

# Uso de herramienta computacional para el análisis de la compensación en adelanto por el Lugar Geométrico de las Raíces.

## Use of computational tool for the analysis of advance compensation by the Geometric Root Locus.

Luis Tomás García Andrade\* (1).  
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.  
[luis.gal@tuxtla.tecnm.mx](mailto:luis.gal@tuxtla.tecnm.mx).

Vicente León Orozco (2). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,  
[vicente.lo@tuxtla.tecnm.mx](mailto:vicente.lo@tuxtla.tecnm.mx).

Jorge Díaz Hernández (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,  
[jorge.dh@tuxtla.tecnm.mx](mailto:jorge.dh@tuxtla.tecnm.mx).

Osbaldo Ysaac García Ramos (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,  
[osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx](mailto:osbaldo.gr@tuxtla.tecnm.mx).

---

\*corresponding author.

Artículo recibido en julio 30, 2024; aceptado en septiembre 06, 2024.

### Resumen.

*La compensación en adelanto es una técnica que se utiliza para mejorar la estabilidad y el rendimiento de los sistemas de control. Consiste en añadir un término derivativo a la función de transferencia del controlador, lo que introduce un adelanto de fase en la respuesta del sistema. El lugar geométrico de las raíces es un método gráfico que se utiliza para analizar la estabilidad de los sistemas de control, representa las raíces de la ecuación característica del sistema en el plano complejo. Las herramientas computacionales son útiles para analizar la compensación en adelanto utilizando el lugar geométrico de las raíces. Estas herramientas permiten realizar cálculos complejos y visualizar el comportamiento del sistema de control de manera gráfica.*

**Palabras claves:** Control, estabilidad, función de transferencia.

### Abstract.

*Lead compensation is a technique used to improve the stability and performance of control systems. It consists of adding a derivative term to the controller transfer function, which introduces a phase advance in the system response. The root locus is a graphical method used to analyze the stability of control systems; it represents the roots of the characteristic equation of the system in the complex plane. Computational tools are useful for analyzing feedforward compensation using the root locus. These tools allow you to perform complex calculations and visualize the behavior of the control system graphically.*

**Keywords:** Control, stability, transfer function.

## 1. Introducción.

En la construcción de un sistema de control, sabemos que una modificación adecuada de la dinámica de la planta puede ser una forma sencilla de cumplir las especificaciones de comportamiento. Esto sin embargo puede que no sea posible en muchas situaciones prácticas ya que la planta está fijada y no es modificable (Ogata, 2010).

En la práctica, el lugar de las raíces de un sistema puede indicar que no se puede lograr el comportamiento deseado simplemente modificando la ganancia (o algún otro parámetro ajustable). De hecho, en algunos casos, el sistema puede no ser estable para todos los valores de la ganancia (o de otro parámetro ajustable). Entonces es necesario modificar el lugar de las raíces para cumplir las especificaciones de comportamiento (Ogata, 2010).

El diseño por el método del lugar de las raíces se basa en redibujar el lugar de las raíces del sistema añadiendo polos y ceros a la función de transferencia en lazo abierto del sistema y hacer que el lugar de las raíces pase por los polos en lazo cerrado deseados en el plano  $s$ . La característica del diseño del lugar de las raíces es que se basa en la hipótesis de que el sistema en lazo cerrado tiene un par de polos dominantes. Esto significa que los efectos de los ceros y polos adicionales no afectan mucho a las características de la respuesta (Ogata, 2010).

El LGR indica, de manera gráfica, la evolución de un sistema en lazo cerrado para variaciones de ganancia, mientras la información suministrada en dicha gráfica muestra las características y las limitaciones propias de cada sistema, de aquí que con el conocimiento de su comportamiento es posible seleccionar un punto específico del LGR, según los requisitos a satisfacer por parte del diseñador (Hernández, 2010).

MATLAB, acrónimo de MATrix LABoratory, es hoy en día una de las principales herramientas de software existentes en el mercado para el cálculo matemático, análisis de datos, simulación y visualización de datos. Desde su aparición en los años 70, ha ido introduciéndose con fuerza en el ámbito científico y universitario. En la actualidad es algo más que una herramienta de ayuda de cálculo avanzado, es también un lenguaje de programación con una elevada potencia de cálculo matricial (Pinto, 2010).

Dentro del campo del control automático, MATLAB ha desarrollado un gran número de funciones para el análisis de los sistemas de regulación. Todas ellas se encuentran dentro de la Control System Toolbox, y se permiten el análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia, tanto de sistemas continuos como discretos; asimismo permite la definición de los sistemas en distintos formatos y la conversión entre los mismos (Pinto, 2010).

Para diseñar un compensador en adelante utilizando el lugar geométrico de las raíces, se siguen los siguientes pasos:

- Determinar la función de transferencia del sistema sin compensar.
- Dibujar el lugar geométrico de las raíces del sistema sin compensar.
- Determinar la ubicación deseada de las raíces del sistema compensado.
- Añadir un término derivativo a la función de transferencia del controlador para mover las raíces del lugar geométrico de las raíces hacia la ubicación deseada.
- Verificar la estabilidad del sistema compensado mediante el lugar geométrico de las raíces.

Ventajas de la Compensación en Adelanto:

- Mejora la estabilidad del sistema.
- Aumenta el margen de ganancia.
- Reduce el tiempo de respuesta.
- Mejora el rechazo a perturbaciones.

Desventajas de la Compensación en Adelanto:

- Puede aumentar el ruido en el sistema.
- Puede causar sobre impulso en la respuesta del sistema.

## 2. Métodos.

Utilizando el método del lugar geométrico de las raíces (bisectriz) diseñe un compensador en adelanto del sistema de control de la siguiente figura:

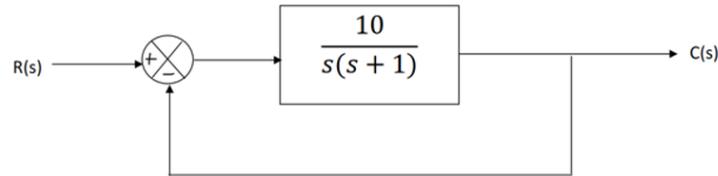


Figura 1. Sistema de control.

Se desea un compensador  $G_c(s)$  tal que los polos de lazo cerrado tengan un factor de amortiguamiento  $\zeta = 0.5$  y una frecuencia natural  $\omega_n = 3$  rad/seg

Se graficó con los datos de la planta sin compensar y compensada lo siguiente:

- La respuesta al escalón.
- La respuesta a la rampa.

Con esos resultados verifique si el compensador cumple con los requerimientos de desempeño.

La herramienta computacional elegida es Matlab versión R2024a Update 5 (24.1.02661297).

La función de transferencia de lazo abierto es.

$$G(s) = \frac{10}{s(s+1)}$$

La gráfica del lugar de las raíces de lazo abierto se muestra en la siguiente figura.

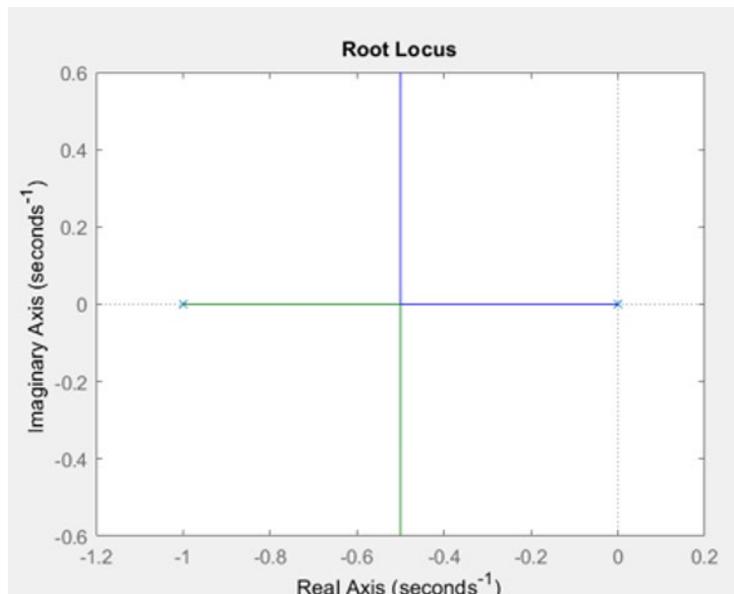
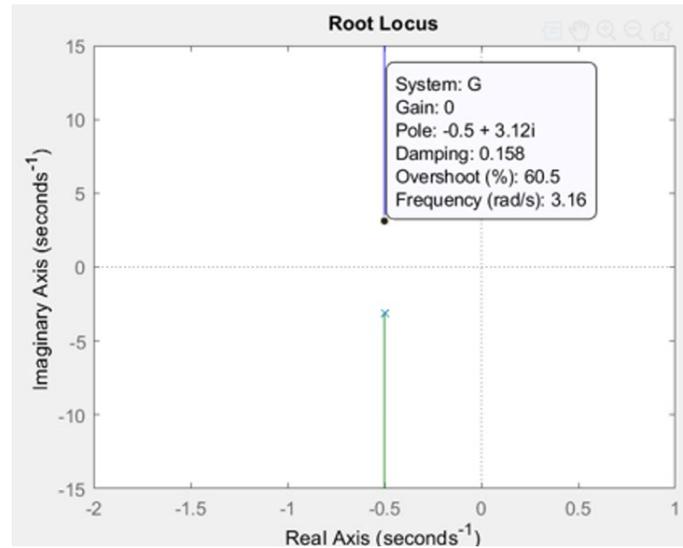


Figura 2. Lugar de las raíces de lazo abierto.

La función de transferencia de lazo cerrado de la planta es.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{10}{s^2 + s + 10}$$

La gráfica del lugar de las raíces de lazo cerrado se muestra en la figura siguiente.



**Figura 3.** Lugar de las raíces de lazo cerrado.

Los polos de lazo cerrado se encuentran en.

$$s = -0.5 \pm 3.12 i$$

El factor de amortiguamiento de los polos de lazo cerrado es.

$$\zeta = 0.158$$

La frecuencia natural de los polos de lazo cerrado es.

$$\omega_n = 3.16$$

---

**Código 1.** Obtención del lugar de las raíces para la función de transferencia de lazo abierto (García, 2024)

---

```
s=tf('s');
G=10/(s*(s+1));
rlocus(G);
```

---

**Código 2.** Obtención de la gráfica del lugar geométrico de las raíces del polinomio deseado y de lazo abierto (García, 2024)

---

```
Glc = feedback(G,1);
rlocus(Glc);
```

---

### 3. Desarrollo.

Construcción de la función de transferencia del polinomio deseado para la obtención de los polos deseados con los datos proporcionados.

$$s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2 = s^2 + 3s + 9$$

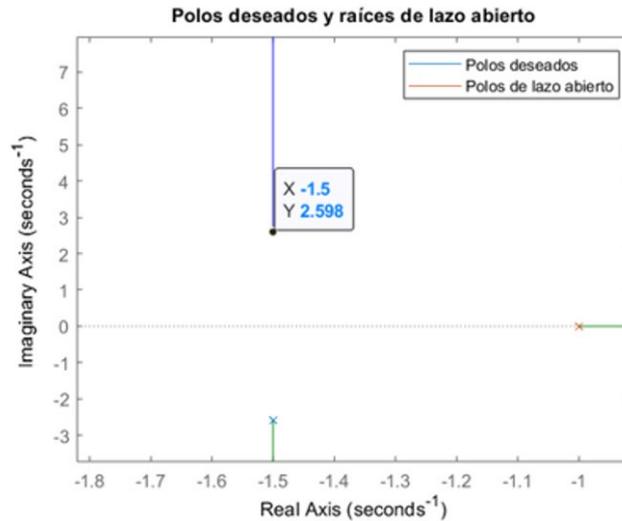
---

**Código 3.** Obtención del lugar de las raíces para la función de transferencia de lazo cerrado (García, 2024)

---

```
Gd=3/(s^2+3*s+9);
rlocus(Gd);
hold on
rlocus (G);
legend ('Polos deseados','Polos de lazo abierto');
title('Polos deseados y raíces de lazo abierto');
hold off
```

---



**Figura 4.** Lugar de las raíces de polos deseados y lazo abierto.

#### Obtención de la función de transferencia del compensador con el método de la bisectriz.

Estas gráficas obtenidas sirven para el cálculo de la deficiencia de ángulo, así como del cero, el polo y la ganancia del compensador en adelanto haciendo uso del método de la bisectriz.

---

**Código 4.** Función de transferencia del compensador, la ganancia y del compensador con la ganancia ajustada (García, 2024)

---

```
K = 1.2287;
Gc=K*((s+1.9432)/(s+4.6458));
Ga=G*Gc;
```

---

### Respuesta al escalón y a la rampa de los sistemas sin compensar y compensado.

Por último, se obtienen las gráficas de la respuesta al escalón y a la rampa del sistema sin compensar y compensado para poder realizar el análisis y determinar si cumple con las especificaciones proporcionadas

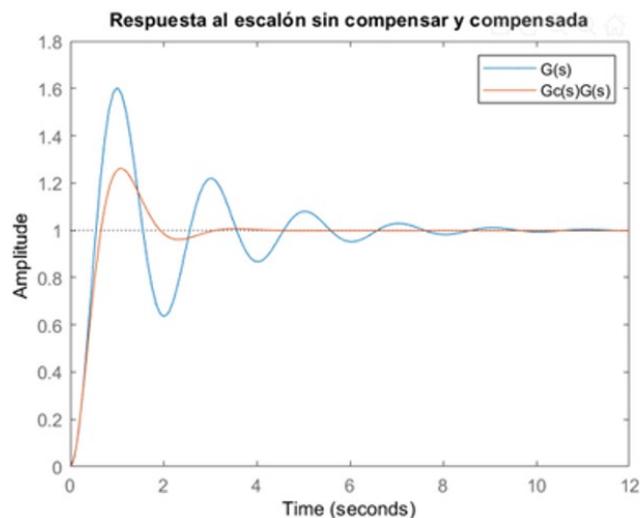
---

**Código 5.** Gráfica de la respuesta al escalón y a la rampa del sistema sin compensar y compensado (García, 2024)

---

```
G=feedback(G,1);
step (G);
title('Respuesta al escalón sin compensar y compensada')
hold on
Ga=feedback(Ga,1);
step(Ga);
legend ('G(s)','Gc(s)G(s)');
hold off

t=0:0.1:30;
x=t;
lsim(G,x,t);
hold on
lsim(Ga,x,t);
legend ('G(s)','Gc(s)G(s)')
title('Respuesta a la rampa sin compensar y compensada')
hold off
```



**Figura 5.** Gráfica de la respuesta al escalón.

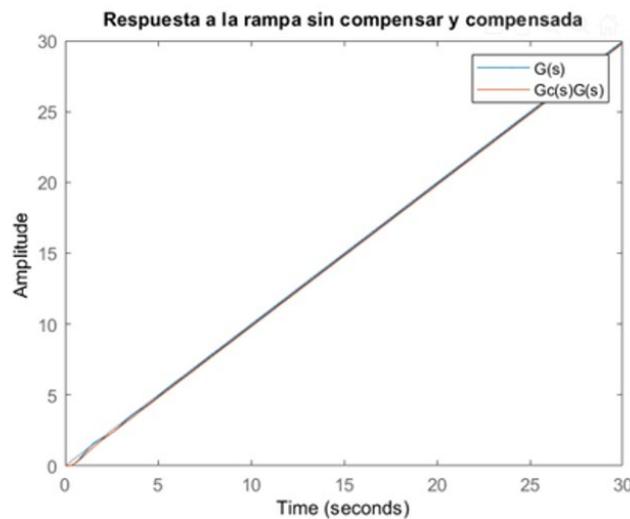


Figura 6. Gráfica de la respuesta a la rampa.

### Conclusiones.

El uso de Matlab para el análisis y diseño de compensadores por el método del lugar geométrico de las raíces proporciona una alternativa en el tema de sistemas de control al facilitar y simplificar los cálculos y visualización de los resultados.

Es una herramienta para el desarrollo de recursos educativos siendo una opción en el desarrollo de actividades didácticas en cursos de educación superior.

### Créditos.

Los autores agradecen a MathWorks® por conducto de María Elena Gavilán Alfonso por las facilidades proporcionadas en el Taller Virtual para Educadores Enseñando Pensamiento Computacional con Matlab.

### Referencias bibliográficas.

**García A., Luis. (2024).** Itandrade3/Compensacion-En-Adelanto-LGR: Primera Revisión.  
<https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.13145193>.

**Hernández G., Ricardo (2010).** Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB. Pearson Educación S.A.

**Ogata, Katsuhiko. (2010).** Ingeniería de Control Moderna. Pearson Educación S.A, 537–553.

**Pinto B., Enrique, Matía E., Fernando (2010).** Fundamentos de control con MATLAB. Pearson Educación S.A.

### Información de los autores.



**Luis Tomás García Andrade**, Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Administración de Redes y Telecomunicaciones por el Instituto de Estudios Superiores de Chiapas, Docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



**Vicente León Orozco**, Ingeniero electricista, egresado del Instituto Tecnológico de Cd Madero, Tamps. Docente tiempo completo, en el Departamento de ingeniería Eléctrica y electrónica. Jefe de proyectos de vinculación de la carrera de ingeniería electrónica. Integrante del Colegio de Ingenieros mecánicos y Electricistas del estado de Chiapas. Desde el 2005, integrante de diferentes consejos directivos, como primer secretario. Diseño y ejecución de diversos diplomados de ahorro y uso eficiente de energía, en colaboración CFE-TecNM y SEMAHN. Jefe del Depto. de Ing. Eléctrica y electrónica. en la iniciativa privado, Mantenimiento de equipo electrónico



**Jorge Díaz Hernández**, Ingeniero Electricista por el Instituto Politécnico Nacional, Maestría en Ciencias con especialidad de Matemática Educativa por la Universidad Autónoma de Chiapas, Docente del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



**Osbaldo Ysaac García Ramos**, Ingeniero en Electrónica, es Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene Cursos especialización en Mecatrónica en Universidad de Esslingen Alemania, en la empresa Emco Salzburgo Austria, en la empresa Festo Estados Unidos y Festo México. Es académico de tiempo completo del Departamento de Eléctrica-Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tiene 18 años de experiencia docente. Ha desarrollado proyectos de investigación siendo responsable técnico de desarrollo de proyectos financiados por CONACyT y

empresas privadas. Cuenta con la certificación de Diseñador mecánico CSWA, CSWP, CSWP Avanzado por la empresa SolidWorks. Obtuvo premio de desempeño a la excelencia EGEL 2018 en Ingeniería Mecatrónica y es Miembro del Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas del Estado de Chiapas. Con campos de interés en: Automatización de procesos, Industry 4.0, Tecnologías CAD-CAM-CAE, Instrumentación y control.