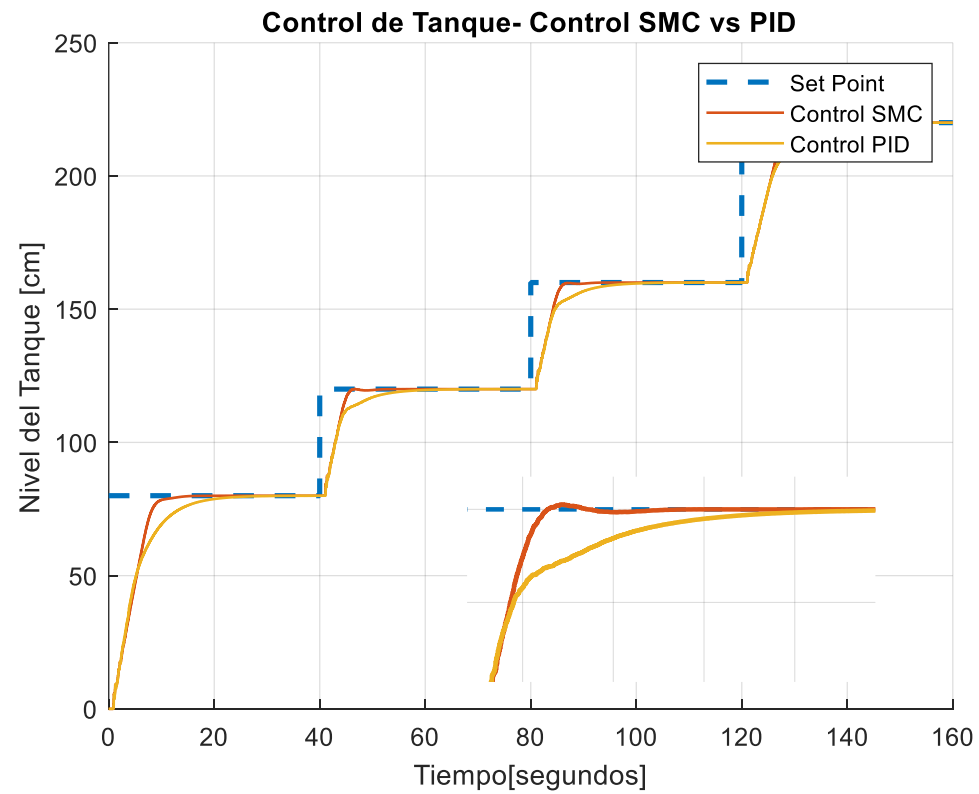
```
Signal=out.salida_pid;  
[n, m]=size(Signal);  
T=zeros(n-1,m);  
for i=1:1:n-1  
T(i,1)=abs(Signal(i+1,1)-Signal(i,1));  
end  
TVu_pid1=sum(T)
```



Se observa la integración de los bloques en Simulink, debido a la versatilidad, facilidad y rapidez que brinda este entorno para el cálculo del índice de desempeño en distintos comportamientos de la planta y modos de funcionamiento. Los valores obtenidos se almacenan en "out.smc y out.pid" según el tipo de simulación y controlador que se esté llevando a cabo. Esta está acorde a la Ecuación (21) de la fórmula de cálculo del ITSE.

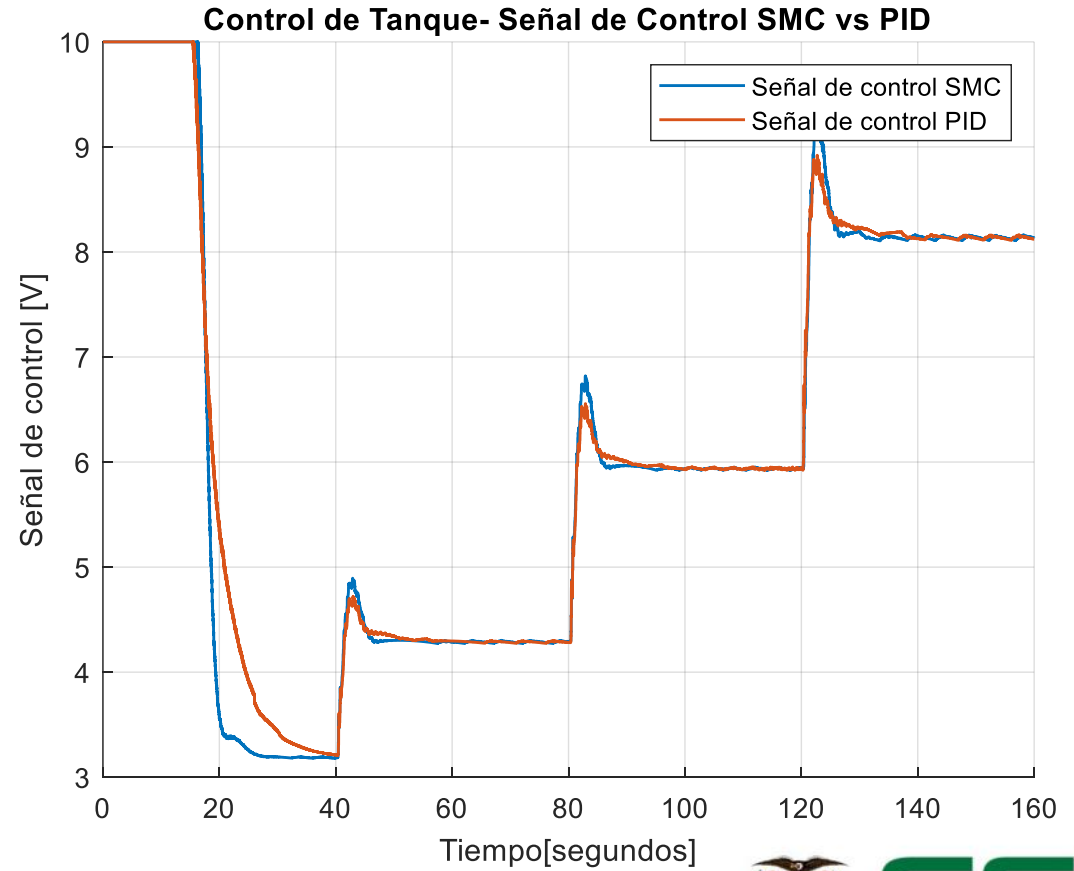
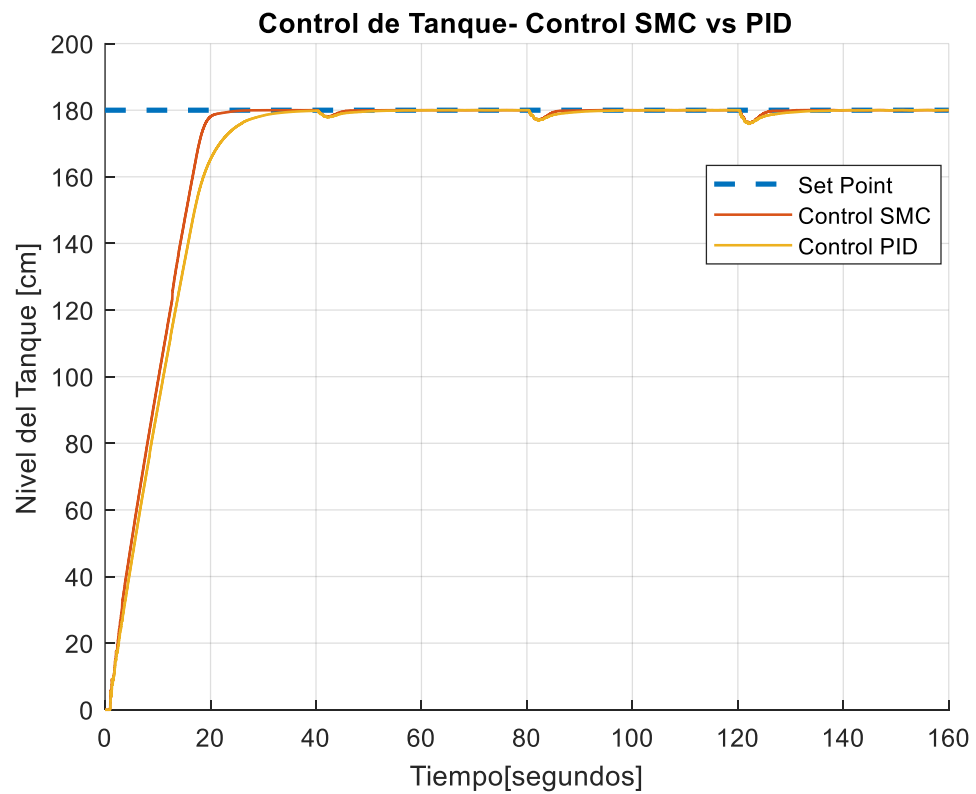
Pruebas y resultados

Prueba de seguimiento PID vs SMC



Pruebas y resultados

Prueba de regulación PID vs SMC



Pruebas y resultados

Cuadro comparativo de los indicadores de desempeño

| | PRUEBA DE SEGUIMIENTO | | | PRUEBA DE REGULACIÓN | | |
|------|-----------------------|----------|---------------------|----------------------|----------|---------------------|
| | PID | SMC | $I_{SMC} - I_{PID}$ | PID | SMC | $I_{SMC} - I_{PID}$ |
| TVu | 1,34E+06 | 9,00E+05 | -437.730 | 6,07E+05 | 4,23E+05 | -1,84E+05 |
| ITSE | 2,04E+10 | 1,93E+10 | -1,93E+09 | 1,12E+10 | 9,21E+09 | -2,04E+09 |

- El controlador SMC presenta un mejor desempeño en términos del error cuadrático medio integrado (ITSE)
- El control SMC por lo que presenta un mejor desempeño en términos de la variación temporal de la señal de control puesto que un valor más bajo de TVu indica una menor variación en la señal de control, lo que implica una mayor estabilidad y suavidad en el control del sistema.

Conclusiones

Se realizó pruebas comparativas entre el esquema de control propuesto SMC y el controlador PID en un sistema dinámico, se constata que la implementación del esquema SMC mejora significativamente el rendimiento y robustez del sistema en términos de los índices de desempeño ITSE y TVu, así como en la reducción del sobre-pico y el tiempo de asentamiento respondiendo ante perturbaciones y cambios en la referencia, lo que indica que su implementación puede ser una alternativa viable para mejorar el rendimiento y la estabilidad de sistemas dinámicos.