

### 5.1 SISTEMA DE CONTROL PRIMARIO EN LAZO ABIERTO

Primeramente se analizan los resultados de los efectos de un control primario en un Generador síncrono.

Para los cuales se han considerado los siguientes valores característicos de los parámetros de la máquina síncrona.

$$K_a = 20.00$$

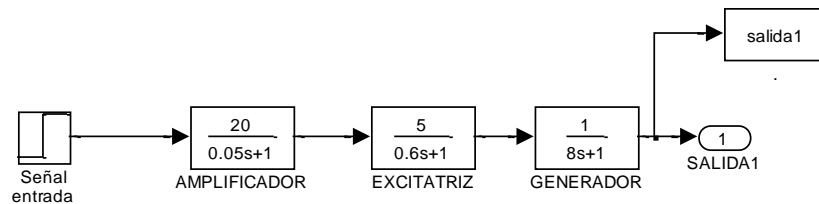
$$T_a = 0.05$$

$$T_e = 0.60$$

$$K_e = 5.00$$

$$K_{st} = 0.01$$

La figura 5.1 muestra en el dominio de Laplace la estructura de control primario de tensión para un generador síncrono.

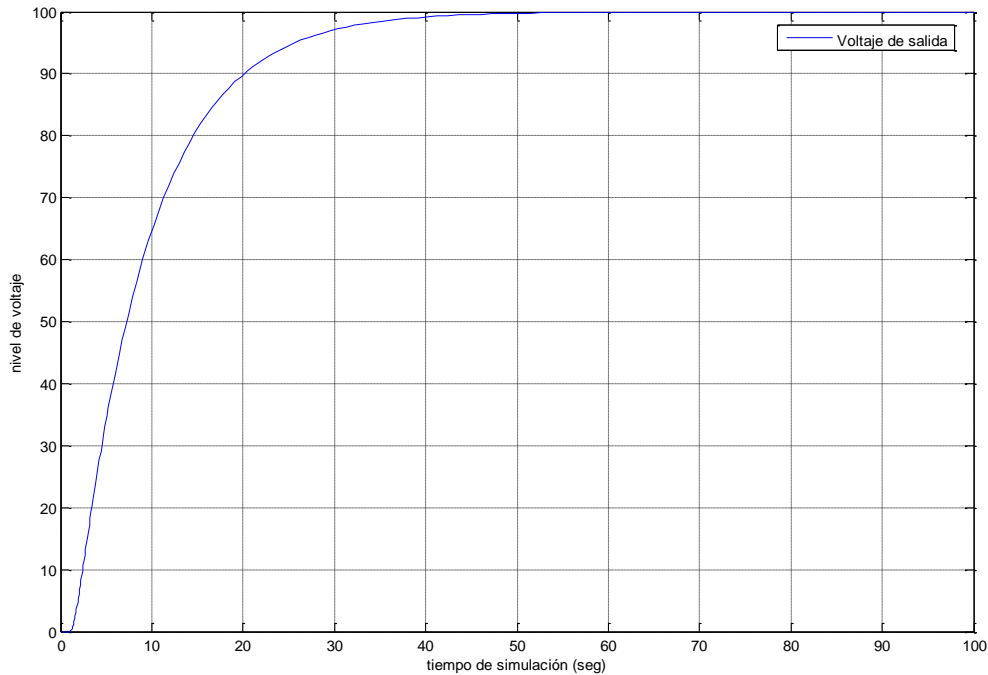


**Figura 5.1** Sistema de control Primario de un generador (Lazo abierto).

La función de transferencia correspondiente al diagrama de bloques anterior es:

$$\text{Función de Transferencia} = \frac{200}{(1 + 0.05 s) (1 + 0.6 s) (1 + 8 s)}$$

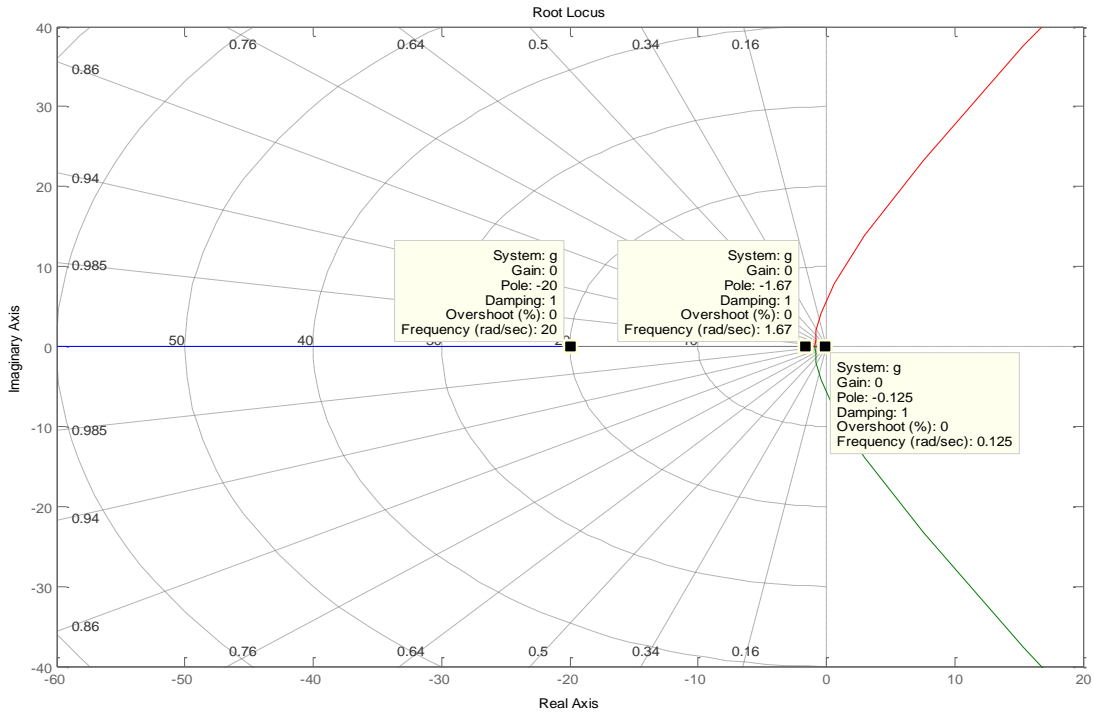
La respuesta temporal a una señal de escalón aplicada a un control primario sobre un generador síncrono se muestra en la figura. 5.2, considerando un tiempo de actuación de 40 segundos.



**Figura 5.2** Señal de voltaje de salida del Generador

Donde se observa que esta señal tiende a ser estable.

Utilizando el software Matlab, se muestra en la figura 5.3 el Diagrama del Lugar de las raíces correspondiente, las cuales se encuentran del lado izquierdo del eje coordenado (signo negativo).



**Figura 5.3** Lugar de raíces (Lazo abierto)

La representación de un sistema en diagramas de bloques hace posible obtener las relaciones Entrada – Salida.

Manipulando estos diagramas de bloques, podemos obtener los valores de los polos correspondientes a un solo diagrama simplificado de control primario de tensión en Lazo Abierto, quedando de la manera siguiente:

$$G_1 = \frac{20}{0.05 s + 1}$$

$$G_2 = \frac{5}{0.6 s + 1}$$

$$G_3 = \frac{2}{8 s + 1}$$

Resultando la función de transferencia simplificada:

$$G = \frac{200}{0.24 s^3 + 5.23 s^2 + 8.65 s + 1}$$

La cual nos da como resultado los siguientes polos:

- 1) -20.000
- 2) -1.6667
- 3) -0.1250

Estos valores son reales con signo negativo que corresponden a la señal de respuesta estable.

Por otro lado, analizando el sistema de control primario anterior a través de ecuaciones de estado, convirtiendo a la forma estándar de Espacio Estado se tiene:

$$\dot{\bar{X}} = A \bar{x} + B f(t)$$

Utilizando Mathcad para el cálculo de los Eigenvalores de la matriz A:

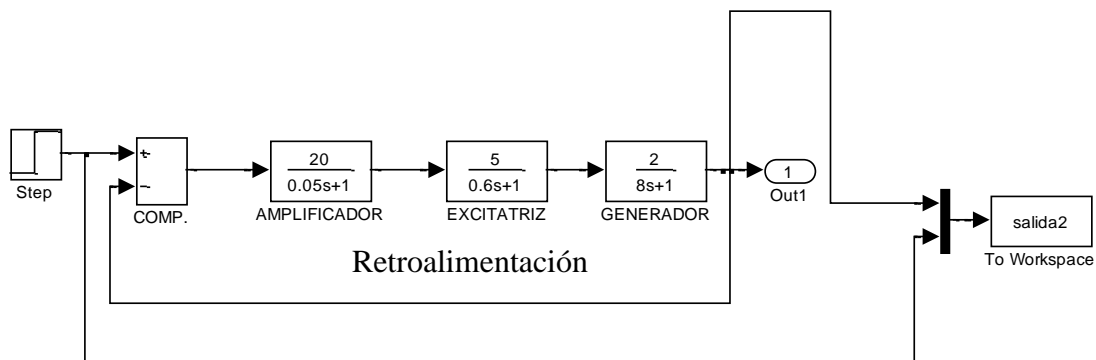
$$A := \begin{pmatrix} \frac{-1}{T_a} & 0 & 0 \\ \frac{K_e}{T_e} & \frac{-1}{T_e} & 0 \\ 0 & \frac{K_f}{T'_{do}} & \frac{-1}{T'_{do}} \end{pmatrix}$$

$$\text{eigenvals}(A) = \begin{pmatrix} -0.125 \\ -1.666667 \\ -20 \end{pmatrix}$$

Los cuales corresponden exactamente a los valores proporcionados por los polos de la función de transferencia simplificada.

## 5.2 SISTEMA DE CONTROL PRIMARIO EN LAZO CERRADO

Ahora analizaremos el control primario de tensión anterior, sólo que ahora incorporaremos un lazo de retroalimentación desde la señal de salida del Generador  $\Delta V$  a la señal de entrada del amplificador  $\Delta e$ . Esperando tener una mejoramiento en la estabilidad de la señal de voltaje de salida del Generador. La figura 5.4 muestra en el dominio de Laplace, un sistema de control primario en lazo cerrado (retroalimentación).

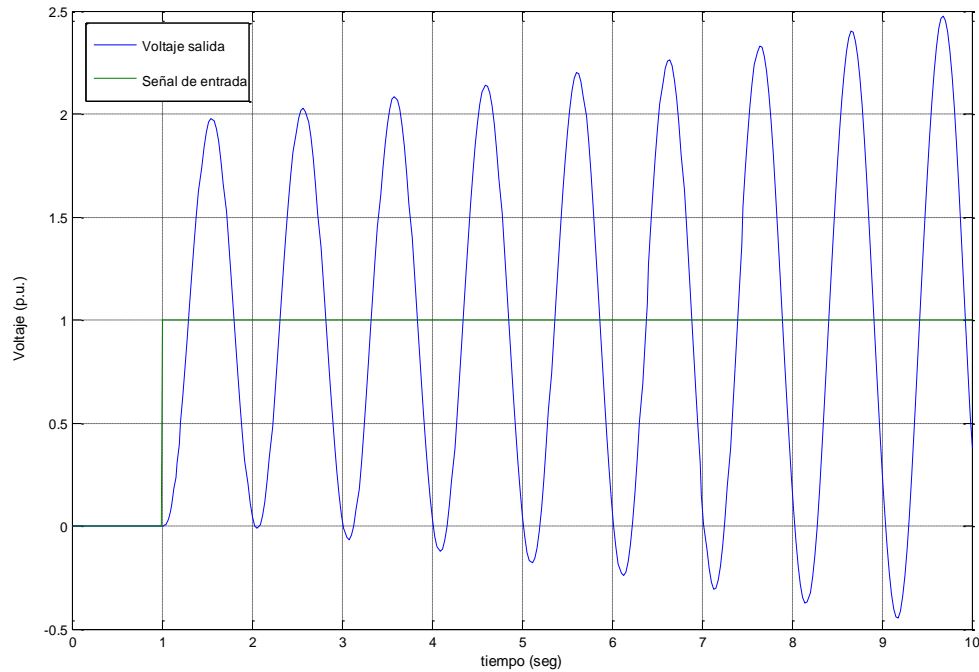


**Figura 5.4** Sistema de control primario en Lazo cerrado.

Podemos obtener los valores de los polos correspondientes al diagrama de bloques simplificado, considerando la retroalimentación, quedando de la siguiente manera:

$$G_4 = \frac{200}{0.24 s^3 + 5.23 s^2 + 8.65 s + 201}$$

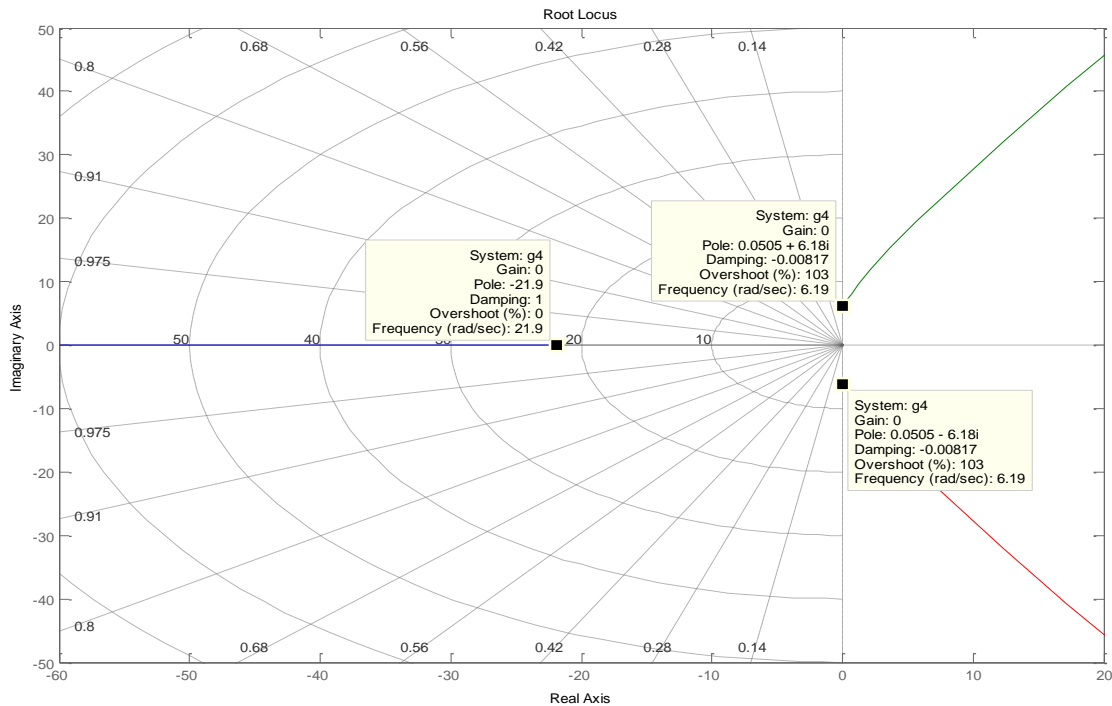
Para esta función de transferencia, la respuesta a una señal de escalón aplicado al sistema de control, se muestra en la figura 5.5., donde se observa que el nivel de tensión es inaceptable.



**Figura 5.5.** Señal de voltaje de Salida del Generador (lazo cerrado).

Se observa que la señal de voltaje de salida es oscilatoria, es decir es un sistema de control inestable.

La figura. 5.6 muestra el Diagrama del Lugar de Raíces correspondientes correspondiente, donde se observa que dos polos, se ubican en el lado derecho del sistema coordinado indicando que la respuesta es oscilatoria, y polo negativo, situándose en el lado izquierdo del eje coordinado.



**Figura 5.6.** Lugar de Raíces (Lazo cerrado)

Con esta información se pueden analizar los polos correspondientes a la función de transferencia simplificada del sistema.

La cual nos da como resultado los siguientes polos:

- 1) -21.8928
- 2)  $0.0505 + 6.1848 i$
- 3)  $0.0505 - 6.1848 i$

Se observa que un polo corresponde a un valor real negativo, pero los dos otros dos polos corresponden a valores imaginarios con parte real positiva. Esto nos indica que el sistema es inestable con una frecuencia de  $\pm 6.1848$  Ciclos /segundo.

De igual forma, haciendo un análisis a través de la forma estándar de las ecuaciones Espacio Estado, se tiene:

$$\dot{\bar{X}} = A \bar{x} + B f(t)$$

Para obtener los eigenvalores de la matriz característica A:

$$A := \begin{pmatrix} \frac{-1}{T_a} & 0 & \frac{-K_a}{T_a} \\ \frac{K_e}{T_e} & \frac{-1}{T_e} & 0 \\ 0 & \frac{K_f}{T'_{do}} & \frac{-1}{T'_{do}} \end{pmatrix}$$

$$\text{eigenvals}(A) = \begin{pmatrix} -21.892751 \\ 0.050542 + 6.18483i \\ 0.050542 - 6.18483i \end{pmatrix}$$

Se observa que estos valores corresponden exactamente a los valores que se obtuvieron de los polos de la función de transferencia simplificada del sistema.

### 5.3 SISTEMA DE CONTROL PRIMARIO DE LAZO CERRADO Y ESTABILIZADOR

En la figura. 5.7 se muestra un circuito comúnmente utilizado para estabilizar el control primario de tensión. Se puede establecer una relación entre las variables incrementales, suponiendo que el secundario está conectado a una impedancia muy elevada. ( $\Delta I_2 = 0$ ).

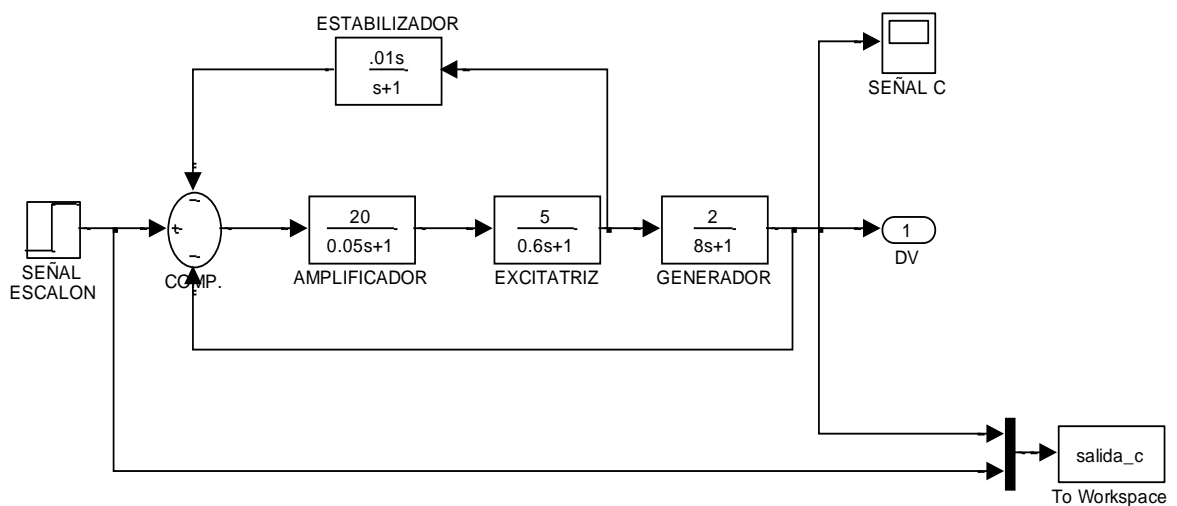


Figura 5.7. Sistema con retroalimentación y lazo estabilizador.



$$\Delta V_1 = R_1 \Delta I_1 + L_1 \frac{d \Delta I_1}{dt}$$

$$\Delta V_2 = M \frac{d \Delta I_1}{dt}$$

Que en términos de Laplace corresponde a:

$$\Delta V_1(s) = R_1 \Delta I_1(s) + L_1 s \Delta I_1(s)$$

$$\Delta V_2(s) = M s \Delta I_1(s)$$

La correspondiente función de transferencia tiene la forma:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} = G_{ST} = \frac{s K_{ST}}{1 + s T_{ST}}$$

donde:

$$K_{ST} = \frac{M}{R_1}$$

$$T_{ST} = \frac{L_1}{R_1}$$

Los valores típicos de estas constantes están en el rango de 0.01 a 1.0 segundo para  $K_{ST}$  y 0.5 a 1.0 para  $T_{ST}$ .

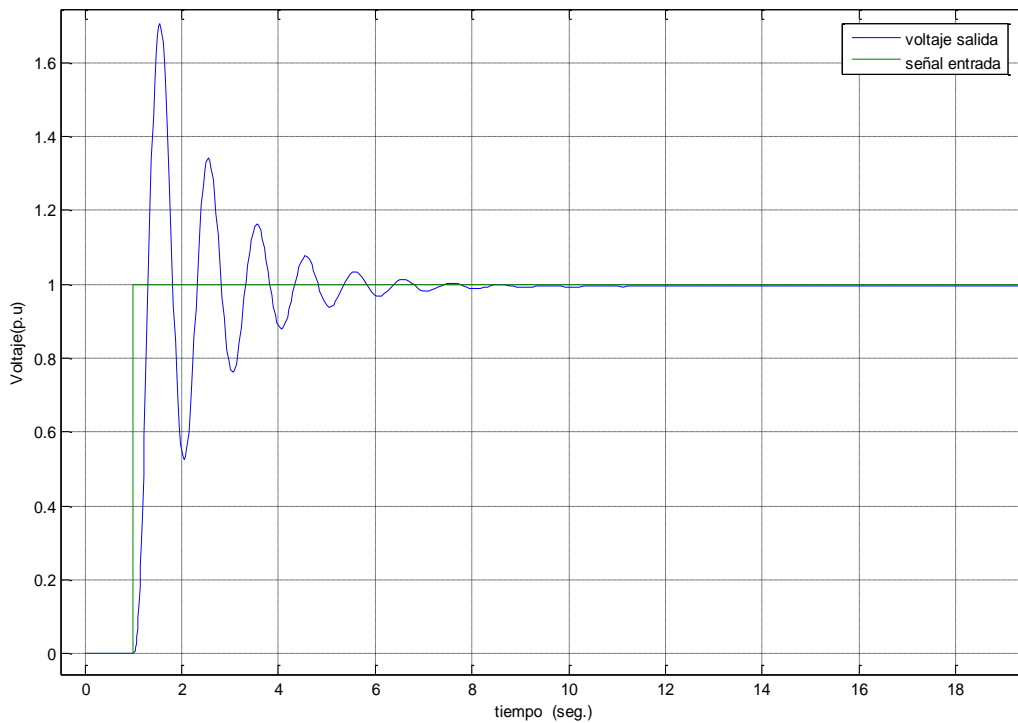
Después de haber utilizado varios valores para  $K_{ST}$  y para  $T_{ST}$ , comprobamos que  $K_{ST} = 0.01$  y  $T_{ST} = 1.0$  son los valores que proporcionan una mejor señal del voltaje de salida del generador, aumentando la estabilidad del sistema, por lo que fueron los valores seleccionados en la simulación.

El circuito estabilizador se puede conectar retroalimentando la señal del error con la señal de salida, bien del amplificador o de la excitación. Esta última posibilidad se muestra en la figura 5.7.

La función de transferencia simplificada del diagrama de bloques de la figura 5.7 es la siguiente:

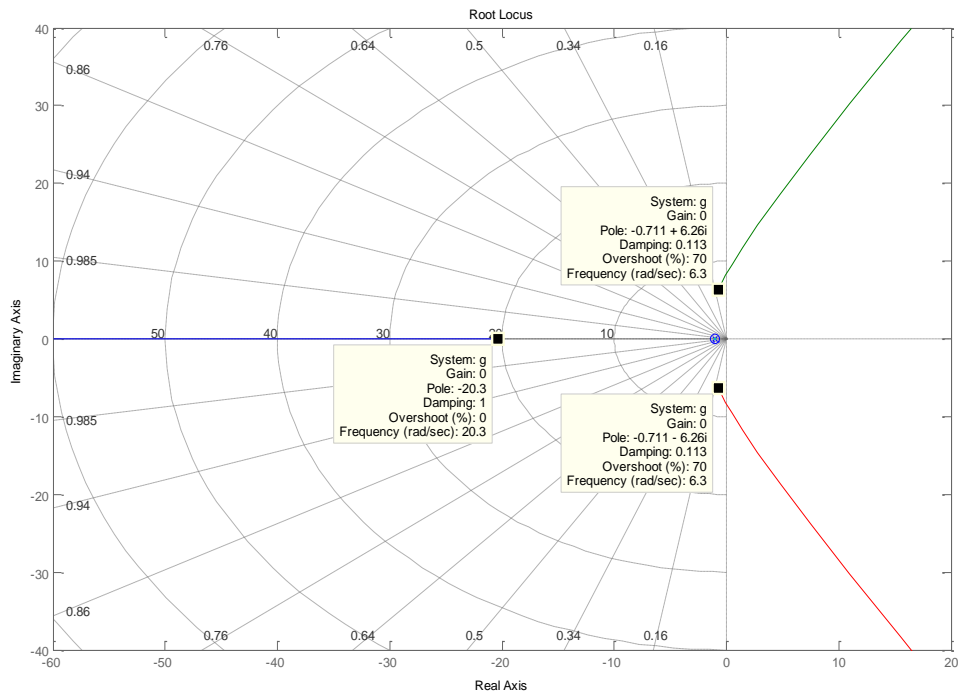
$$G5 = \frac{200 s + 200}{0.24 s^4 + 5.47 s^3 + 21.88 s^2 + 210.7 s + 201}$$

La señal de salida de voltaje del generador es la que se muestra en la figura 5.8.



**Figura 5.8.** *Voltaje de salida del generador con retroalimentación y lazo estabilizador.*

Con esta información se analizan los polos correspondientes a la función de transferencia simplificada del sistema.



**Figura 5.9** Lugar de raíces del sistema de control con retroalimentación y circuito estabilizador

Se observa que los polos de la función de transferencia simplificada son negativos situándose en el lado izquierdo del eje coordenado, indicando que el sistema es estable

Obteniendo los siguientes valores:

- 1) - 20.3318
- 2) - 0.7108 + 6.2588i
- 3) - 0.7108 - 6.2588i
- 4) - 1.0382

Los valores reales negativos de los polos corresponden a una respuesta estable de la señal del voltaje de salida del generador, con una oscilación de amortiguamiento de aproximadamente 6 ciclos /segundo.

De igual forma, haciendo un análisis a través de la forma estándar de las ecuaciones Espacio Estado, se tiene:

$$\dot{\bar{X}} = A x + B f(t)$$

Al obtener los eigenvalores de la matriz A

$$A := \begin{pmatrix} \frac{-1}{T_a} & 0 & \frac{-K_a}{T_a} & \frac{-K_a}{T_a} \\ \frac{K_e}{T_e} & \frac{-1}{T_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_f}{T'_{do}} & \frac{-1}{T'_{do}} & 0 \\ \frac{K_{st} \cdot K_e}{T_{st} \cdot T_e} & \frac{K_{st}}{T_{st} \cdot T_e} & 0 & \frac{-1}{T_{st}} \end{pmatrix}$$

$$\text{eigenvals}(A) = \begin{pmatrix} -20.3313 \\ -0.71096 + 6.25797i \\ -0.71096 - 6.25797i \\ -1.03844 \end{pmatrix}$$

Estos Eigenvalores corresponden a la información proporcionada por los polos de la función de transferencia simplificada del sistema.