***4. Genera gráficos que permitan visualizar las dos leyes de control diseñados (PID ajustado manualmente y PID optimizado), evaluando el comportamiento del sistema en términos de tiempo de estabilización, sobre impulso y robustez ante perturbaciones.***

Generamos el siguiente código en Python para comparar el desempeño del PID con ajuste manual y con un ajusta automático de la pregunta 3.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Fig. 6. Comparación de control ajustado manualmente y por medio de algoritmos genéticos.

En la gráfica se muestran dos resultados de controladores PID: uno ajustado con **algoritmos genéticos** (línea azul) y otro ajustado de forma **manual** (línea naranja). Estas son las comparaciones clave entre ambos:

* **Respuesta inicial (Rise Time)**
* PID ajustado con algoritmos genéticos (azul): Tiene un tiempo de respuesta más rápido, ya que alcanza el setpoint (referencia) más pronto que el PID manual.
* PID ajustado manualmente (naranja): Es ligeramente más lento para alcanzar el setpoint.
* **Sobre impulso (Overshoot)**
* PID ajustado con algoritmos genéticos: Muestra un sobreimpulso menor o prácticamente inexistente, lo que indica un comportamiento más controlado.
* PID ajustado manualmente: Presenta un sobreimpulso significativo al inicio (se eleva por encima del setpoint) antes de estabilizarse.
* **Estabilización (Settling Time)**
* PID ajustado con algoritmos genéticos: La salida se estabiliza más rápidamente alrededor del setpoint.
* PID ajustado manualmente: Tarda más en estabilizarse debido a las oscilaciones posteriores al sobreimpulso inicial.
* **Oscilaciones**
* PID ajustado con algoritmos genéticos: Tiene menos oscilaciones alrededor del setpoint, lo que resulta en una respuesta más suave.
* PID ajustado manualmente: Hay oscilaciones evidentes alrededor del setpoint antes de estabilizarse.
* **Precisión**
* PID ajustado con algoritmos genéticos: La salida converge con mayor precisión al valor del setpoint, con un error más pequeño en estado estable.
* PID ajustado manualmente: Aunque se estabiliza, parece tener pequeñas desviaciones antes de converger.
* **Robustez ante perturbaciones**
* PID ajustado con algoritmos genéticos: Se comportará mejor frente a perturbaciones, reaccionando de forma más controlada y recuperándose más rápido con menor error transitorio.
* PID ajustado manualmente: Será más sensible a perturbaciones, presentando oscilaciones más grandes y una recuperación más lenta, lo que puede comprometer el rendimiento del sistema.

1. ***¿Qué tan sensible es el sistema con el controlador PID (manual u optimizado) ante variaciones en las condiciones iniciales, como un ángulo mayor del péndulo o una posición inicial desplazada del carro?***

* ***Comportamiento del PID ajustado manualmente:***
* **Ángulo mayor del péndulo:**
* **Respuesta típica:**

Este controlador, al tener parámetros no optimizados, puede resultar en mayores oscilaciones y un sobre impulso más pronunciado. Si el ángulo inicial es muy grande, el controlador podría llegar a un límite donde no logra estabilizar el sistema debido a la insuficiente acción de control.

* **Riesgo:** Si las oscilaciones no están bien amortiguadas, el sistema puede entrar en un estado inestable, especialmente si la planta tiene no linealidades significativas.
* **Posición inicial desplazada del carro:**
* **Respuesta típica:**

Un desplazamiento inicial del carro hará que el controlador trate de compensar, pero las oscilaciones observadas en la gráfica original indican que el ajuste manual podría sobre compensar, aumentando el tiempo de estabilización.

* **Riesgo:** La recuperación al setpoint será más lenta y el error transitorio más elevado.
* ***Comportamiento del PID optimizado (algoritmos genéticos):***
* **Ángulo mayor del péndulo:**
* **Respuesta típica:**

Este controlador, al estar optimizado, tenderá a reaccionar de forma más suave y controlada a ángulos iniciales más grandes. Su acción derivativa contribuirá a amortiguar las oscilaciones, y la acción proporcional y la integral minimizarán el error.

Sin embargo, si el ángulo inicial supera un rango lineal razonable, la planta puede comportarse de forma no lineal, limitando la eficacia del PID.

* **Posición inicial desplazada del carro:**
* **Respuesta típica:**

La respuesta será más eficiente en términos de tiempo de estabilización y menor sobre impulso. El ajuste optimizado del controlador permite una mejor adaptación al desplazamiento inicial, rechazando perturbaciones con mayor rapidez.

1. ***Después de la optimización, ¿Qué cambios observas en la curva de error del sistema?***

* ***Disminución del error transitorio:***
  + ***Antes de la optimización, el error transitorio es más alto debido a un sobre impulso significativo y a oscilaciones prolongadas antes de estabilizarse.***
  + ***Después de la optimización, el error transitorio disminuye considerablemente, ya que el sistema responde de manera más rápida y controlada al setpoint. Esto se traduce en un tiempo de respuesta más corto y oscilaciones más pequeñas.***
* ***Eliminación o reducción del error estacionario:***
  + ***Con el PID ajustado manualmente, puede haber un error estacionario si el término integral (Ki​) no es suficientemente alto o está mal ajustado.***
  + ***Con la optimización, el error estacionario se elimina o reduce a valores insignificantes debido a un balance más preciso entre los términos proporcional, integral y derivativo.***

1. ***¿Qué diferencias importantes se identifican en el comportamiento del sistema con el controlador optimizado respecto a los ajustes manuales?***

| **Aspecto** | **PID Manual** | **PID Optimizado** |
| --- | --- | --- |
| **Estabilidad inicial** | Menor estabilidad, mayores oscilaciones. | Mayor estabilidad, respuesta más suave. |
| **Overshoot** | Más elevado. | Reducido o casi nulo. |
| **Tiempo de estabilización** | Mayor. | Menor, estabilización rápida. |
| **Rechazo de perturbaciones** | Más lento y con mayores oscilaciones. | Rápido y eficiente. |
| **Robustez** | Sensible a cambios iniciales. | Más robusto y adaptable. |
| **Error estacionario** | Posible error persistente. | Error mínimo o eliminado. |

Cabe resaltar que, a pesar de estos valores calculados con algoritmos genéticos, es posible hacer correcciones manuales a partir de estos datos para ajustar cierto comportamiento.

En resumen, un controlador optimizado proporciona un desempeño más preciso, estable y rápido, mientras que los ajustes manuales pueden ofrecer un control menos eficiente, con mayor riesgo de inestabilidad y error residual.