

# Simulaciones de una máquina síncrona

---

Uriel Fernando Sandoval Pérez

## Introducción

En este trabajo se presenta un reporte de las simulaciones realizadas durante la materia de Máquinas Eléctricas III. Dichas simulaciones se realizaron obteniendo las ecuaciones diferenciales de la dinámica de una máquina rotativa, en este caso se analizó una máquina síncrona de polos salientes .

La máquina analizada cuenta con dos devanados de amortiguamiento uno en el eje  $d$  y otro en el eje  $q$

Se consideró que la máquina se conectaría a un bus infinito (frecuencia y voltaje constantes) y a la cual se le aplicó una de las siguientes fallas:

- Falla trifásica a tierra
- Variación de potencia mecánica en la flecha del rotor

Todas las ecuaciones diferenciales tanto eléctricas como mecánicas fueron integradas con el método numérico Runge Kutta de 4 orden.

## Desarrollo

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento dinámico de una máquina síncrona son las siguientes:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_d}{dt} = V_d - RI_d + \frac{\omega}{\omega_s} \lambda_q$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_q}{dt} = V_q - RI_q - \frac{\omega}{\omega_s} \lambda_d$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_0}{dt} = V_0 - RI_0$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_f}{dt} = V_f - R_f I_f$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_s}{dt} = V_s - R_s I_s$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\lambda_t}{dt} = V_t - R_t I_t$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = Tm - Te$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

Expresado en forma matricial quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{d\lambda}{dt} = (V - RI + \frac{\omega}{\omega_s} G) \omega_s$$

$$V = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \\ V_f \\ V_s \\ V_t \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \\ I_f \\ I_s \\ I_t \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_0 \\ \lambda_f \\ \lambda_s \\ \lambda_t \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} -R & & & & & \\ & -R & & & & \\ & & -R & & & \\ & & & R_f & & \\ & & & & R_s & \\ & & & & & R_t \end{bmatrix}$$

G es un vector modificado de los enlaces de flujo de la que queda de la siguiente forma:

$$G = \begin{bmatrix} \lambda_q \\ -\lambda_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Y las ecuaciones algebraicas son las siguientes:

$$T_e = \lambda_d I_q - \lambda_q I_d$$

$$I = L^{-1} \lambda$$

Donde:

$$L = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & M_{df} & M_{ds} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & 0 & M_{qt} \\ 0 & 0 & -L_0 & 0 & 0 & 0 \\ -M_{df} & 0 & 0 & L_f & M_{ds} & 0 \\ -M_{ds} & 0 & 0 & M_{ds} & L_s & 0 \\ 0 & -M_{qt} & 0 & 0 & 0 & L_t \end{bmatrix}$$

## Simulaciones y resultados

Para las siguientes simulaciones se usarán los siguientes parámetros físicos de la máquina síncrona:

$$r = .0019;$$

$$r_f = 4.1e - 4;$$

$$r_s = 1.41e - 2;$$

$$r_t = 1.36e - 2;$$

$$l_l = .12;$$

$$l_{fd} = .2049;$$

$$l_{kd} = .16;$$

$$l_{kq} = .1029;$$

$$l_d = .85;$$

$$l_q = .48;$$

$$l_0 = .12;$$

$$\text{pares de polos}=32;$$

$$h=7.5$$

$$T_m = .8519$$

Todos los valores se encuentran en pu.

Y las siguientes condiciones iniciales:

$$V = \begin{bmatrix} .3086 \\ .9512 \\ 0 \\ .00089936 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} .9523 \\ -.3104 \\ 0 \\ 1.4924 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

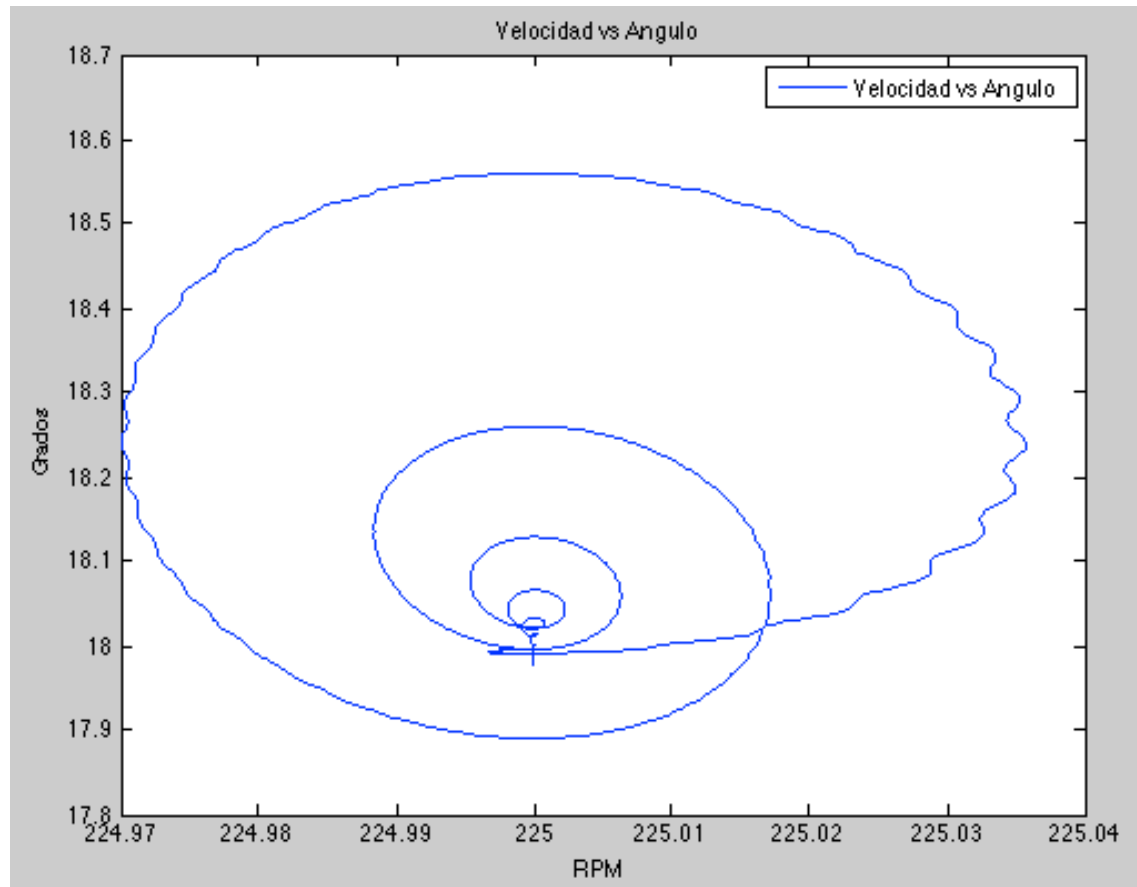
$$\omega = \omega_s$$

$$\delta = .3141$$

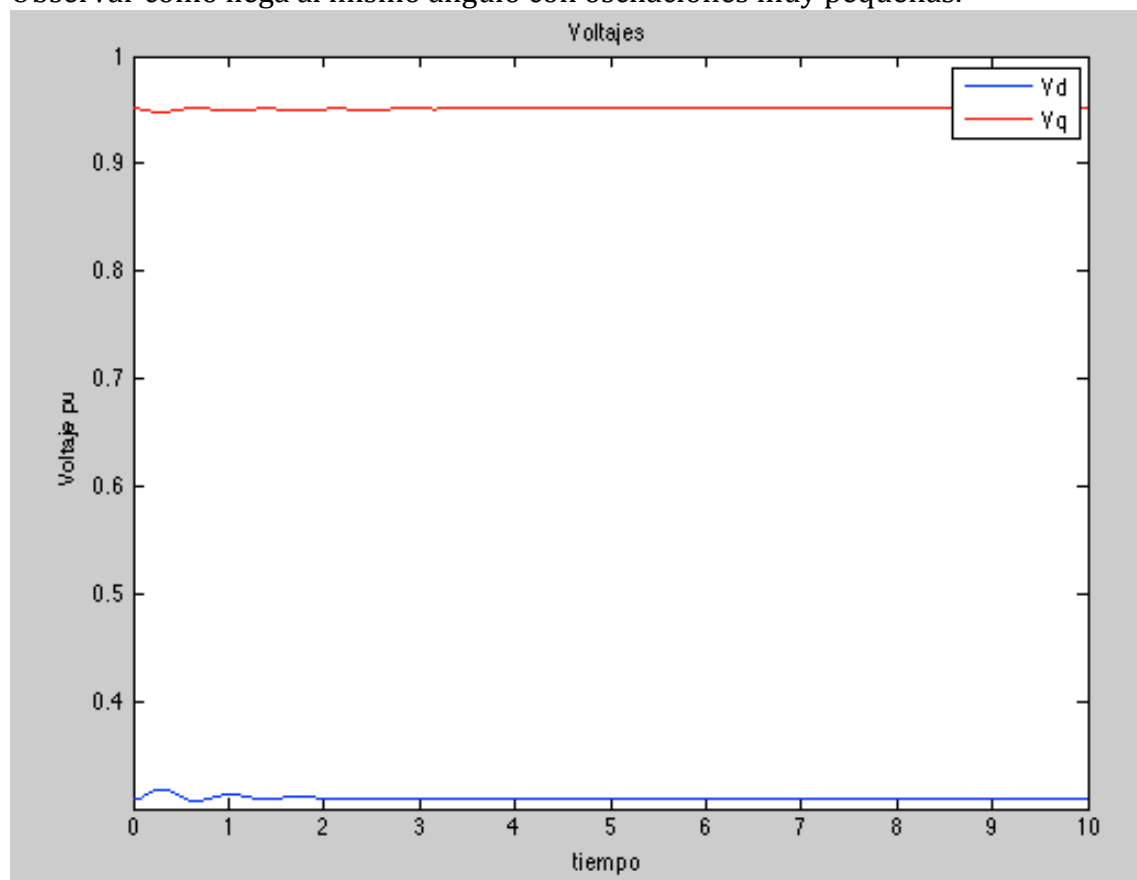
Estas condiciones iniciales fueron brindadas por el profesor y son cuando la máquina se encuentra ya en estado estable.

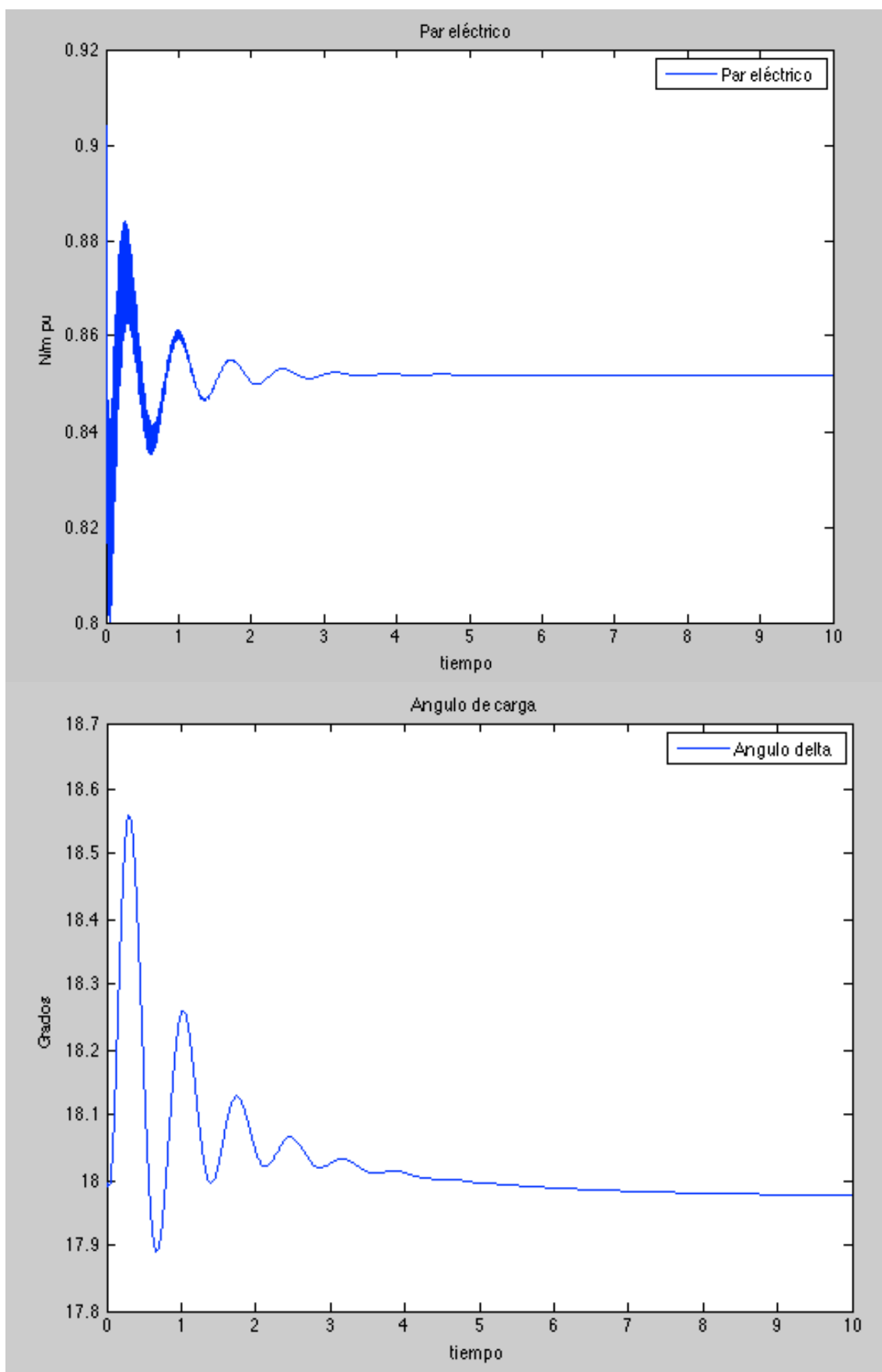
### Interconexión sin falla

Esta simulación describe las oscilaciones que tiene la máquina al conectarlo al bus infinito.



Observar como llega al mismo ángulo con oscilaciones muy pequeñas.

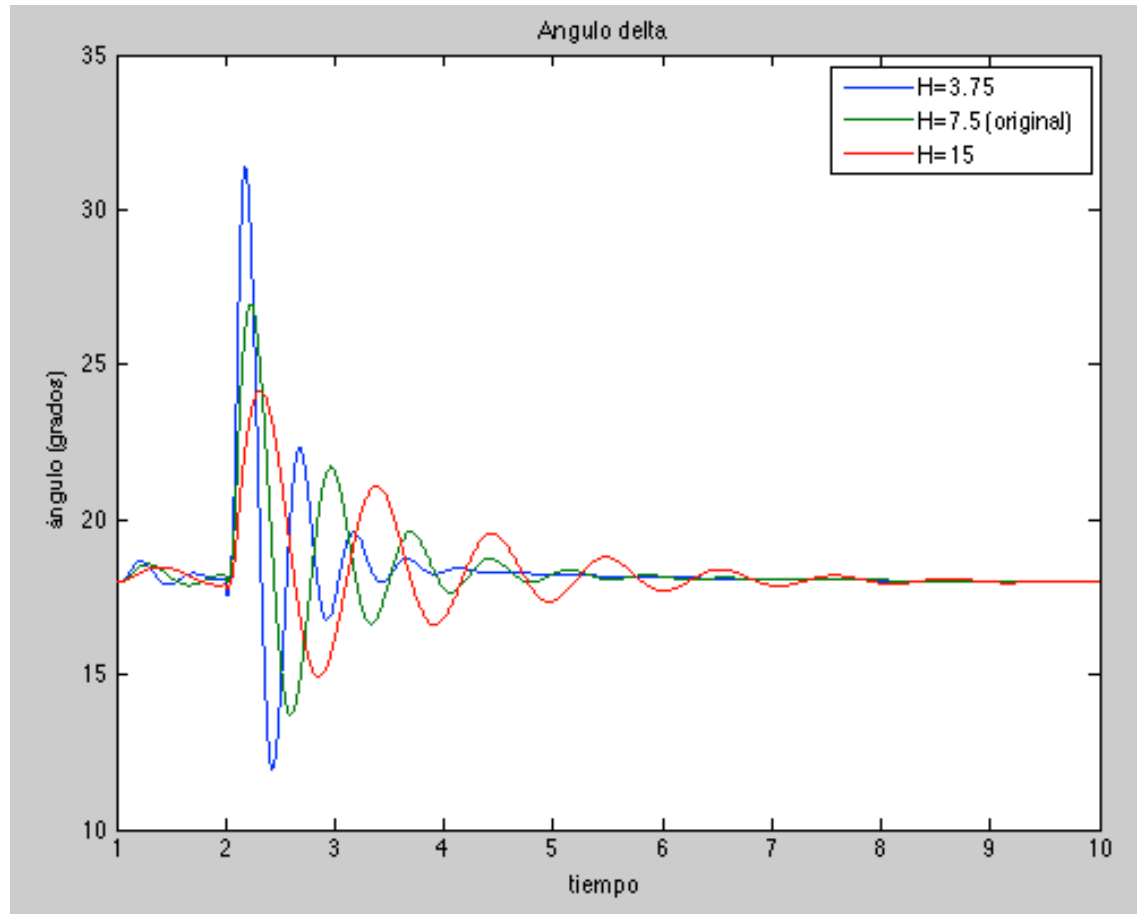




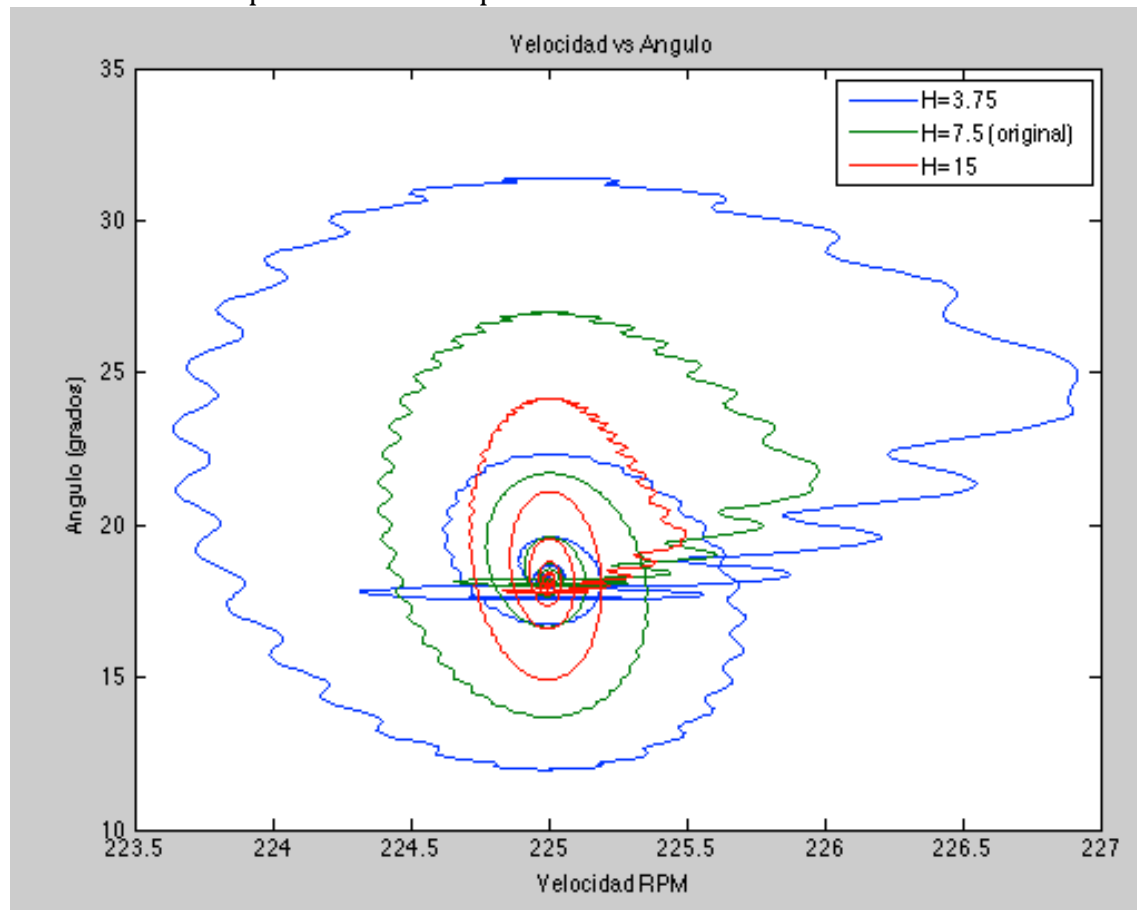
En la gráfica del par y del ángulo se observa la oscilación debido al par mecánico pero nuevamente llega a nuestra condición inicial de aproximadamente  $18^\circ$ . La gráfica de la velocidad al ser una derivada del ángulo es muy parecida a ésta.

### Falla trifásica a tierra

Para esta falla durante el tiempo deseado los voltajes de  $V_d$  y  $V_q$  se igualan a cero, simulando una falla trifásica sólidamente aterrizada. Para esta falla la duración fue de 6 ciclos.

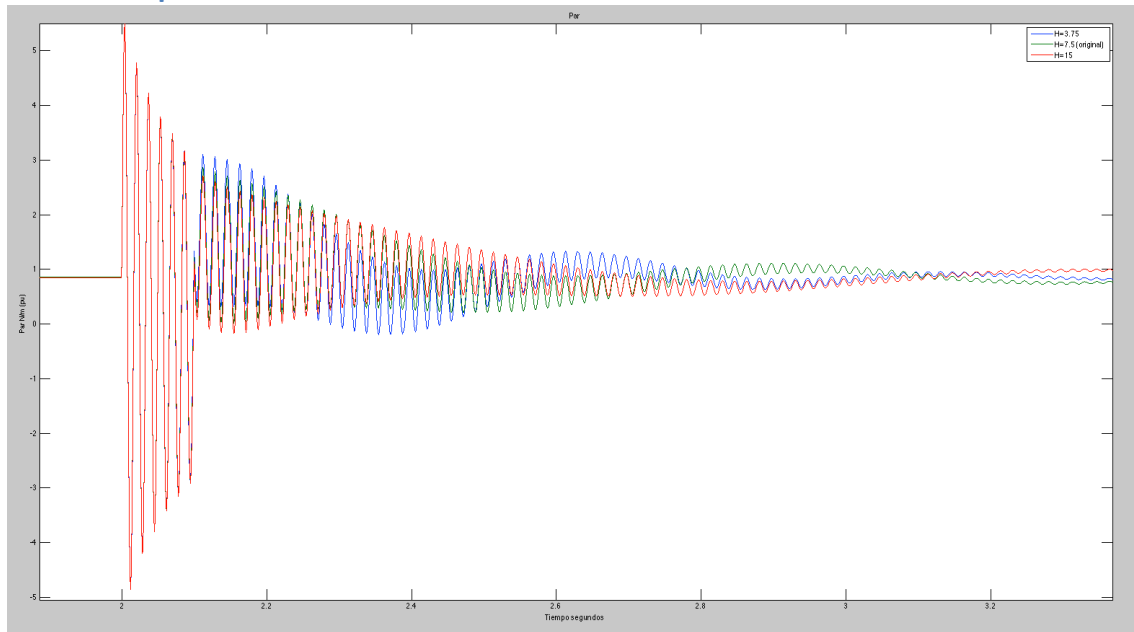


En términos de teoría de Control a mayor constante inercial  $H$  menor sobre impulso pero mayor tiempo para llegar al estado estable. Con  $H$  pequeña el sistema oscila mas fuerte pero menos tiempo.





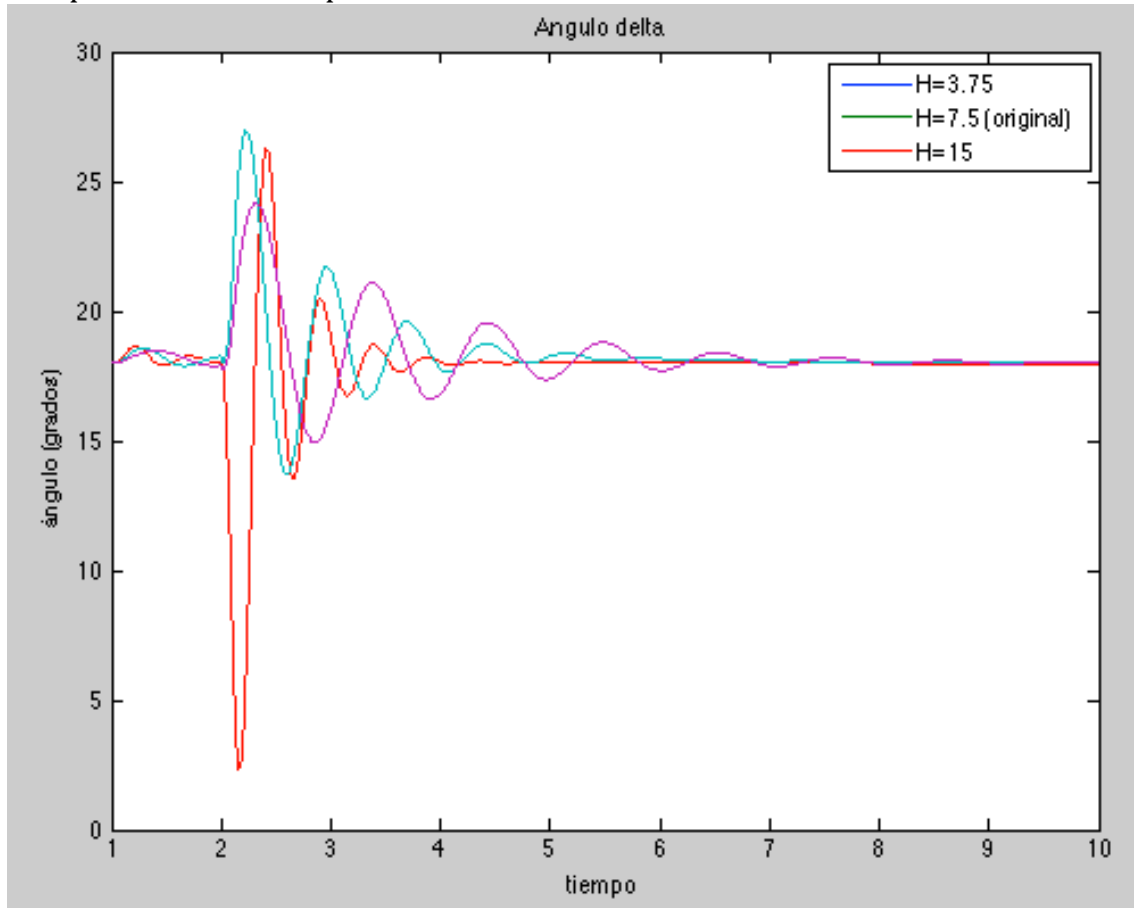
## Gráfica del par



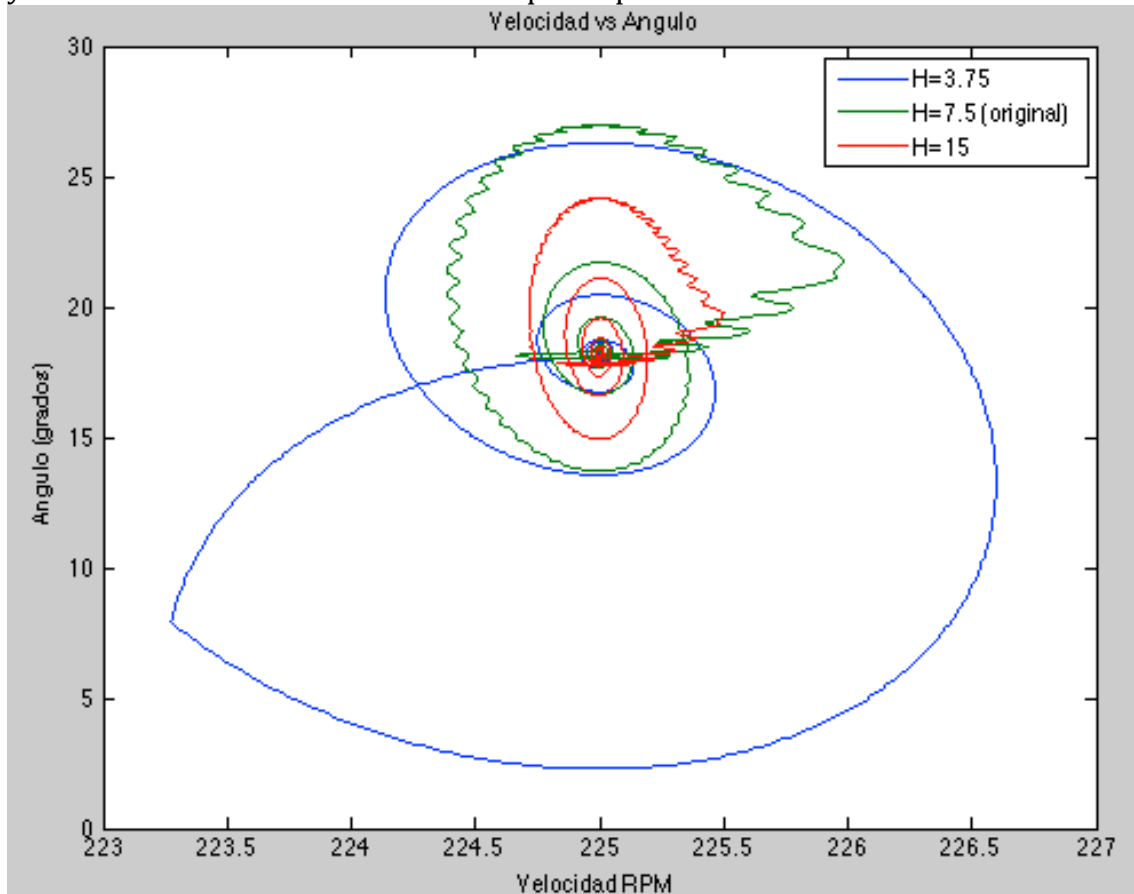
En esta falla al tener un voltaje 0 en terminales la potencia eléctrica generada es cero, por lo que no hay una igualdad entre la potencia mecánica de entrada y la potencia eléctrica de salida lo que hace que a pesar de estar en bus infinito, la máquina tienda a deshacerse de esa energía “sobrante” acelerándose.

### Variación de par mecánico

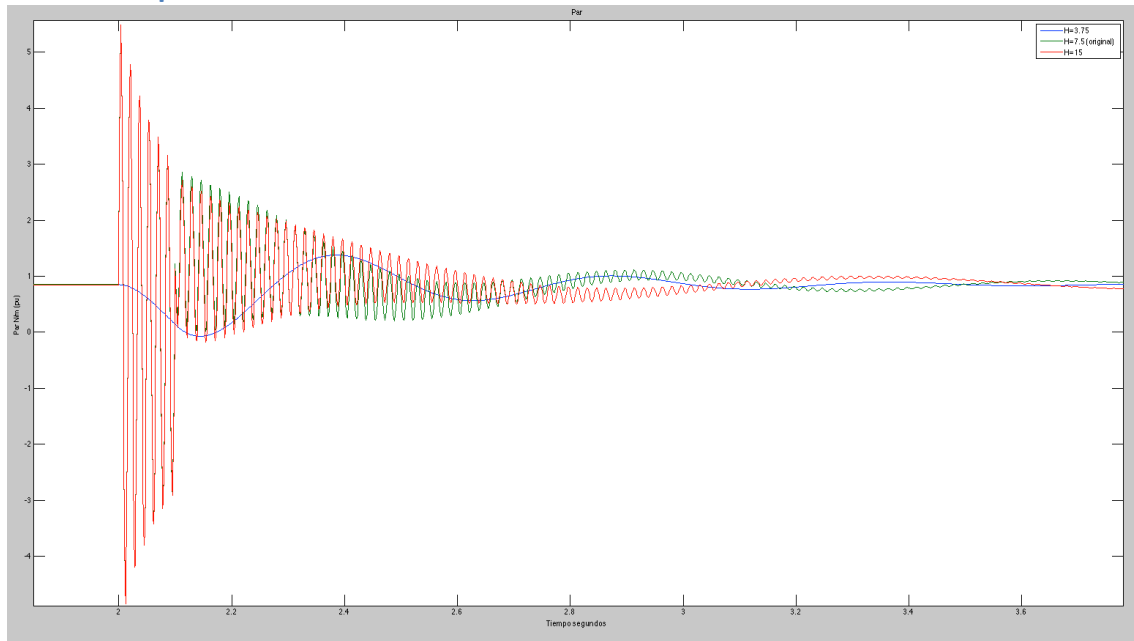
Para la siguiente falla se varió el par mecánico de la máquina nuevamente en un tiempo de 6 ciclos a un par cero.



Para este caso es interesante observar como la máquina de mayor inercia tiende a desacelerarse muy rápido, haciendo que nuestro ángulo delta se haga casi cero. Al introducir nuevamente el mar mecánico todas las máquinas presentan oscilaciones y se vuelven a estabilizar en el mismo punto prefalla.



## Gráfica del par



Para este caso es interesante observar como la máquina mas grande se llega a motorizar. Y la máquina mas ligera desde el punto de vista del par no es tanto su variación incluso para llegar a cero par le toma casi los 6 ciclos, y cuando recupera la potencia mecánica presenta dos oscilaciones y nuevamente regresa al estado estable. Caso contrario de las máquinas grandes.

## Conclusiones

Con este trabajo se consolidaron los conocimientos aprendidos durante la materia de Máquinas Eléctricas III. Observé para que sirven todas esas ecuaciones y cómo es el comportamiento de la máquina en estado dinámico.

También fue posible ver como la teoría generalizada es la base de los conceptos aprendidos en máquinas I y II, donde se sabían usar las ecuaciones pero no se sabía de donde salían.

Para este trabajo se pretendió simular una máquina de inducción jaula de ardilla, pero aun no se obtenían buenos resultados en las simulaciones por lo que no se agrego al reporte.