



# Tecnológico de Monterrey

## Robotics Control Lab 4.1

### Fundamentación Robótica

*Grupo 1o2*

### Equipo g02

Nombre	Matrícula
Fabricio Banda Hernandez	A00839916
Manuel Ferro Sánchez	A00836182
Alexandro Kurt Cardenas Perez	A01385387
Fernando Proal Sifuentes	A01385446
Zacbe Ortega	

**Fecha de entrega:**

16 de febrero 2026

**Repositorio:** <https://github.com/FabriBanda/Robotics-Control-Lab-4.1>

## Familia P

Para esto primero seteamos los valores de Ki y Kd a 0

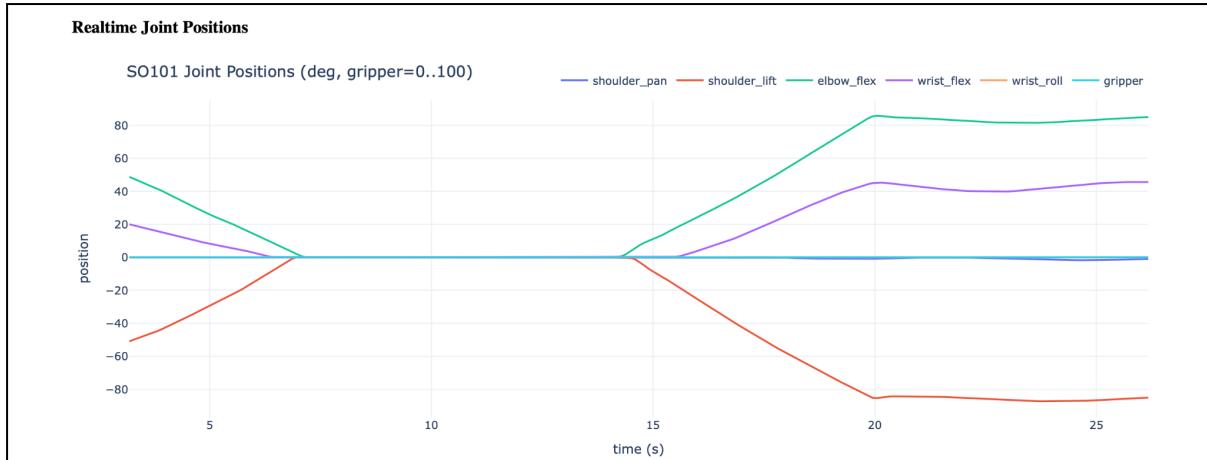
```
def build_default_pid(joint_names=DEFAULT_JOINTS) -> JointPID:
    # Start with zeros so students explicitly tune.
    gains = {
        "shoulder_pan": PIDGains(kp=55.0, ki=0.0, kd=0.0, i_limit=2.0, tau_limit=8.0),
        "shoulder_lift": PIDGains(kp=30.0, ki=0.0, kd=0.0, i_limit=2.0, tau_limit=18.0),
        "elbow_flex": PIDGains(kp=25.0, ki=0.0, kd=0.0, i_limit=2.0, tau_limit=15.0),
        "wrist_flex": PIDGains(kp=15.0, ki=0.0, kd=0.0, i_limit=2.0, tau_limit=6.0),
        "wrist_roll": PIDGains(kp=10.0, ki=0.0, kd=0.0, i_limit=2.0, tau_limit=3.0),
    }
    for jn in joint_names:
        if jn not in gains:
            gains[jn] = PIDGains(kp=25.0, ki=0.3, kd=1.0, i_limit=2.0, tau_limit=6.0)
    return JointPID(joint_names, gains)
```

Tomaremos esto como nuestro Kp base con estas ganancias:

Se anuló la acción integral y derivativa ( $Ki=0$ ,  $Kd=0$ ) para aislar el efecto proporcional. Se ejecutó la trayectoria estándar (start→zero→hold→start→hold) bajo perturbaciones activas. Se evaluaron cinco combinaciones variando Kp manteniendo el mismo ratio entre articulaciones.

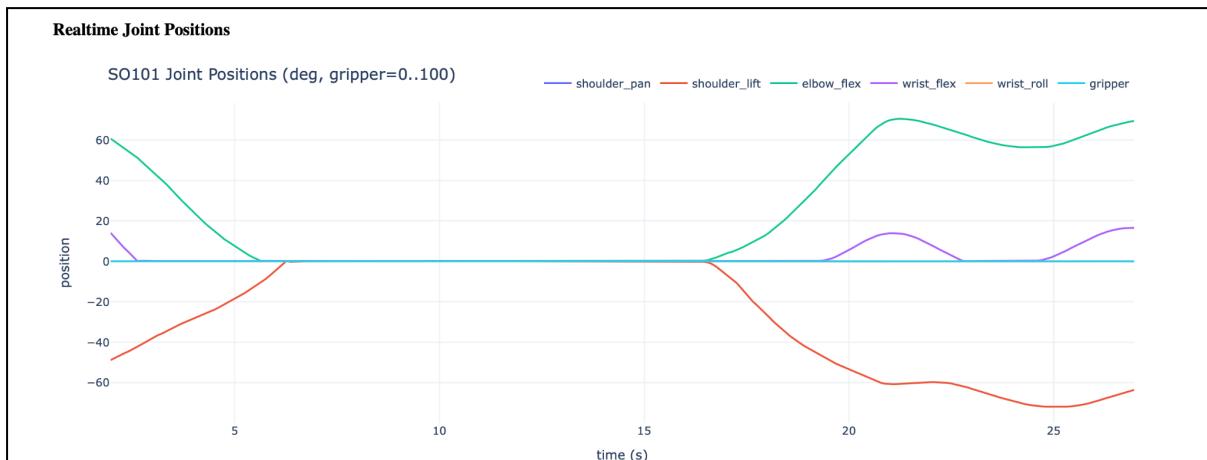
## P0 BASE

Parts	Gains ( Kp )
shoulder_pan	<b>55.0</b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>
elbow_flex	<b>25.0</b>
wrist_flex	<b>15.0</b>
wrist_roll	<b>10.0</b>



### P1 ( KB \* 0.25 )

Parts	Gains ( Kp )
shoulder_pan	$55.0 * 0.25 = 13.75$
shoulder_lift	$30.0 * 0.25 = 7.5$
elbow_flex	$25.0 * 0.25 = 6.25$
wrist_flex	$15.0 * 0.25 = 3.75$
wrist_roll	$10.0 * 0.25 = 2.5$

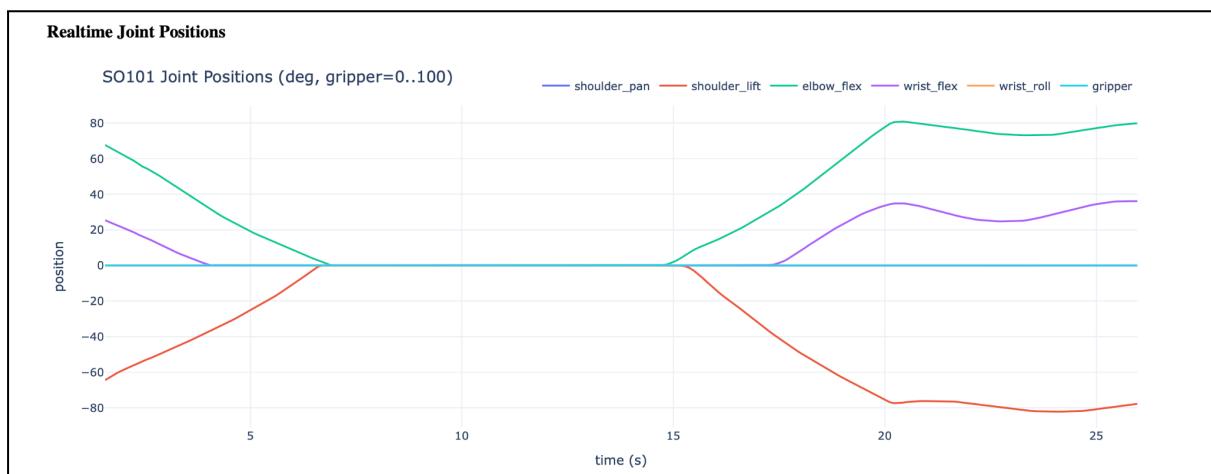


El movimiento es lento y suave debido al bajo valor de Kp. No se observa un sobrepaso grande pero sí pequeñas oscilaciones causadas por las perturbaciones activas. Durante las

fases de *hold*, el robot no regresa exactamente al valor deseado, lo que indica la presencia de error en estado estacionario. Esto confirma que un control proporcional con ganancia baja es estable, pero tiene poca rigidez y baja capacidad de rechazo ante disturbios.

## P2 ( K<sub>B</sub> \* 0.5 )

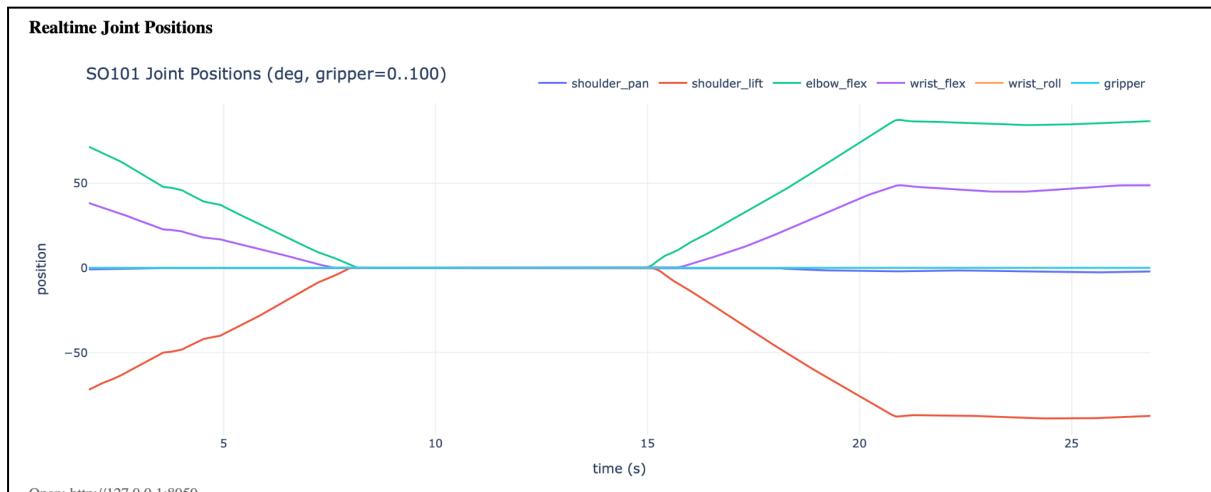
Parts	Gains ( K <sub>P</sub> )
shoulder_pan	55.0 * 0.5 = <b>27.5</b>
shoulder_lift	30.0 * 0.5 = <b>15</b>
elbow_flex	25.0 * 0.5 = <b>12.5</b>
wrist_flex	15.0 * 0.5 = <b>7.5</b>
wrist_roll	10.0 * 0.5 = <b>5</b>



Al aumentar K<sub>P</sub> respecto al caso anterior, el robot responde más rápido y alcanza la referencia en menor tiempo. Se observa un ligero sobrepaso en algunas articulaciones durante el regreso, así como pequeñas oscilaciones antes de estabilizarse. El error en estado estacionario sigue presente durante las fases de *hold*, ya que no hay acción integral. En general, el sistema muestra mayor rigidez y mejor rechazo a perturbaciones que con K<sub>P</sub> al 25%, manteniéndose estable.

### P3 ( KB \* 1.50 )

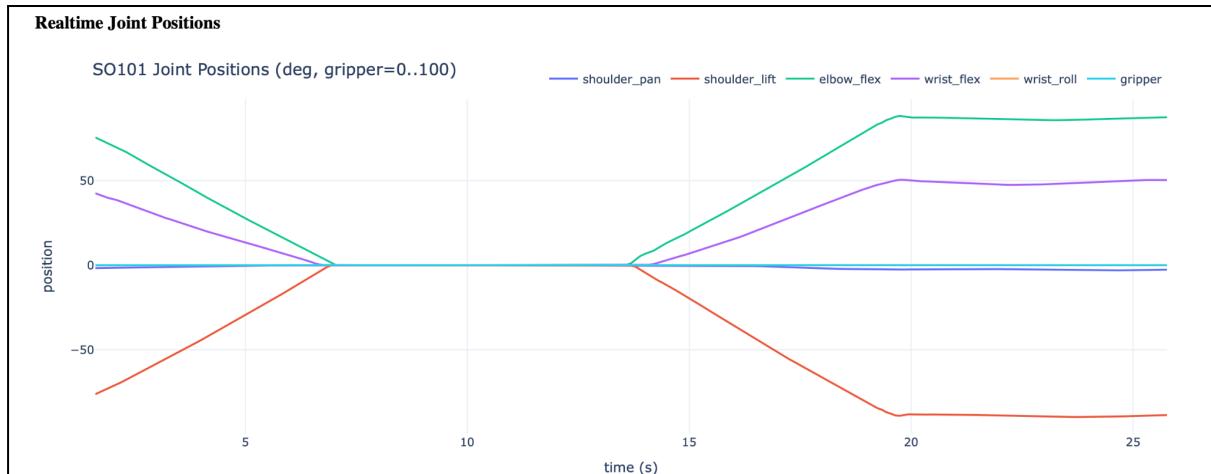
Parts	Gains ( Kp )
shoulder_pan	$55.0 * 1.5 = 82.5$
shoulder_lift	$30.0 * 1.5 = 45$
elbow_flex	$25.0 * 1.5 = 37.5$
wrist_flex	$15.0 * 1.5 = 22.5$
wrist_roll	$10.0 * 1.5 = 15$



Al aumentar la ganancia proporcional, el robot responde más rápido y con mayor rigidez. Se observa un sobreceso más evidente al llegar a la referencia, especialmente durante el regreso a la posición inicial. También aparecen pequeñas oscilaciones antes de estabilizarse, debido a la ausencia de amortiguamiento derivativo. Aunque el sistema se mantiene estable, el comportamiento es más agresivo y sensible a perturbaciones que en los casos con Kp menor.

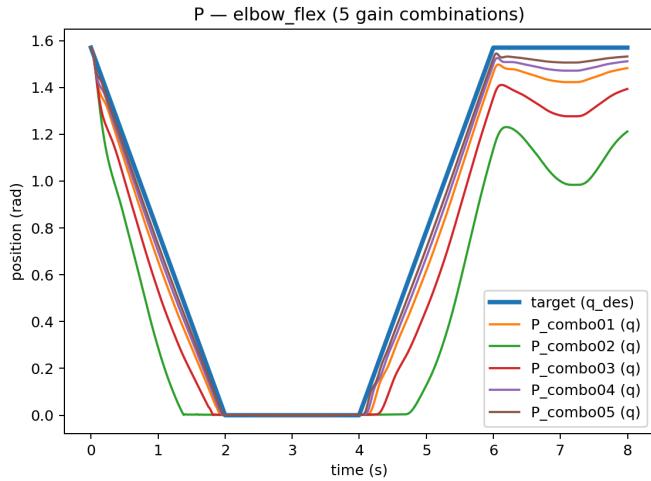
#### P4 ( KB \* 2 )

Parts	Gains ( Kp )
shoulder_pan	$55.0 * 2 = 110$
shoulder_lift	$30.0 * 2 = 60$
elbow_flex	$25.0 * 2 = 50$
wrist_flex	$15.0 * 2 = 30$
wrist_roll	$10.0 * 2 = 20$

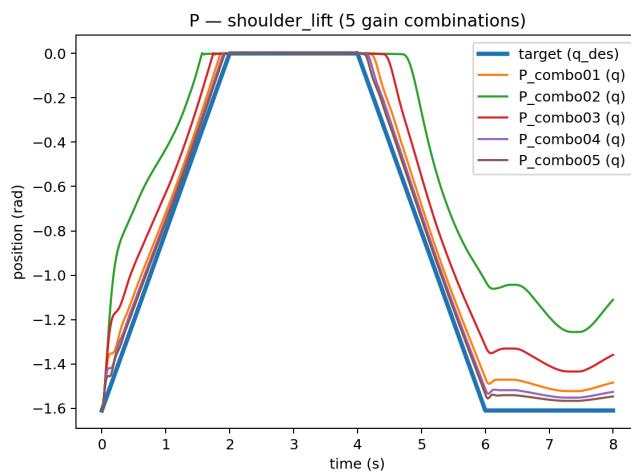


Con un valor alto de Kp, el sistema responde más rápido y con mayor rigidez. Se observa un sobrepaso más marcado al alcanzar la referencia y ligeras oscilaciones antes de estabilizarse. Aunque el sistema permanece estable, el comportamiento es más agresivo y sensible a perturbaciones. El error en estado estacionario sigue presente durante las fases de *hold*, ya que no existe acción integral para eliminarlo.

Al aumentar Kp, el sistema incrementa su rigidez y velocidad de respuesta. Sin embargo, también aumenta el sobrepaso y la tendencia a oscilar debido a la ausencia de amortiguamiento derivativo. En todos los casos se mantiene error en estado estacionario bajo perturbaciones constantes, lo cual confirma que la acción proporcional por sí sola no elimina el sesgo permanente



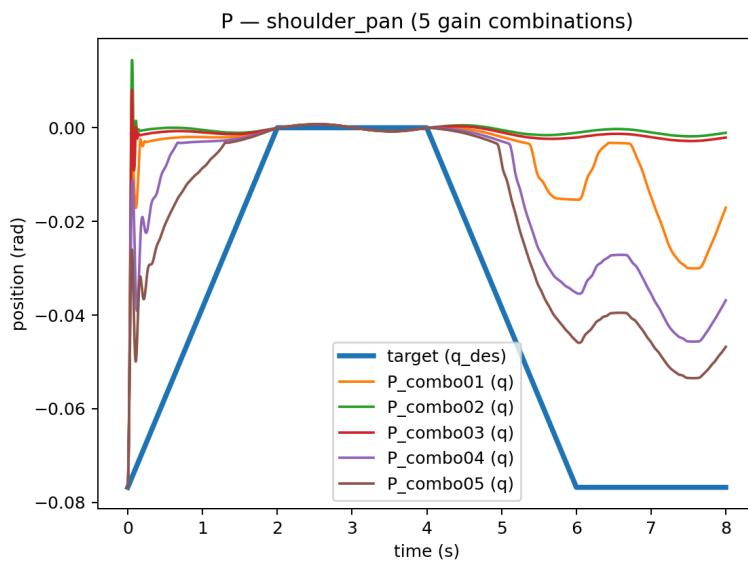
A medida que aumenta  $K_p$  (combo01 a combo05), el sistema responde más rápido. Con ganancias bajas (combo02) la respuesta es lenta y presenta error significativo al regresar al setpoint final, con ganancias medias, mejoramos el seguimiento pero podemos ver overshoot moderado, y finalmente, con ganancias altas (combo04 y 05), la velocidad mejora notablemente y el error disminuye, pero aparece oscilación ligera antes de estabilizarse. Como interpretación física, el término proporcional incrementa la rigidez virtual del sistema, a mayor  $k_p$ , hay menor error pero mayor tendencia a oscilación.



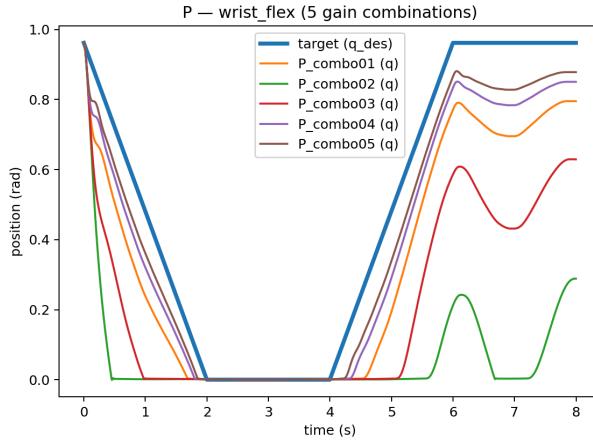
La gráfica muestra el comportamiento de la articulación shoulder\_lift utilizando un control proporcional puro, donde se anularon las ganancias integrales y derivativas ( $K_i = 0, K_d = 0$ ) para analizar únicamente el efecto de la ganancia proporcional. En la figura se compara la

trayectoria deseada de cinco combinaciones distintas de  $K_p$ , manteniendo el mismo ratio entre articulaciones.

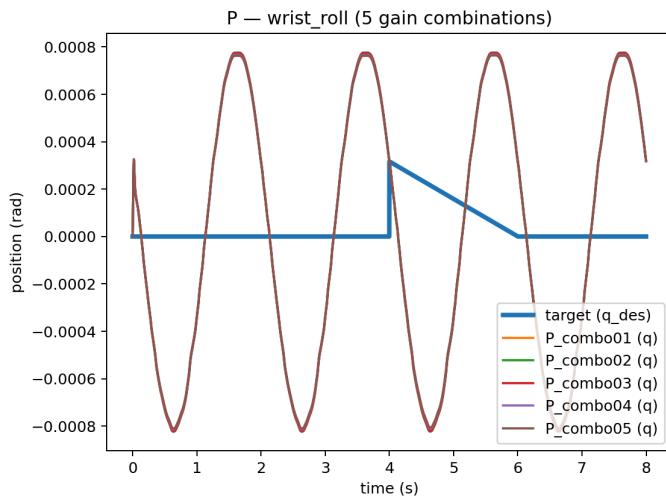
Se observa que cuando el valor de  $K_p$  es bajo, la respuesta del sistema es mas lenta y suave, con una mejor rigidez y mayor error en estado estacionario durante las fases de mantenimiento de posición. A medida que se incrementa la ganancia proporcional, el sistema alcanza la referencia en menor tiempo y mayor firmeza, reduciendo el retraso respecto a la trayectoria deseada. Sin embargo, este incremento también provoca un mayor sobrepaso al llegar a la referencia y pequeñas oscilaciones antes de estabilizarse, especialmente en el regreso a la posición inicial. En todos los casos persiste un error en estado estacionario, lo que confirma que el control proporcional no elimina el sesgo permanentemente. En general, al aumentar  $K_p$  se obtiene mayor rapidez y rigidez, pero también más sobrepaso y sensibilidad a perturbaciones.



Las diferencias entre combos son más visibles en el tramo final, las ganancias altas muestran desviaciones mayores respecto al objetivo. El joint parece más sensible a perturbaciones, el control P no es suficiente para garantizar seguimiento preciso en presencia de disturbios. El control proporcional no elimina el error residual en este eje y muestra sensibilidad a la dinámica interna.



La gráfica muestra el comportamiento de la articulación `wrist_flex` bajo control proporcional puro para cinco combinaciones de  $K_p$ . Con ganancias bajas, la respuesta es más lenta y la articulación no alcanza completamente la referencia, presentando un error notable durante las fases de mantenimiento. A medida que se incrementa  $K_p$ , el sistema responde más rápido y sigue mejor la trayectoria deseada; sin embargo, también se observa mayor sobrepuerto y pequeñas oscilaciones antes de estabilizarse. En todos los casos permanece un error en estado estacionario, lo que confirma que el control proporcional por sí solo no elimina el sesgo permanente bajo perturbaciones.



La articulación muestra con mayor claridad las limitaciones del control proporcional. En todas las combinaciones de ganancia se observa un comportamiento oscilatorio persistente, similar a una señal sinusoidal. El incremento de  $K_p$  no mejora significativamente el seguimiento ni elimina las oscilaciones. Esto indica que el sistema es altamente sensible y carece del amortiguamiento necesario para estabilizarse únicamente con acción proporcional.

## Familia PI

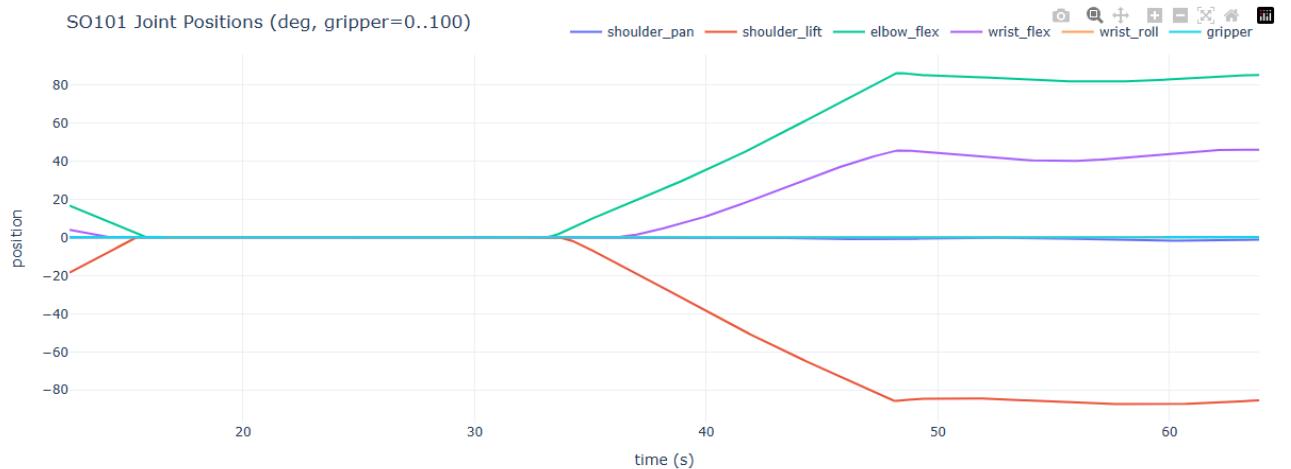
Para esto primero seteamos los valores de Kd a 0

```
def build_default_pid(joint_names=DEFAULT_JOINTS) -> JointPID:
    # Start with zeros so students explicitly tune.
    gains = {
        "shoulder_pan": PIDGains(kp=55.0, ki=0.9, kd=0, i_limit=2.0, tau_limit=8.0),
        "shoulder_lift": PIDGains(kp=30.0, ki=0.7, kd=0, i_limit=2.0, tau_limit=18.0),
        "elbow_flex": PIDGains(kp=25.0, ki=0.5, kd=0, i_limit=2.0, tau_limit=15.0),
        "wrist_flex": PIDGains(kp=15.0, ki=0.3, kd=0, i_limit=2.0, tau_limit=6.0),
        "wrist_roll": PIDGains(kp=10.0, ki=0.1, kd=0, i_limit=2.0, tau_limit=3.0),
    }
    for jn in joint_names:
        if jn not in gains:
            gains[jn] = PIDGains(kp=25.0, ki=0.3, kd=1.0, i_limit=2.0, tau_limit=6.0)
    return JointPID(joint_names, gains)
```

## PI0 BASE

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Ki )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b>0.9</b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b>0.7</b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b>0.5</b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b>0.3</b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b>0.1</b>

Realtime Joint Positions

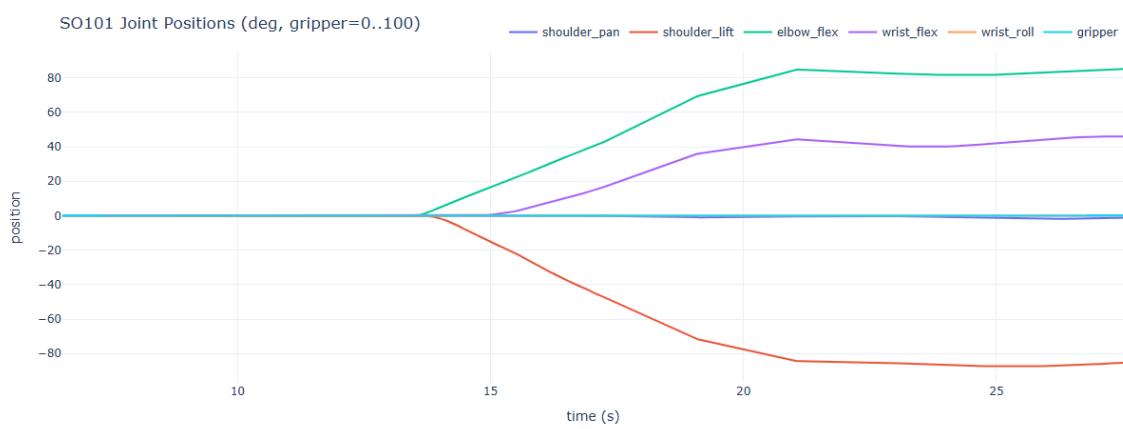


Con la acción integral activa, el robot logra eliminar el error en estado estacionario durante las fases de hold. Se observa una respuesta más precisa al mantener la posición deseada incluso bajo perturbaciones constantes. Sin embargo, la acción integral introduce una respuesta ligeramente más lenta y puede generar pequeñas oscilaciones iniciales mientras el término integral se ajusta.

En general, el sistema muestra buena precisión y estabilidad, con mejor rechazo a perturbaciones que el control proporcional puro.

### PI1 ( $(K_i) * 0.25$ )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( $K_i$ )
shoulder_pan	55.0	$0.9 * 0.25 = \mathbf{0.225}$
shoulder_lift	30.0	$0.7 * 0.25 = \mathbf{0.175}$
elbow_flex	25.0	$0.5 * 0.25 = \mathbf{0.125}$
wrist_flex	15.0	$0.3 * 0.25 = \mathbf{0.075}$
wrist_roll	10.0	$0.1 * 0.25 = \mathbf{0.025}$



En esta iteración, únicamente  $K_i$  se reduce al 25% de su valor base mientras  $K_p$  permanece constante. El sistema mantiene una velocidad de respuesta similar a la base, ya que la rigidez depende principalmente de  $K_p$ , pero la corrección del error en estado estacionario es más lenta debido al menor efecto integral. Se observa un comportamiento estable, con poco sobrepaso y sin oscilaciones marcadas, aunque el rechazo a perturbaciones es más débil y la eliminación del sesgo bajo carga constante ocurre de forma más gradual.

## PI2 ( (Kp y Ki) \* 0.5 )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Ki )
shoulder_pan	55.0	$0.9 * 0.5 = \mathbf{0.45}$
shoulder_lift	30.0	$0.7 * 0.5 = \mathbf{0.35}$
elbow_flex	25.0	$0.5 * 0.5 = \mathbf{0.25}$
wrist_flex	15.0	$0.3 * 0.5 = \mathbf{0.15}$
wrist_roll	10.0	$0.1 * 0.5 = \mathbf{0.05}$

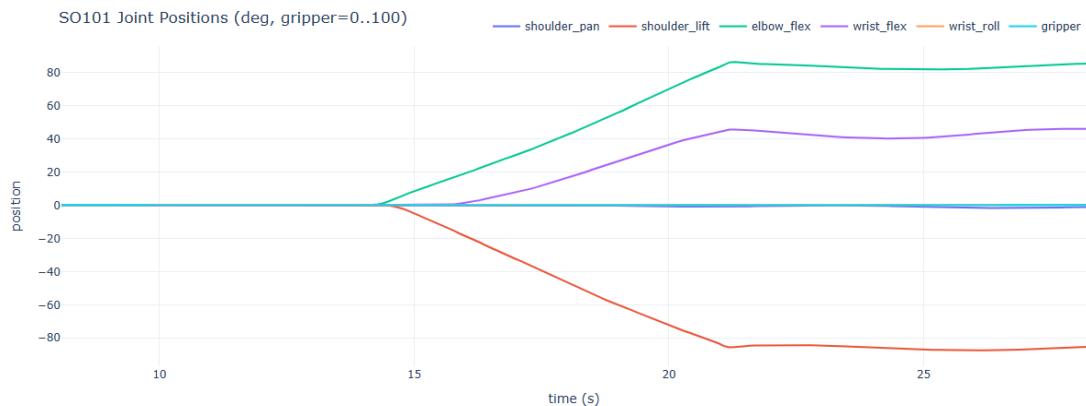


Con Ki al 50% y Kp constante, la velocidad inicial y la rigidez prácticamente no cambian respecto a la base, pero la acción integral corrige el error residual con mayor rapidez que en  $\times 0.25$ . Se puede notar un ligero ajuste adicional en la fase de mantenimiento, aunque sin oscilaciones sostenidas. El sistema conserva estabilidad y mejora el rechazo a perturbaciones en comparación con el caso anterior.

## PI3 ( (Ki) \* 1.5 )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Ki )
shoulder_pan	55.0	$0.9 * 1.5 = \mathbf{1.35}$
shoulder_lift	30.0	$0.7 * 1.5 = \mathbf{1.05}$

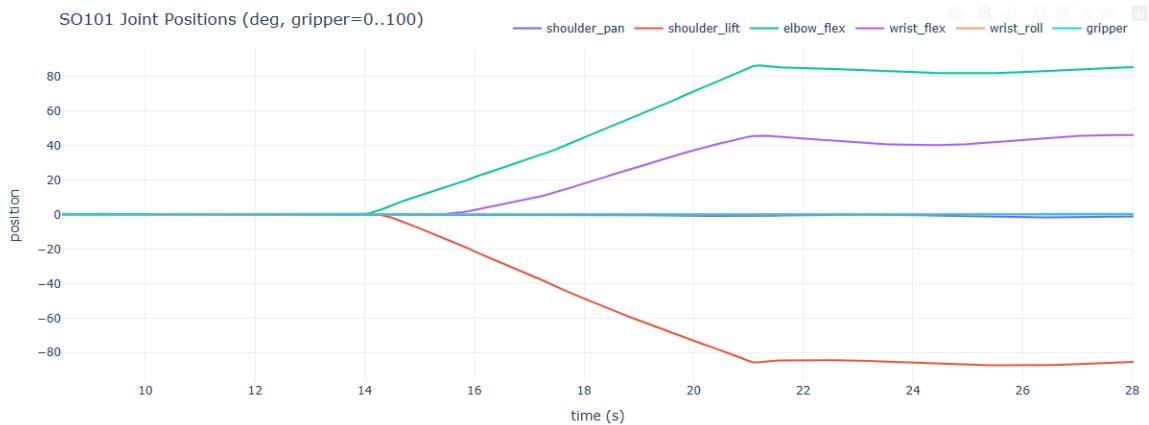
elbow_flex	25.0	$0.5 * 1.5 = \mathbf{0.75}$
wrist_flex	15.0	$0.3 * 1.5 = \mathbf{0.45}$
wrist_roll	10.0	$0.1 * 1.5 = \mathbf{0.15}$



Al incrementar Ki a 1.5 veces el valor base, la eliminación del error en estado estacionario es más rápida y firme. La llegada a la referencia sigue estando dominada por Kp, pero ahora el sistema muestra un pequeño sobrepaso adicional y un ajuste más evidente durante la fase de hold, debido al mayor peso del término integral. La respuesta es más agresiva, aunque aún estable, y con mejor compensación frente a perturbaciones constantes.

#### PI4 ( ( Ki ) \* 2 )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Ki )
shoulder_pan	55.0	$0.9 * 2 = \mathbf{1.8}$
shoulder_lift	30.0	$0.7 * 2 = \mathbf{1.4}$
elbow_flex	25.0	$0.5 * 2 = \mathbf{1}$
wrist_flex	15.0	$0.3 * 2 = \mathbf{0.6}$
wrist_roll	10.0	$0.1 * 2 = \mathbf{0.4}$



En la iteración  $PI \times 1.5$ , donde las ganancias son mayores que la base, el sistema responde con mayor rapidez y rigidez al dirigirse hacia la referencia. Las articulaciones alcanzan el objetivo en menos tiempo y se observa un sobrepaso más evidente en comparación con los casos anteriores, seguido de un ajuste amortiguado antes de estabilizarse. La acción integral elimina el error en estado estacionario de forma más rápida, manteniendo la posición con buena precisión incluso bajo perturbaciones. Sin embargo, el comportamiento es más agresivo y ligeramente más sensible, reflejando el incremento en las ganancias y la mayor influencia del término integral en la dinámica del sistema.

## Familia PD

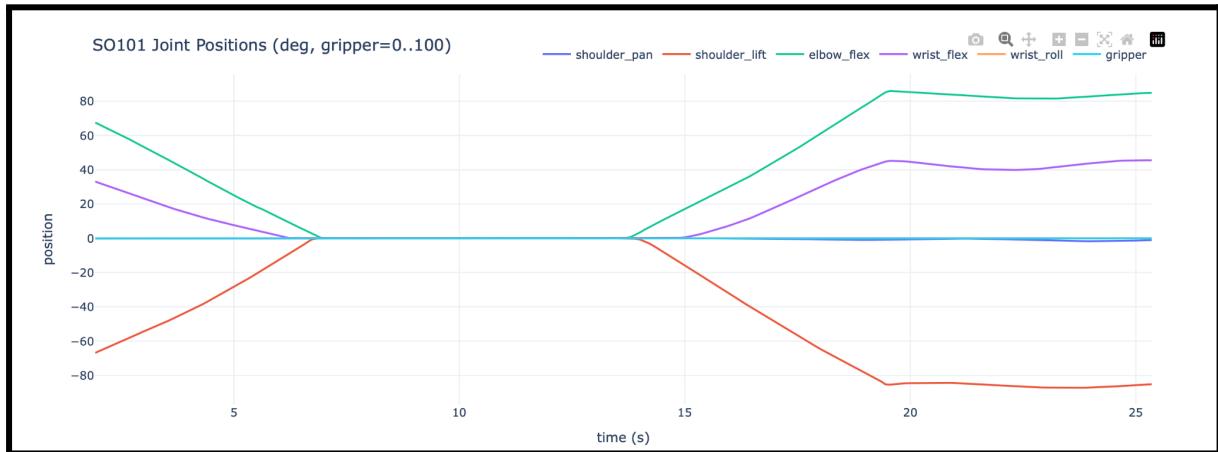
Valores base del PD ( seteamos ki a cero )

```
# Start with zeros so students explicitly tune.
gains = {
    "shoulder_pan": PIDGains(kp=55.0, ki=0.0, kd=2.0, i_limit=2.0, tau_limit=8.0),
    "shoulder_lift": PIDGains(kp=30.0, ki=0.0, kd=1.0, i_limit=2.0, tau_limit=18.0),
    "elbow_flex": PIDGains(kp=25.0, ki=0.0, kd=0.5, i_limit=2.0, tau_limit=15.0),
    "wrist_flex": PIDGains(kp=15.0, ki=0.0, kd=0.5, i_limit=2.0, tau_limit=6.0),
    "wrist_roll": PIDGains(kp=10.0, ki=0.0, kd=0.8, i_limit=2.0, tau_limit=3.0),
}
```

## PD0 ( base )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Kd )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b>2.0</b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b>1.0</b>

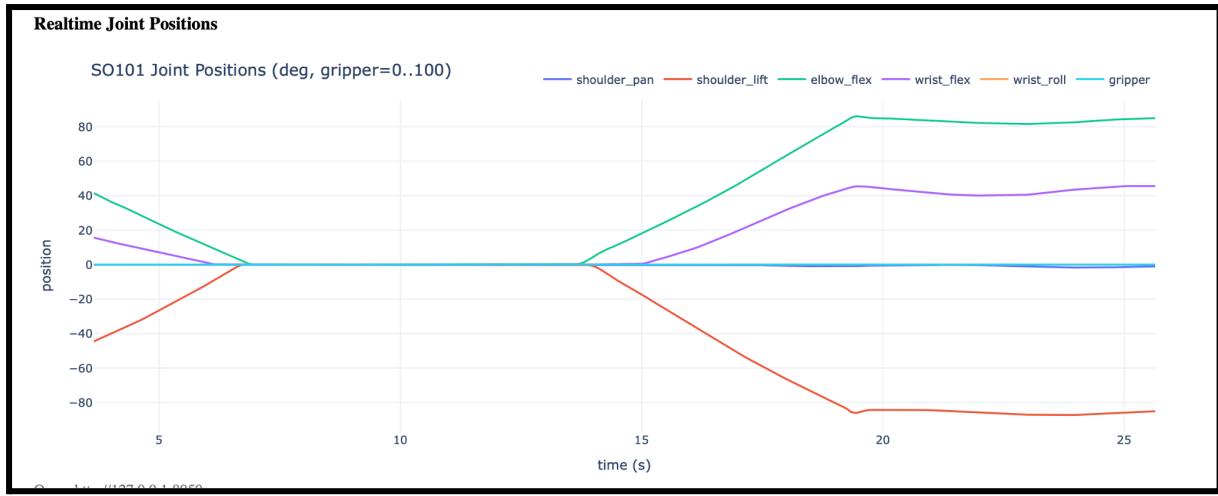
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b>0.5</b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b>0.5</b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b>0.8</b>



Con la acción derivativa activa, el sistema muestra una respuesta más controlada y con menor oscilación en comparación con el control P puro. El sobreceso se reduce y el asentamiento es más suave, ya que el término derivativo aporta amortiguamiento al movimiento. Sin embargo, durante las fases de *hold* aún se observa un pequeño error en estado estacionario, debido a la ausencia del término integral.

### PD1 ( PD base \* 0.25 )

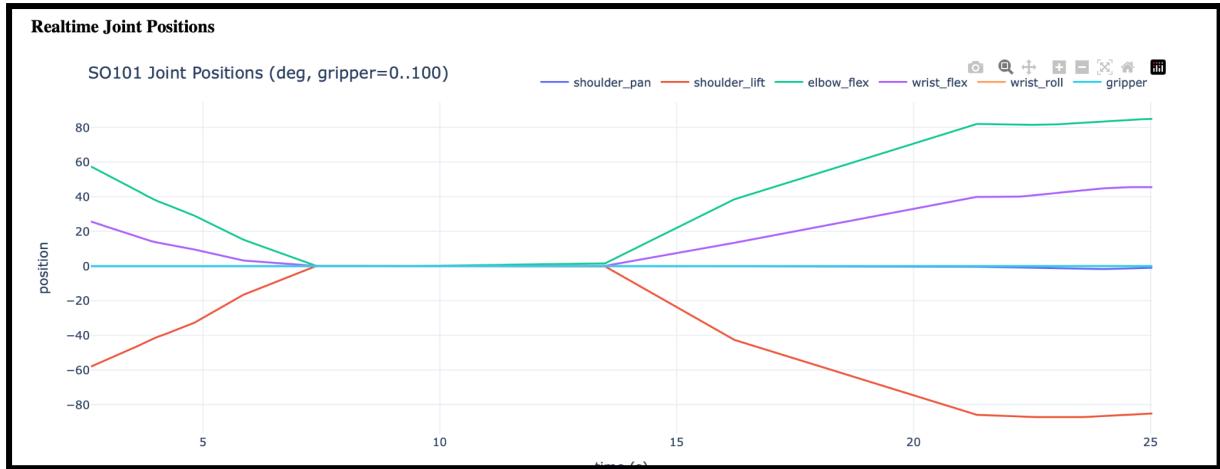
Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Kd )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	$2.0 * 0.25 = \mathbf{0.5}$
shoulder_lift	<b>30.0</b>	$1.0 * 0.25 = \mathbf{0.25}$
elbow_flex	<b>25.0</b>	$0.5 * 0.25 = \mathbf{0.125}$
wrist_flex	<b>15.0</b>	$0.5 * 0.25 = \mathbf{0.125}$
wrist_roll	<b>10.0</b>	$0.8 * 0.25 = \mathbf{0.2}$



Al incluir una pequeña acción derivativa, el sistema presenta una respuesta más amortiguada que el control P puro. El sobreceso se reduce ligeramente y las oscilaciones son menos pronunciadas, aunque aún se observa un comportamiento dinámico similar al proporcional debido al bajo valor de Kd. Durante las fases de *hold* persiste un pequeño error en estado estacionario, ya que no se incluye acción integral.

### PD2 ( PD base \* 0.5 )

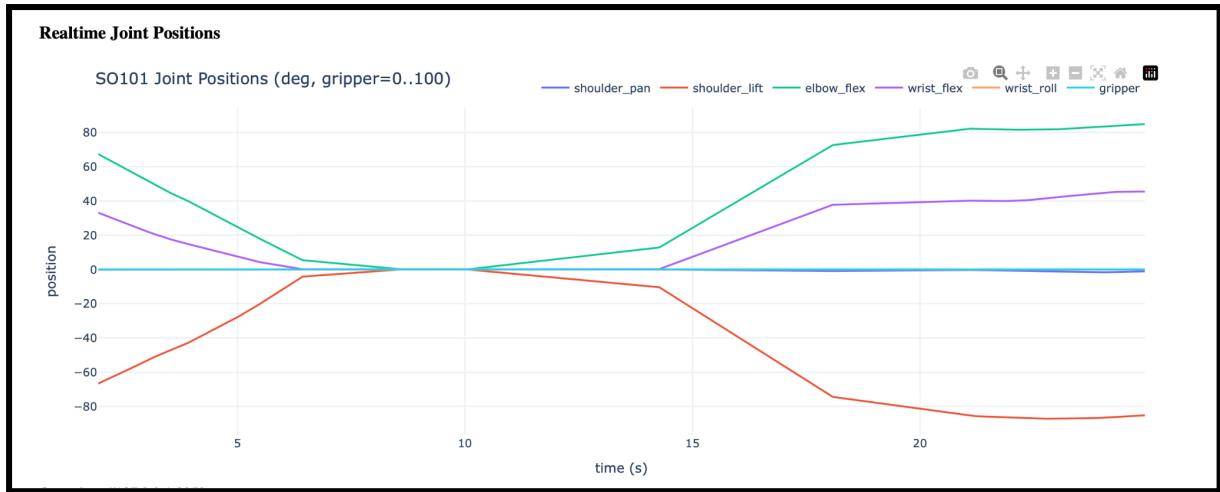
Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Kd )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	$2.0 * 0.5 = \mathbf{1}$
shoulder_lift	<b>30.0</b>	$1.0 * 0.5 = \mathbf{0.5}$
elbow_flex	<b>25.0</b>	$0.5 * 0.5 = \mathbf{0.25}$
wrist_flex	<b>15.0</b>	$0.5 * 0.5 = \mathbf{0.25}$
wrist_roll	<b>10.0</b>	$0.8 * 0.5 = \mathbf{0.4}$



Al incrementar el valor de Kd, el sistema presenta mayor amortiguamiento en comparación con  $Kd \times 0.25$ . El movimiento se observa más suave y con menor tendencia a oscilaciones durante los cambios de referencia. La transición es más controlada y estable, aunque aún se mantiene un pequeño error en estado estacionario debido a que no se incluye acción integral.

### PD3 ( PD base \* 1.5 )

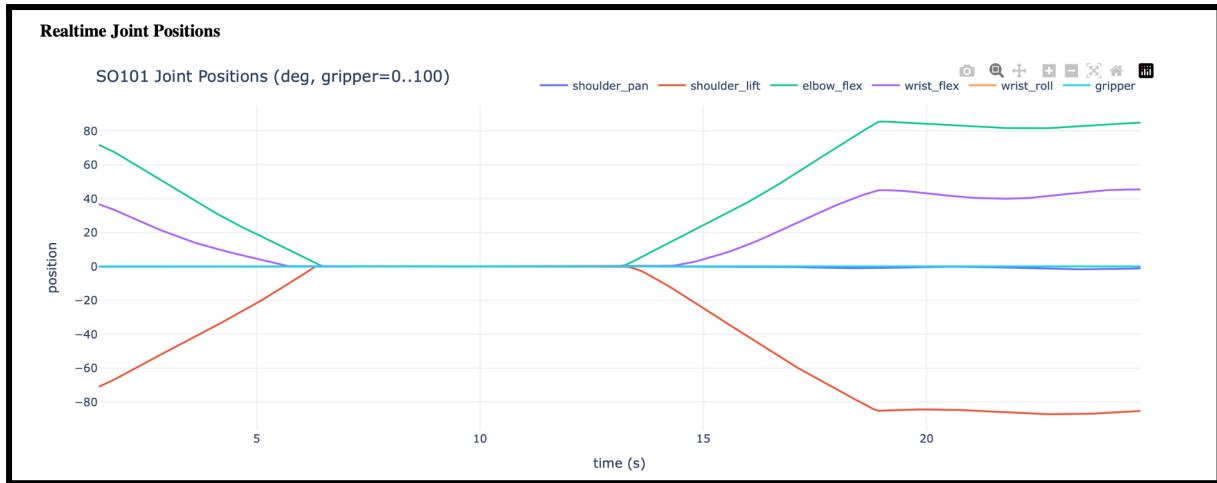
Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Kd )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	$2.0 * 1.5 = 3$
shoulder_lift	<b>30.0</b>	$1.0 * 1.5 = 1.5$
elbow_flex	<b>25.0</b>	$0.5 * 1.5 = 0.75$
wrist_flex	<b>15.0</b>	$0.5 * 1.5 = 0.75$
wrist_roll	<b>10.0</b>	$0.8 * 1.5 = 1.2$



En esta configuración se aumentó el término derivativo a 1.5 veces su valor base, manteniendo el proporcional constante y sin acción integral. Se observa que el movimiento es más amortiguado en comparación con los casos anteriores, con menor sobreceso y menos oscilaciones después del cambio de referencia. La respuesta es más estable y suave, aunque ligeramente más lenta en alcanzar el valor final. Esto confirma que el término derivativo aumenta el amortiguamiento del sistema, reduciendo vibraciones y mejorando la estabilidad bajo perturbaciones.

### PD3 ( PD base \* 2 )

Parts	Gains ( Kp )	Gains ( Kd )
shoulder_pan	<b>55.0</b>	$2.0 * 2 = 4$
shoulder_lift	<b>30.0</b>	$1.0 * 2 = 2$
elbow_flex	<b>25.0</b>	$0.5 * 2 = 1$
wrist_flex	<b>15.0</b>	$0.5 * 2 = 1$
wrist_roll	<b>10.0</b>	$0.8 * 2 = 1.6$



En esta configuración se duplicó el término derivativo respecto al valor base. Se observa que el movimiento es aún más amortiguado, con prácticamente nulo sobrepuerto y oscilaciones muy reducidas después del cambio de referencia. La respuesta es más controlada y estable frente a perturbaciones, aunque el sistema se vuelve ligeramente más lento en reaccionar. Esto muestra claramente que un mayor Kd incrementa el amortiguamiento, reduciendo vibraciones, pero puede hacer la respuesta menos agresiva.

## Conclusión

Al comparar las diferentes configuraciones de Kd, se observa que valores bajos ( $\times 0.25$  y  $\times 0.5$ ) no proporcionan suficiente amortiguamiento, permitiendo mayor sobrepuerto y ligeras oscilaciones. Al incrementar Kd a  $\times 1.5$ , el sistema muestra una respuesta más estable, con menor vibración y mejor comportamiento durante las fases de hold. Finalmente, con  $Kd \times 2$ , el movimiento es el más amortiguado y estable, aunque ligeramente más lento.

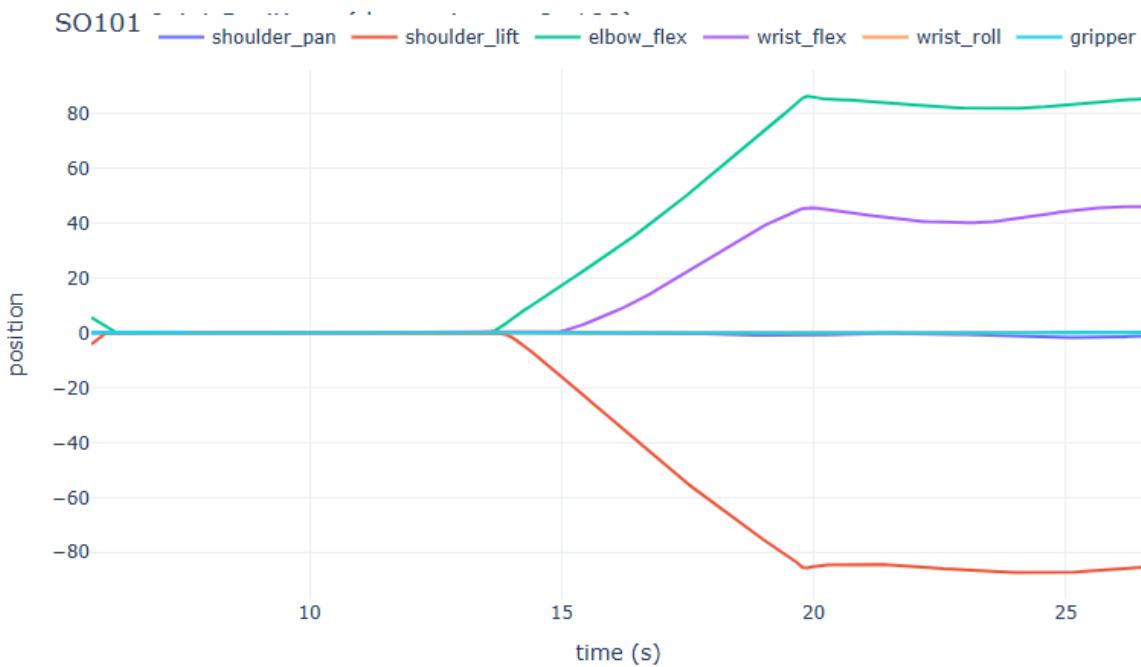
En términos de compromiso entre rapidez, estabilidad y rechazo a perturbaciones, la configuración  $Kd \times 1.5$ , resultó ser la mejor opción, ya que reduce significativamente las oscilaciones sin hacer el sistema excesivamente lento o rígido.

## Familia PID

### PID0

Parts	Gains ( Kp )	Gains (Ki)	Gains (Kd)
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b>0.9</b>	<b>2.0</b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b>0.7</b>	<b>1.0</b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.5</b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.8</b>

### Realtime Joint Positions

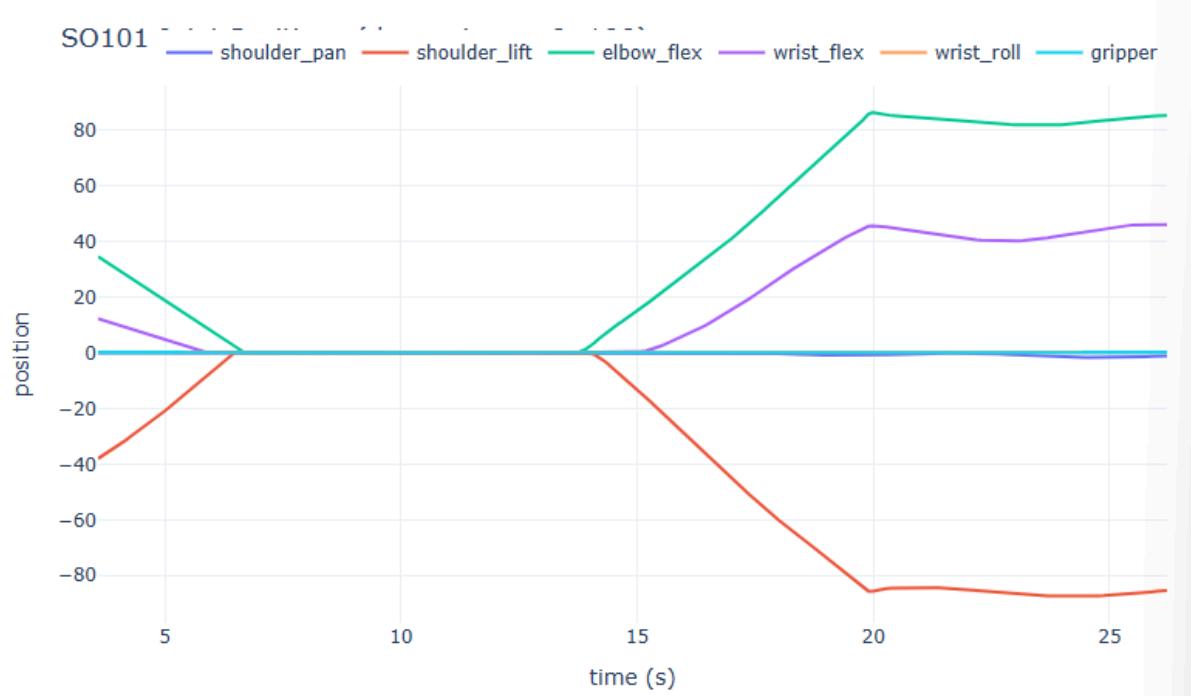


En la configuración PID base (PID0), donde Kp, Ki y Kd están activos con sus valores nominales, el sistema muestra una respuesta rápida y bien amortiguada. La llegada a la referencia es firme gracias a la acción proporcional, mientras que el término derivativo reduce el sobrepasso y amortigua las oscilaciones, evitando comportamientos agresivos o vibraciones persistentes. La acción integral elimina el error en estado estacionario durante las fases de mantenimiento, permitiendo sostener la posición con precisión incluso bajo

perturbaciones constantes. En conjunto, el comportamiento es estable, con buen compromiso entre velocidad, amortiguamiento y rechazo a disturbios, reflejando un controlador balanceado y físicamente coherente.

## PID1

Parts	Gains ( Kp )	Gains (Ki)	Gains (Kd)
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b><math>0.9 * .25 = .225</math></b>	<b><math>2.0 * .25 = 0.5</math></b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b><math>0.7 * .25 = 0.175</math></b>	<b><math>1.0 * .25 = 0.25</math></b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b><math>0.5 * .25 = 0.125</math></b>	<b><math>0.5 * .25 = .125</math></b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b><math>0.3 * .25 = 0.075</math></b>	<b><math>0.5 * .25 = .125</math></b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b><math>0.1 * .25 = 0.025</math></b>	<b><math>0.8 * .25 = .2</math></b>

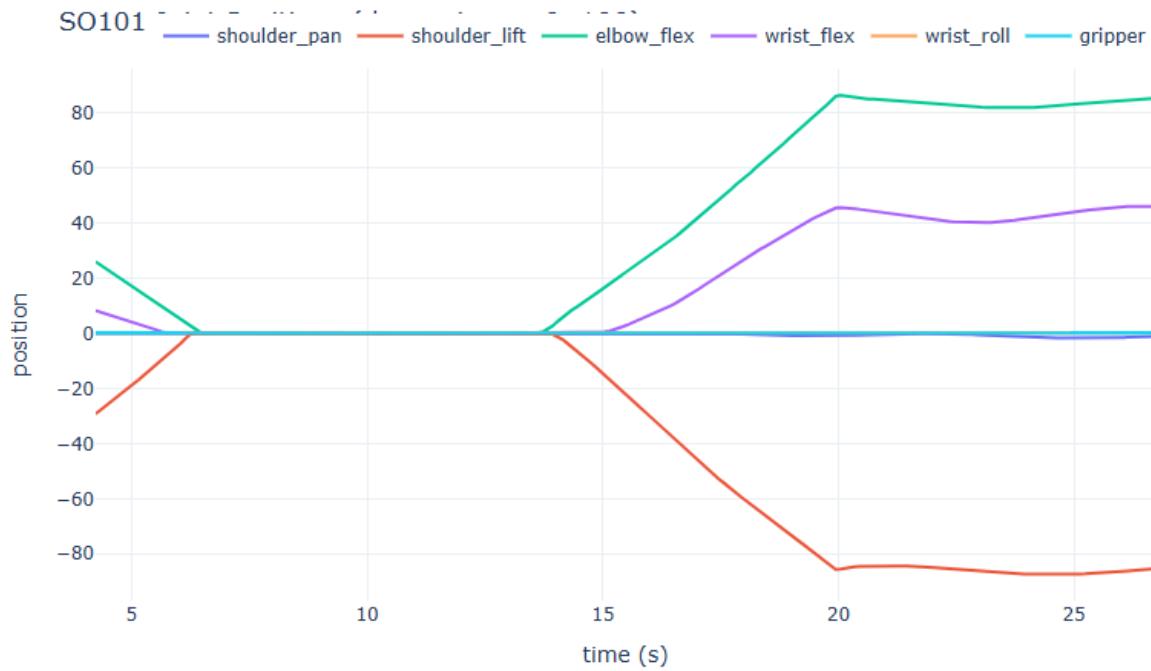


En la iteración  $\text{PID} \times 0.25$ , donde las tres ganancias se reducen al 25% del valor base, el sistema conserva el comportamiento estructural del PID pero con una respuesta más suave y menos rígida. La llegada a la referencia es más lenta en comparación con la configuración base, aunque se mantiene bien amortiguada gracias al término derivativo, evitando oscilaciones marcadas. La acción integral continúa eliminando el error en estado estacionario,

pero lo hace de forma más gradual debido al menor valor de Ki. Bajo perturbaciones, el rechazo es adecuado aunque menos firme que en el PID base, mostrando un sistema estable, controlado y con menor agresividad dinámica.

## PID2

Parts	Gains ( Kp )	Gains (Ki)	Gains (Kd)
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b><math>0.9 * .5 = 0.45</math></b>	<b><math>2.0 * .5 = 1.0</math></b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b><math>0.7 * .5 = 0.35</math></b>	<b><math>1.0 * .5 = 0.5</math></b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b><math>0.5 * .5 = 0.25</math></b>	<b><math>0.5 * .5 = 0.25</math></b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b><math>0.3 * .5 = 0.13</math></b>	<b><math>0.5 * .5 = 0.25</math></b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b><math>0.1 * .5 = 0.05</math></b>	<b><math>0.8 * .5 = 0.4</math></b>



En la iteración  $\text{PID} \times 0.5$ , donde las ganancias se reducen al 50% del valor base, el sistema muestra una respuesta más rápida y firme que en  $\times 0.25$ , manteniendo un buen nivel de amortiguamiento gracias al término derivativo. La llegada a la referencia es más dinámica, con un sobreceso leve pero rápidamente controlado, y sin oscilaciones sostenidas. La acción

integral elimina el error en estado estacionario de manera eficiente, permitiendo sostener la posición con precisión durante las fases de mantenimiento. Bajo perturbaciones, el rechazo es sólido y el comportamiento general se percibe estable y balanceado, representando un buen compromiso entre rapidez, amortiguamiento y precisión.

## PID3

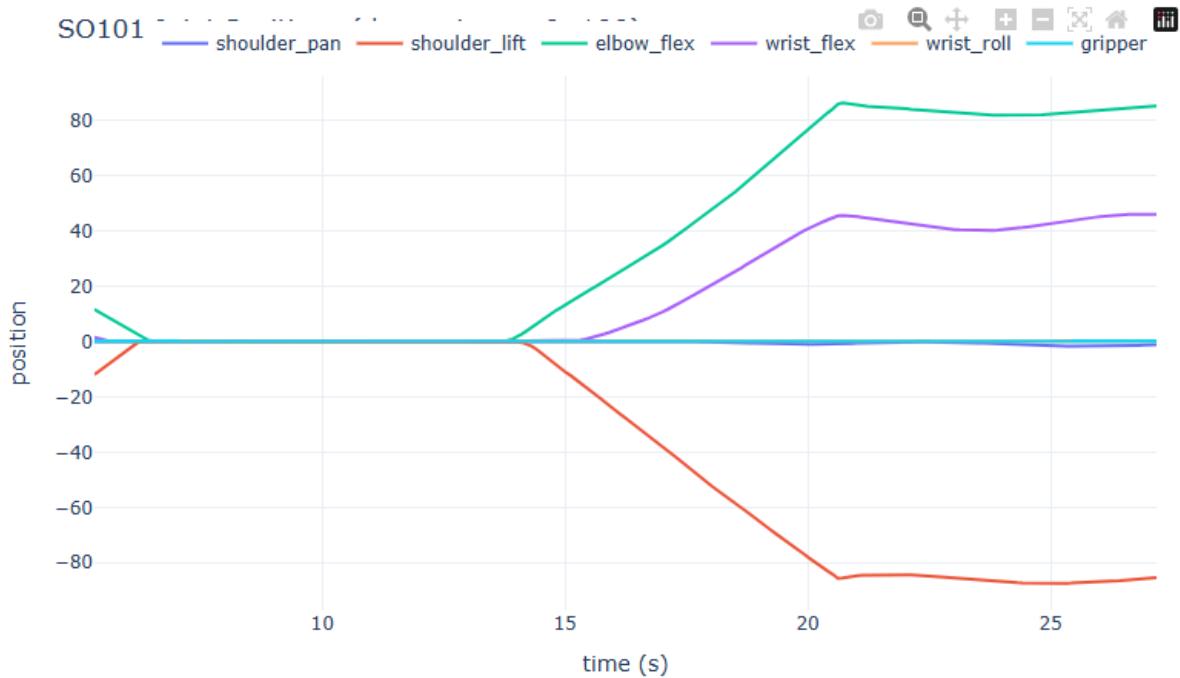
Parts	Gains ( Kp )	Gains (Ki)	Gains (Kd)
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b><math>0.9 * 1.5 = 1.35</math></b>	<b><math>2.0 * 1.5 = 3.0</math></b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b><math>0.7 * 1.5 = 1.05</math></b>	<b><math>1.0 * 1.5 = 1.5</math></b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b><math>0.5 * 1.5 = 0.75</math></b>	<b><math>0.5 * 1.5 = 0.75</math></b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b><math>0.3 * 1.5 = .45</math></b>	<b><math>0.5 * 1.5 = 0.75</math></b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b><math>0.1 * 1.5 = 0.15</math></b>	<b><math>0.8 * 1.5 = 1.2</math></b>



En la iteración  $\text{PID} \times 1.5$ , donde las ganancias se incrementan al 150% del valor base, el sistema responde con mayor rapidez y rigidez al dirigirse hacia la referencia. La acción proporcional acelera la llegada al objetivo, mientras que el término derivativo mantiene el comportamiento bien amortiguado, evitando oscilaciones persistentes. Se aprecia un ligero sobrepasso más marcado que en las configuraciones anteriores, pero rápidamente controlado. La acción integral elimina el error en estado estacionario de forma más firme, sosteniendo la posición con precisión durante las fases de mantenimiento incluso bajo perturbaciones. En general, el comportamiento es más agresivo pero permanece estable y con buen compromiso entre velocidad, amortiguamiento y exactitud.

## PID4

Parts	Gains ( Kp )	Gains (Ki)	Gains (Kd)
shoulder_pan	<b>55.0</b>	<b>0.9 * 2 = 1.8</b>	<b>2.0 * 2 = 4.0</b>
shoulder_lift	<b>30.0</b>	<b>0.7 * 2 = 1.4</b>	<b>1.0 * 2 = 2.0</b>
elbow_flex	<b>25.0</b>	<b>0.5 * 2 = 1.0</b>	<b>0.5 * 2 = 1.0</b>
wrist_flex	<b>15.0</b>	<b>0.3 * 2 = 0.6</b>	<b>0.5 * 2 = 1.0</b>
wrist_roll	<b>10.0</b>	<b>0.1 * 2 = 0.2</b>	<b>0.8 * 2 = 1.6</b>



En la iteración PID  $\times 2$ , donde las ganancias se duplican respecto al valor base, el sistema presenta una respuesta aún más rápida y rígida al acercarse a la referencia. La acción proporcional acelera significativamente el movimiento, mientras que el término derivativo continúa amortiguando la dinámica, evitando oscilaciones sostenidas a pesar del aumento de agresividad. Se observa un sobreceso ligeramente mayor y un ajuste más evidente durante la fase de estabilización, producto del incremento simultáneo de Ki y Kd. La acción integral elimina el error en estado estacionario con rapidez, manteniendo la posición bajo perturbaciones; sin embargo, el sistema se vuelve más sensible y cercano a un comportamiento más exigente dinámicamente, aunque todavía estable.