

Reducción del sobrepico de un elevador de tijeras mediante observador de estado, LQR y LQG

Reduction of overshoot in a scissor lift using state observer, LQR and LQG

José Daniel Soto La Rosa

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones

Santa Elena-Santa Elena, Ecuador

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2335-6493>

Email: jose.sotolarosa@upse.edu.ec

Resumen

Los elevadores de tijera son cruciales en diversas industrias, destacándose por su robusto diseño y capacidad para levantar cargas pesadas a alturas significativas. Su mecanismo de tijeras entrelazadas permite la elevación y descenso controlado de la plataforma de trabajo. La precisión y seguridad en su operación son esenciales para prevenir accidentes y garantizar la eficiencia. Un problema crítico es el "sobrepico" (overshoot), donde el elevador excede la altura deseada antes de estabilizarse, causando inestabilidad y riesgos de seguridad. Este fenómeno se relaciona con la dinámica y el control del sistema, que generalmente emplea sistemas hidráulicos o eléctricos para regular la extensión y retracción de las tijeras. La precisión en estos sistemas es vital para detener la plataforma en la altura correcta de manera suave y exacta.

En este trabajo, se presenta una solución basada en MATLAB/Simulink para mejorar el sobrepico en elevadores de tijera mediante técnicas avanzadas de control. Se implementan y evalúan diferentes estrategias de control, incluyendo el uso de un Observador de Estado, LQR (Regulador Cuadrático Lineal) y LQG (Controlador Lineal Cuadrático Gaussiano). El Observador de Estado se utiliza para estimar las variables internas del sistema, permitiendo una retroalimentación más precisa. El LQR se emplea para diseñar un controlador que minimiza una función de costo, optimizando el equilibrio entre el esfuerzo de control y el error de estado. Finalmente, el LQG incorpora un filtro de Kalman para gestionar la incertidumbre y el ruido del sistema, proporcionando un control robusto y eficiente.

Esto demostrará una mejora significativa en la precisión y estabilidad del elevador de tijera, reduciendo el sobrepico y mejorando la seguridad operativa. Esta investigación contribuye al desarrollo de sistemas de control más avanzados y seguros para aplicaciones industriales, optimizando el rendimiento y la confiabilidad de los elevadores de tijera. [3]

Palabras Claves: Elevadores de tijera, Seguridad, Precisión, Sobrepico (overshoot), Dinámica del sistema, Control del sistema, Sistemas hidráulicos, Sistemas eléctricos, MATLAB, Simulink, Observador de Estado, Regulador Cuadrático Lineal (LQR), Controlador Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG).

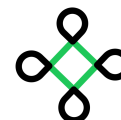
Abstract

Scissor lifts are crucial in various industries, standing out for their robust design and capacity to lift heavy loads to significant heights. Their interlocking scissor mechanism allows controlled elevation and

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons de tipo (CC-BY-NC-SA).

E-mail: editorial@ecosur.gopsapp.com





descent of the work platform. Precision and safety in their operation are essential to prevent accidents and ensure efficiency. A critical problem is "overshoot," where the lift exceeds the desired height before stabilizing, causing instability and safety risks. This phenomenon is related to the system's dynamics and control, which generally employ hydraulic or electric systems to regulate the extension and retraction of the scissors. Precision in these systems is vital to stop the platform at the correct height smoothly and accurately.

In this work, a MATLAB/Simulink-based solution is presented to improve overshoot in scissor lifts through advanced control techniques. Different control strategies are implemented and evaluated, including the use of a State Observer, LQR (Linear Quadratic Regulator), and LQG (Linear Quadratic Gaussian). The State Observer is used to estimate the internal variables of the system, allowing for more precise feedback. The LQR is employed to design a controller that minimizes a cost function, optimizing the balance between control effort and state error. Finally, the LQG incorporates a Kalman filter to manage system uncertainty and noise, providing robust and efficient control.

This will demonstrate a significant improvement in the precision and stability of the scissor lift, reducing overshoot and enhancing operational safety. This research contributes to the development of more advanced and safer control systems for industrial applications, optimizing the performance and reliability of scissor lifts.

Keywords: Scissor lifts, Safety, Precision, Overshoot, System dynamics, System control, Hydraulic systems, Electric systems, MATLAB, Simulink, State Observer, Linear Quadratic Regulator (LQR), Linear Quadratic Gaussian (LQG).

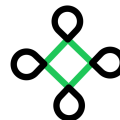
1. Introducción

Antecedente sobre la problemática del sobrepico en elevadores de tijera

Los elevadores de tijera son equipos esenciales en una amplia gama de industrias, desde la construcción y el mantenimiento hasta la logística y el almacenamiento. Su diseño robusto y capacidad para levantar cargas pesadas a alturas significativas los convierte en herramientas indispensables para tareas que requieren acceso seguro y eficiente a áreas elevadas. Estos dispositivos se caracterizan por su mecanismo de tijera, que utiliza un sistema de tijeras entrelazadas que se extienden y retraen de manera controlada para elevar y descender la plataforma de trabajo.

La seguridad y la precisión en la operación de los elevadores de tijera son cruciales para prevenir accidentes y garantizar la eficacia en el trabajo realizado. La capacidad de un elevador de tijera para alcanzar y mantener una altura específica sin desviaciones inesperadas es fundamental, no solo para la seguridad de los operadores, sino también para la integridad de la estructura y el equipo en uso.





En este contexto, surge la problemática del ”sobrepico” (overshoot), un fenómeno donde el elevador excede la altura deseada antes de estabilizarse en la posición correcta. Este problema puede generar inestabilidad, poner en riesgo la seguridad del operador y afectar la calidad del trabajo realizado. A medida que las industrias buscan mejorar la eficiencia y seguridad de sus operaciones, es crucial entender las causas y soluciones para el sobrepico en los elevadores de tijera.

El sobrepico en elevadores de tijera es un problema relacionado con la dinámica y el control del sistema. Generalmente, los elevadores de tijera utilizan sistemas hidráulicos o eléctricos para controlar la extensión y retracción de sus tijeras. La precisión de estos sistemas es crucial para garantizar que la plataforma se detenga en la altura deseada de manera suave y exacta. [4]

Control por observador de estados, LQR Y LQG

El Control por Observador de Estado, LQR (Regulador Cuadrático Lineal) y LQG (Controlador Lineal Cuadrático Gaussiano) son técnicas avanzadas utilizadas en la ingeniería de sistemas de control para lograr un rendimiento y estabilidad óptimos en sistemas dinámicos. El Observador de Estado está diseñado para estimar los estados internos de un sistema basándose en mediciones de salida, lo que permite un control de retroalimentación de estado preciso. El LQR es un método utilizado para diseñar un controlador que minimiza una función de costo, equilibrando el esfuerzo de control y el error de estado para lograr un rendimiento óptimo. El LQG extiende el LQR incorporando un filtro de Kalman para manejar sistemas con ruido e incertidumbre, proporcionando un control robusto en aplicaciones del mundo real. Estas técnicas se aplican ampliamente en diversas industrias para mejorar la precisión, estabilidad y eficiencia de los sistemas de control. [5]

Control por Observador de Estados

El control por observador de estados es una técnica utilizada en sistemas dinámicos para estimar el estado interno del sistema cuando no todos los estados son directamente medibles. Funciona construyendo un modelo





dinámico del sistema y utilizando las entradas y salidas conocidas para estimar los estados internos no medidos.

El diagrama que lo representa es el siguiente:

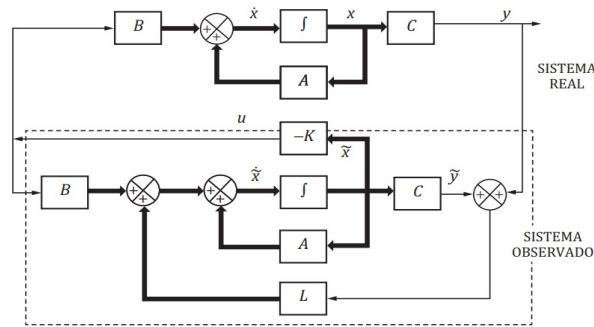


Figure 1: Diagrama del Control por Observador de Estados [2]

Control por Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

El Control por Regulador Cuadrático Lineal (LQR) es un método de control óptimo aplicado a sistemas dinámicos lineales. Utiliza un modelo matemático del sistema representado por ecuaciones de estado lineales. El objetivo del LQR es minimizar una función de coste cuadrática que penaliza tanto el error en el estado del sistema como el esfuerzo de control. Para lograr esto, el LQR calcula ganancias de realimentación de estado óptimas que determinan cómo ajustar las entradas de control en tiempo real. Estas ganancias se derivan de la solución a un problema de control óptimo que busca optimizar el rendimiento del sistema bajo ciertas restricciones.

La implementación del LQR requiere conocer el modelo dinámico del sistema y sintonizar adecuadamente los pesos en la función de coste. Esto permite diseñar un controlador que no solo mejora la estabilidad del sistema, sino que también optimiza su respuesta dinámica y eficiencia de control. [6]





Representación Matemática

El LQR se basa en la teoría de control óptimo para sistemas lineales y se formula utilizando un modelo de espacio de estados lineal:

1. Modelo de Espacio de Estados: El sistema se describe mediante ecuaciones de estado de la forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada de control, A es la matriz de estado, y B es la matriz de entrada.

Función de Coste Cuadrática: La función de coste del LQR se define como:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt$$

donde Q es una matriz semidefinida positiva que penaliza los errores en el estado $x(t)$, y R es una matriz definida positiva que penaliza los esfuerzos de control $u(t)$.

3. Solución de la Ecuación de Riccati: Las ganancias óptimas de realimentación de estado K se obtienen resolviendo la ecuación de Riccati algebraica:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

donde P es la matriz simétrica semidefinida positiva que satisface esta ecuación.

4. Ganancias de Control: Una vez que se encuentra P , las ganancias de realimentación K se calculan como:

$$K = R^{-1}B^T P$$

Estas ganancias determinan cómo se ajusta $u(t)$ en función de $x(t)$ para minimizar la función de coste J .

5. Implementación: El controlador LQR se implementa utilizando las





ganancias K para calcular $u(t)$ en tiempo real según la ley de control:

$$u(t) = -Kx(t)$$

donde K optimiza el comportamiento del sistema bajo la función de coste definida.

Esta interpretación matemática del LQR muestra cómo se estructura el control óptimo para sistemas lineales, maximizando el rendimiento y minimizando los costos de control de acuerdo con los criterios establecidos por Q y R .

Su representación en diagrama es el siguiente:

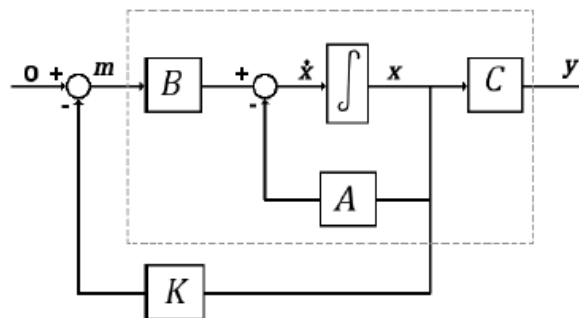


Figure 2: Diagrama del Control LQR [11]

Controlador Lineal Cuadrático Gaussiano(LQG)

El controlador LQG combina el Control por Regulador Cuadrático Lineal (LQR) con un Filtro de Kalman (KF), formando un sistema integrado para controlar sistemas dinámicos lineales con incertidumbre y ruido. LQG significa "Linear Quadratic Gaussian". En términos simples, el LQG utiliza un modelo matemático del sistema, representado por ecuaciones de estado lineales, similar al LQR. Utiliza una función de coste cuadrática para minimizar errores en el estado y el esfuerzo de control, como en el LQR. Sin embargo, a diferencia del LQR solo, el LQG incorpora un Filtro de Kalman para estimar el estado del sistema en tiempo real, incluso cuando no todos los estados son medibles directamente debido a la presencia de ruido en las mediciones.

El Filtro de Kalman permite al LQG obtener una estimación precisa del





estado del sistema basándose en las mediciones disponibles y en el modelo dinámico del sistema. Esta estimación se utiliza junto con las ganancias de realimentación óptimas del LQR para calcular las entradas de control que minimizan la función de coste global, considerando tanto la precisión del control como la estimación precisa del estado del sistema. [7]

Representación Matemática

El controlador LQG (Linear Quadratic Gaussian) combina el Control por Regulador Cuadrático Lineal (LQR) con un Filtro de Kalman (KF) para sistemas dinámicos lineales.

1. Modelo de Espacio de Estados: El sistema dinámico se describe mediante ecuaciones de estado lineales:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada de control, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salida, A es la matriz de estado, B es la matriz de entrada, C es la matriz de salida, G modela la influencia del ruido en el estado a través de $w(t) \sim \mathcal{N}(0, Q)$, y $v(t) \sim \mathcal{N}(0, R)$ es el ruido en las mediciones.

2. Función de Coste Cuadrática: La función de coste del LQG es:

$$J = \mathbb{E} \left\{ \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt \right\}$$

donde Q y R son matrices definidas positivas que penalizan el error en el estado y el esfuerzo de control, respectivamente.

3. Filtro de Kalman: El Filtro de Kalman se utiliza para estimar el estado no medible $x(t)$ basándose en las mediciones $y(t)$ y el modelo dinámico del sistema. La estimación del estado, denotada como $\hat{x}(t|t)$, se actualiza recursivamente utilizando: - Predicción del estado estimado:

$$\hat{x}(t+1|t) = A\hat{x}(t|t) + Bu(t)$$





- Actualización del estado estimado basado en la medición:

$$\hat{x}(t|t) = \hat{x}(t|t-1) + K(t)[y(t) - C\hat{x}(t|t-1)]$$

donde $K(t)$ es la ganancia de Kalman calculada dinámicamente.

4. Ganancias de Control LQR: Las ganancias de realimentación de estado K se calculan como en el LQR estándar utilizando la solución de la ecuación de Riccati algebraica:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

y luego,

$$K = R^{-1}B^T P$$

donde P es la matriz de ganancia obtenida de la ecuación de Riccati.

5. Implementación del Control: El controlador LQG utiliza la estimación del estado $\hat{x}(t|t)$ y las ganancias K para calcular la entrada de control:

$$u(t) = -K\hat{x}(t|t)$$

Esta entrada minimiza la función de coste global considerando tanto la precisión del control como la precisión de la estimación del estado.

El LQG integra el control óptimo del LQR con la estimación robusta del Filtro de Kalman, proporcionando una solución efectiva para sistemas dinámicos lineales afectados por ruido y con estados no completamente observables. [8]

Su representación en diagrama es el siguiente:



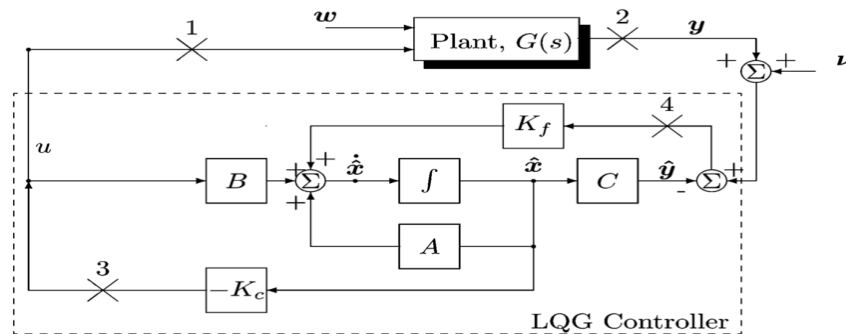


Figure 3: Diagrama del Control LQG [12]

II. Materiales y métodos

Descripción del Sistema

El sistema tomado de referencia es un modelo que se encuentra en la parte de ejemplos de "MatWorks", se trata de un modelado en Matlab/simulink/Simscape el cual es un elevador de tijeras que consta de varias entradas y varias salidas, esto representa un sistema MIMO. No obstante, en este trabajo solo se tomó en cuenta una entrada y una salida que corresponden a la parte de elevación de mi sistema. El sistema es el siguiente:

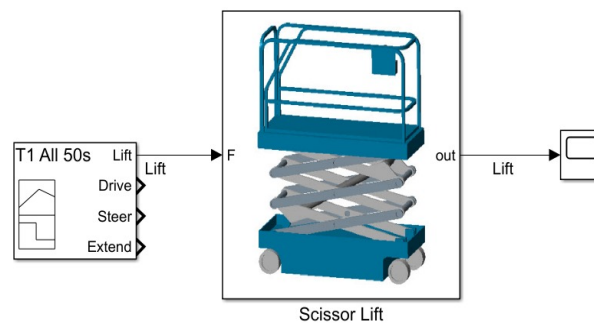
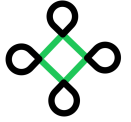


Figure 4: Modelado del Sistema [1]

Características del Sistema

- **Señal de entrada:** El sistema presentado cuenta con una entrada representada en pulsaciones, lo cual se logra mediante el uso del bloque "Signal Builder". Este bloque se utiliza para definir señales de entrada o de prueba que se pueden utilizar para simular y validar el comportamiento de un sistema bajo diferentes condiciones.





- **Señal de salida:** En este caso, la salida esperada del sistema es la posición en la que se queda.

Identificación del Sistema

1. Recopilación de datos: Se recopilieron datos de entrada del sistema y de la salida deseada para controlar la velocidad del ascensor mediante el uso del bloque To Workspace en Simulink. Este enfoque permitió capturar y almacenar información crucial para el análisis y la optimización del control.

2. Variables del sistema para almacenar: Para facilitar el procesamiento y el análisis de los datos, se definieron dos variables principales: la variable de entrada y la variable de salida del sistema. Esto fue fundamental para organizar la información recolectada y facilitar su manipulación en las etapas siguientes del proyecto.

3. Aplicación de la herramienta IDENT: Posteriormente, se aplicó la herramienta de Identificación del Sistema de MATLAB para realizar un análisis detallado de los datos recolectados. Este paso incluyó la evaluación de cómo las señales de entrada afectaron la salida deseada, proporcionando insights valiosos para ajustar y mejorar el rendimiento del sistema.

4. Importación de datos: Los datos recolectados se importaron al dominio del tiempo con un intervalo de muestreo de 0.002 segundos, asegurando una representación precisa y detallada del comportamiento del sistema en cada intervalo de tiempo.

5. La verificación de la correcta importación: La verificación de la correcta importación de las señales fue crucial. Esto se logró mediante la visualización gráfica de las señales de entrada y salida, donde se examinaron gráficamente para asegurar que reflejaran correctamente el comportamiento esperado del sistema. Este proceso garantizó la fiabilidad de los datos utilizados en las etapas posteriores del diseño y ajuste del controlador del ascensor.





6. Ecuaciones en Espacio de Estado: Para realizar esta sección fue necesario probar varias combinaciones posibles del sistema, luego de varios intentos se determinó que la aproximación más cercana era colocando en el "Model Order = 4", lo cual daba una aproximación muy buena del 91.61 en el caso de este sistema.

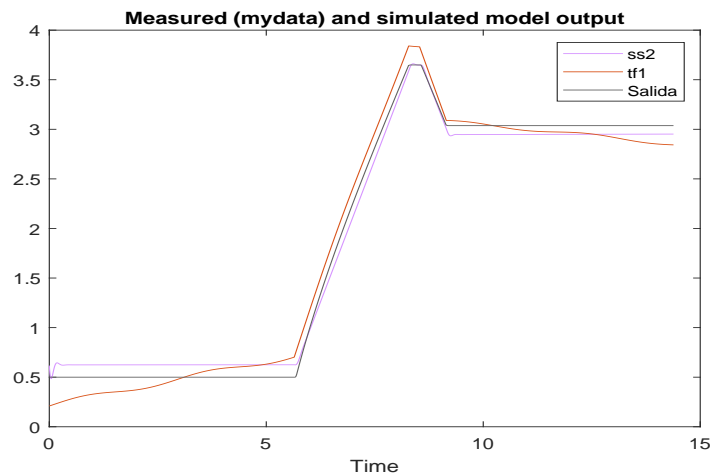


Figure 5: Figura generada en MATLAB

7. Matrices en Espacio de estados: En este caso se obtuvo directamente las ecuaciones en espacio de estado desde el mismo IDENT de matlab, estas matrices son las siguientes:

Matriz A :

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 \\ x1 & 0.004147 & -0.04905 & 0.004069 \\ x2 & 1.061 & -9.137 & 47.26 \\ x3 & 0.7602 & -11.76 & -18.94 \end{bmatrix}$$

Matriz B :

$$B = \begin{bmatrix} u1 \\ x1 & 4.841 \times 10^{-6} \\ x2 & 1.134 \\ x3 & -2.435 \end{bmatrix}$$





Matriz C :

$$C = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 \\ y1 & 187.6 & -0.009042 & -8.395 \times 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Matriz D :

$$D = \begin{bmatrix} u1 \\ y1 & 0 \end{bmatrix}$$

Desarrollo de los controladores

Control por Observador de Estados

Para realizar un control por Observador de Estados, es necesario saber si el sistema es controlable y observable. En este caso se comprobó que el sistema es tanto observable como controlable. Luego de eso, se escogieron polos deseados, en este caso los polos deseados son -1, -2 y -3. Recordemos que el control por observador de estados es necesario colocar dichos polos para calcular las ganancias K y L del sistema.

Matriz K del Controlador:

$$K = [1.1550 \quad 3.5872 \quad 10.7354]$$

Matriz L del Observador:

$$L = \begin{bmatrix} -0.1172 \\ 9.2170 \\ -41.4221 \end{bmatrix}$$

Teniendo las matrices de ganancias K , L y las matrices que definen la dinámica del sistema ya podemos armar el simulink, este queda de la siguiente forma:

Control por Regulador Cuadrático Lineal (LQR)

El objetivo del control LQR es diseñar un controlador óptimo que minimice una función de costo definida, usualmente la integral del cuadrado de la desviación del estado del sistema y la acción de control. Esto se logra asignando pesos a las variables de estado y a la acción de control en la función de costo. [9] Realizando todos los procesos necesarios para la obtención de la ganancia LQR, esta queda de la siguiente forma:



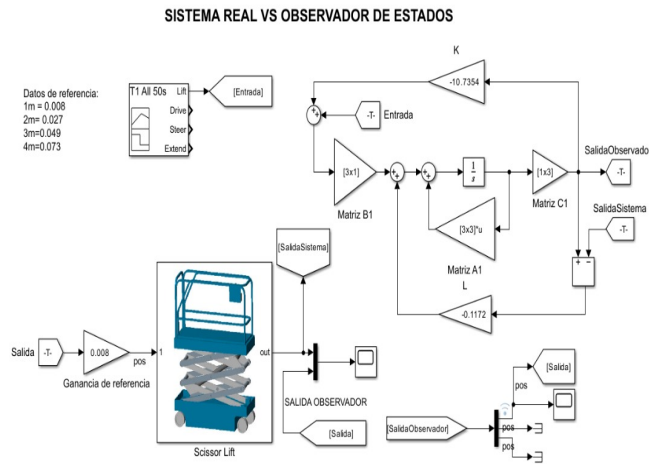


Figure 6: Controlador por Observador de Estados

$$KK = [-0.0179 \quad -1.2462 \quad -2.6937 \quad -10.0000]$$

$$K = [889.0963 \quad -1.2462 \quad -2.6937]$$

$$kI = 10.0000$$

Donde :

- **KK**: Es el vector completo de ganancias calculado por la función lqr aplicado al sistema ampliado.
- **K**: Son las ganancias específicas para los estados del sistema original.
- **Ki**: Es la ganancia para el estado integral, lo que ayuda a eliminar el error en estado estacionario.

Teniendo tanto las matrices que definen la dinámica del sistema como las ganancias LQR, podemos armarlo en Simulunk, esto queda de la siguiente forma:



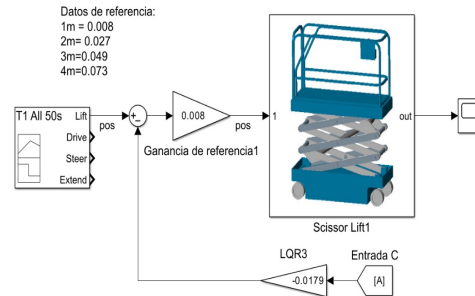


Figure 7: Controlador LQR

Control Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG)

El controlador LQG (Linear-Quadratic-Gaussian) es una combinación de un controlador LQR (Linear-Quadratic Regulator) y un observador de estados basado en el filtro de Kalman. Se utiliza en sistemas de control óptimo para manejar tanto la regulación del estado del sistema como la estimación de estados no medidos en presencia de ruido. El LQG es eficaz en sistemas lineales y en tiempo continuo o discreto donde el modelo del sistema y el ruido pueden ser descritos por procesos estocásticos Gaussianos. [10] Haciendo todos los cálculos necesarios para el cálculo, este nos da la siguiente ganancia:

LQR Gain Matrix (K_r):

$$K_r = [1.0622 \quad -0.0145 \quad -0.1613]$$

Kalman Filter Gain Matrix (K_e):

$$K_e = \begin{bmatrix} 10.0000 \\ -0.0340 \\ 0.0022 \end{bmatrix}$$

Teniendo todos los datos necesarios, procedemos a colocarlo en simulink quedando de la siguiente manera:



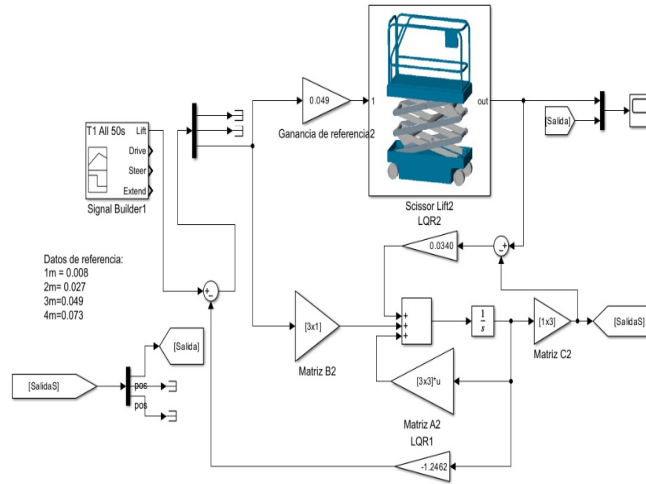


Figure 8: Controlador LQG

III. Resultados

En esta sección se presentarán los resultados de las gráficas obtenidas en cada controlador.

Control por observador de estados

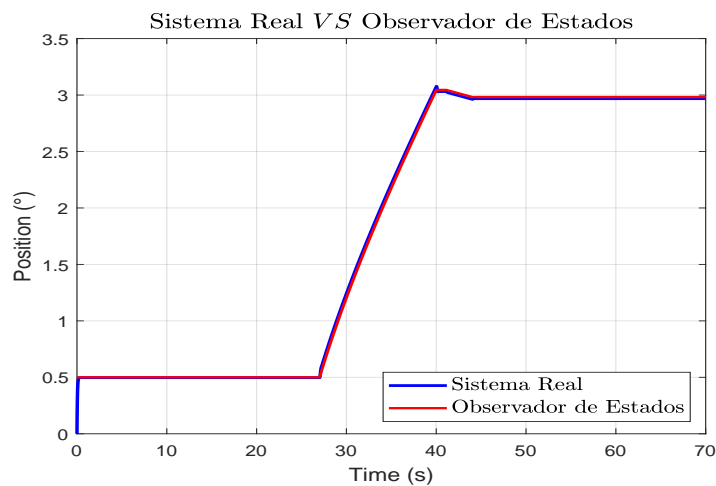


Figure 9: Sistema Real VS Observador de Estados





Gráfico del error entre el sistema real y el observador de estados

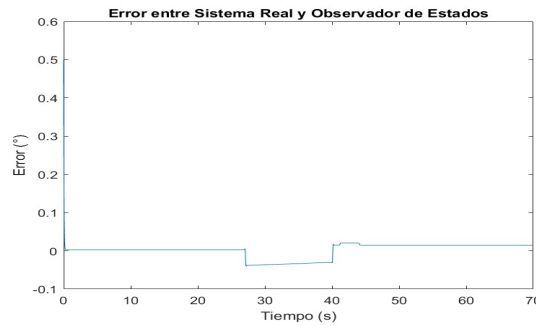


Figure 10: Error entre el Sistema Real y el Observador de Estados

Tabla de resultados del control por observador de estados

Parámetro	Sistema Real	Observador
Error Estacionario	0.01020	0.01015
Sobrepico	0.07730	0.07725
Sobrepico (%)	2.58%	2.48%
Tiempo de Estabilización	40.20000	40.20000

Table 1: Comparación entre Sistema Real y Observador

Análisis:

Error Estacionario: El error estacionario es idéntico para ambos, lo que sugiere que el Observador está siguiendo muy de cerca el comportamiento del Sistema Real.

Sobrepico: El sobrepico y el porcentaje de sobrepico son iguales en ambos casos, indicando que la respuesta transitoria del Observador es similar a la del Sistema Real.

Tiempo de estabilización: El tiempo de estabilización es exactamente el mismo, lo que confirma que ambos alcanzan el estado estacionario al mismo tiempo.





Control por regulador cuadrático Lineal (LQR)

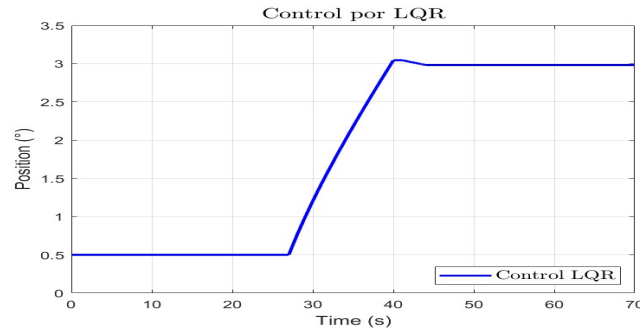


Figure 11: Control por regulador cuadrático lineal (LQR)

Tabla de la posición del control LQR

Parámetro	Sistema Real	LQR
Error Estacionario	0.01020	-0.01750
Sobrepico	0.07730	0.04320
Sobrepico (%)	2.58%	1.44%
Tiempo de Estabilización	40.20000	40.20000

Table 2: Comparación entre Sistema Real y LQR

Análisis:

Error estacionario: El LQR tiene un error estacionario negativo, lo que indica que la salida final es ligeramente inferior al setpoint en comparación con el Sistema Real.

Sobrepico: El sobrepico del LQR es significativamente menor que el del Sistema Real, lo que indica una respuesta transitoria más amortiguada.

Tiempo de estabilización: Ambos sistemas alcanzan el estado estacionario al mismo tiempo.





Control Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG)

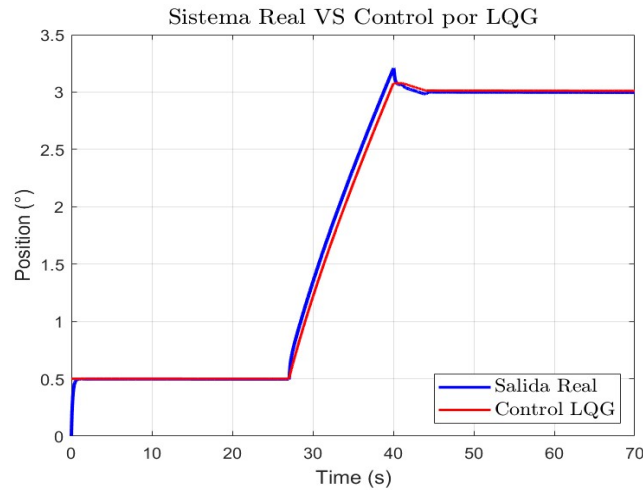


Figure 12: Sistema Real VS Control Lineal Cuadrático Gaussiano (LQG)

Gráfico del Error entre el Sistema Real y el Control por LQG

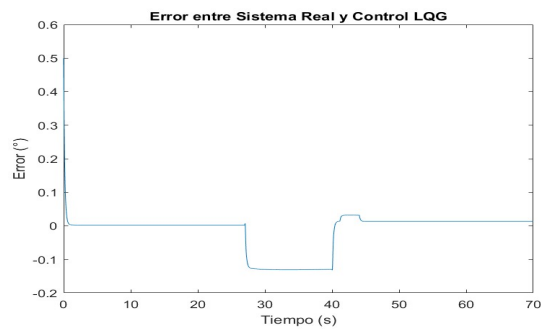


Figure 13: Error entre el Sistema Real y el Control por LQG





Tabla de resultados del control LQG

Parámetro	Sistema Real	LQG
Error Estacionario	0.01020	-0.00320
Sobrepico	0.07730	0.01930
Sobrepico (%)	2.58%	1.22%
Tiempo de Estabilización	40.20000	40.20000

Table 3: Comparación entre Sistema Real y LQG

Análisis:

Error Estacionario: El LQG tiene un error estacionario ligeramente negativo, lo que indica una pequeña desviación por debajo del setpoint.

Sobrepico: El sobrepico del LQG es mayor que el del Sistema Real, lo que indica una respuesta transitoria con mayor oscilación.

Tiempo de Estabilización: Ambos sistemas alcanzan el estado estacionario al mismo tiempo.

Gráfica Comparativa entre el Sistema Real, Observador de Estados, LQR y LQG

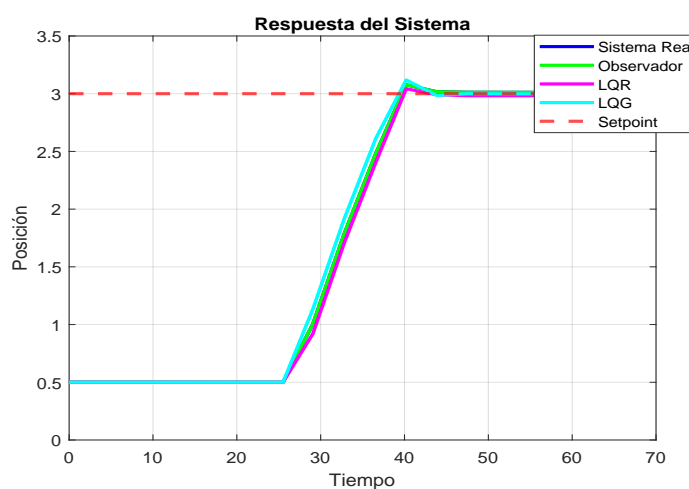


Figure 14: Sistema Real VS Observador, LQR y LQG





Tabla Comparativa entre el Sistema Real, Observador de Estados, LQR y LQG

Parámetro	Sistema Real	Observador	LQR	LQG
Error Estacionario	0.01020	0.01015	-0.01750	-0.00320
Sobrepico	0.07730	0.07725	0.04320	0.01930
Sobrepico (%)	2.58%	2.48%	1.44%	1.22%
Tiempo de Estabilización	40.20000	40.20000	40.20000	40.20000

Table 4: Comparación entre Sistema Real, Observador, LQR y LQG

Análisis:

Error estacionario: Tanto el Sistema Real como el Observador tienen el mismo error estacionario, indicando que el Observador es una buena estimación del Sistema Real. El LQR y el LQG tienen errores estacionarios negativos, pero el del LQR es más pronunciado.

Sobrepico: El LQR tiene el menor sobrepico, indicando una mejor amortiguación, mientras que el LQG tiene el mayor sobrepico, lo que sugiere una mayor oscilación transitoria. El Sistema Real y el Observador tienen sobrepicos iguales.

Tiempo de estabilización: Todos los sistemas alcanzan el estado estacionario al mismo tiempo, lo que indica una similitud en la velocidad de respuesta a largo plazo.

IV. Conclusiones

En este estudio, se ha realizado una comparativa detallada entre tres métodos de control: el Observador de Estados, el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y el Regulador Cuadrático Lineal con Ganancia de Kalman (LQG), aplicados a un sistema modelado de un elevador de tijeras. El objetivo principal era reducir el sobrepico y mejorar la precisión de la posición del elevador.

Los resultados obtenidos a través de simulaciones en Simulink demuestran que tanto el Observador de Estados como el LQR presentan un rendimiento superior en términos de precisión y control del sobrepico en comparación





con el LQG.

El Observador de Estados mostró una notable capacidad para estimar con precisión los estados del sistema y proporcionar un control robusto, reduciendo el sobrepico y mejorando la respuesta del sistema. Esto se debe a su capacidad de utilizar las mediciones disponibles para estimar los estados no medidos, proporcionando así una estimación precisa del comportamiento del sistema.

Por otro lado, el controlador LQR, que optimiza una función de costo que penaliza el error de estado y el esfuerzo de control, también demostró ser altamente efectivo en la reducción del sobrepico y la mejora de la precisión de la posición. El diseño del LQR permite un equilibrio entre el rendimiento y el esfuerzo de control, lo que resulta en una respuesta rápida y precisa del sistema.

En comparación, el controlador LQG, que combina el LQR con un filtro de Kalman para tratar con sistemas ruidosos y no perfectamente modelados, no alcanzó el mismo nivel de precisión y control del sobrepico que los otros dos métodos. Aunque el LQG es beneficioso en entornos con alta incertidumbre y ruido, en este caso específico, el modelo del elevador de tijeras demostró que el Observador de Estados y el LQR eran más adecuados para cumplir con los objetivos de control.

En conclusión, para el sistema modelado del elevador de tijeras, los controladores basados en el Observador de Estados y el LQR son las mejores opciones para minimizar el sobrepico y mejorar la precisión de la posición. La capacidad del Observador de Estados para proporcionar estimaciones precisas y la optimización inherente del LQR ofrecen un control robusto y eficiente, cumpliendo con los requerimientos de precisión y estabilidad del sistema.

Referencias

[1] <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36553-scissor-lift-model-in-simsca-pe-multibody>.

[2] Braschi, E. A. (2014). Enfoque Practico del Control Moderno con Aplicaciones en Matlab (Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas S. A.





C. ed.). Lima, Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Recuperado el 25 de 06 de 2024.

[3] O. Nazarova and V. Osadchy and S. Shulzhenko, "Influence of Supply Voltage on the Accuracy of Two-Speed Elevator Positioning," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598664.

[4] J. Gonzalez-Villagomez and C. Rodriguez-Donate and M. Lopez-Ramirez and R.I. Mata-Chavez and O. Palillero-Sandoval, "Novel Iterative Feedback Tuning Method Based on Overshoot and Settling Time with Fuzzy Logic," Processes, vol. 11, p. 694, 2023, doi: 10.3390/pr11030694.

[5] H. Lee and K. Nam, "Online Overshoot Suppression Method for EV Propulsion Motor Considering Cross-Coupled Inductance," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 12, pp. 9255-9265, 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2815944.

[6] W. Zhang and X. Zhang and C. Yan and S. Xiang and L. Wang, "A characteristic triangle method on input vectors of scissor lift mechanism and its applications in modeling and analysis," Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, vol. 9, no. 3, p. JAMDSM0042, 2015, doi: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0042.

[7] T. Funk and N. Savosteenko and T. Kazantseva, "Mechatronic System of Single-Column Lift with Improved Accuracy of Positioning and Smoothness of Freight Movement," 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501614.

[8] M.T. Islam and C. Yin and S. Jian and L. Rolland, "Dynamic analysis of Scissor Lift mechanism through bond graph modeling," 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2014, pp. 1393-1399, doi: 10.1109/AIM.2014.6878277.





[9] H. Choe and Y. Kwon and J. Jo and K. Ri and H. Jang and T. Xing, "A method to Improve the Stability of Scissor Lifting Platform by using Finite Element Analysis," International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, vol. 9, no. 2, pp. 314-322, 2022, doi: 10.32628/IJSRSET229253.

[10] R. Juarez and M. Ledet and D. Johnson and M.H. Tanveer and M. Marshall, "Design and Implementation of a Cost-Effective Semi-Autonomous Scissor Lift Robot for Industrial Material Handling," SoutheastCon 2018, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/SECON.2018.8478995.

[11] walter.cargua@epn.edu.ec, W. C. (s.f.). Comparación de esquemas de control para reactores químico tipo CSTR. (v. 3.-1. Ciencia e Ingeniería, Productor) Recuperado el 25 de 06 de 2024, de redalyc:
<https://www.redalyc.org/journal/5075/507557606009/html/>

[12] Zolotas, Argyrios. Chaudhuri, B. Jaimoukha, I.M. Korba, P.. (2007). A Study on LQG/LTR Control for Damping Inter-Area Oscillations in Power Systems. Control Systems Technology, IEEE Transactions on. 15. 151 - 160. 10.1109/TCST.2006.883232.

