

Validez de los Modelos Reducidos

5.1. Introducción

De los modelos analizados en el capítulo 2 serán objeto de estudio el modelo de tercer, segundo y primer orden clásico.

Para comparar la validez de los distintos modelos reducidos analizados en el capítulo anterior se procederá a obtener la respuesta en frecuencia de cada uno de los modelos reducidos mediante simulación. Ésta será comparada con la respuesta en frecuencia del modelo de quinto orden obteniéndose el error correspondiente. El error será definido como:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|H_5(j2\pi f_i) - H_r(j2\pi f_i)|}{|H_5(j2\pi f_i)|} \quad (5.1)$$

Siendo $H_5(j2\pi f)$ y $H_r(j2\pi f)$ las funciones de transferencia obtenidas usando el modelo de quinto orden y el modelo reducido objeto del estudio.

Para investigar la dinámica de los distintos modelos se procederá a realizar simulaciones usando *Matlab-Simulink*.

El esquema básico de simulación será el mostrado en Fig. 5.1.1. Las señales de entrada al sistema son la tensión de alimentación y el par mecánico ΔT . En el caso de la tensión de alimentación, dos son las posibles perturbaciones. Perturbación en frecuencia $\Delta f(t)$:

$$\begin{aligned} u_f(t) &= \sqrt{2}U \sin(2\pi[(f + \Delta f(t))]t) = \\ &= \sqrt{2}U \sin(2\pi[f + \Delta f \sin(2\pi f_f t + \varphi_f)]t) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Perturbación en tensión $\Delta u(t)$:

$$\begin{aligned} u_u(t) &= \sqrt{2}[U + \Delta u(t)] \sin(2\pi ft) = \\ &= \sqrt{2}[U + \Delta U \sin(2\pi f_U t + \varphi_U)] \sin(2\pi ft) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Perturbación en par ΔT :

$$\begin{aligned} T(t) &= \sqrt{2}[T_m + \Delta T(t)] = \sqrt{2}[T_m + \Delta T \sin(\omega_T t + \varphi_T)] = \\ &= \sqrt{2}[T_m + \Delta T \sin(2\pi f_T t + \varphi_T)] \end{aligned} \quad (5.4)$$

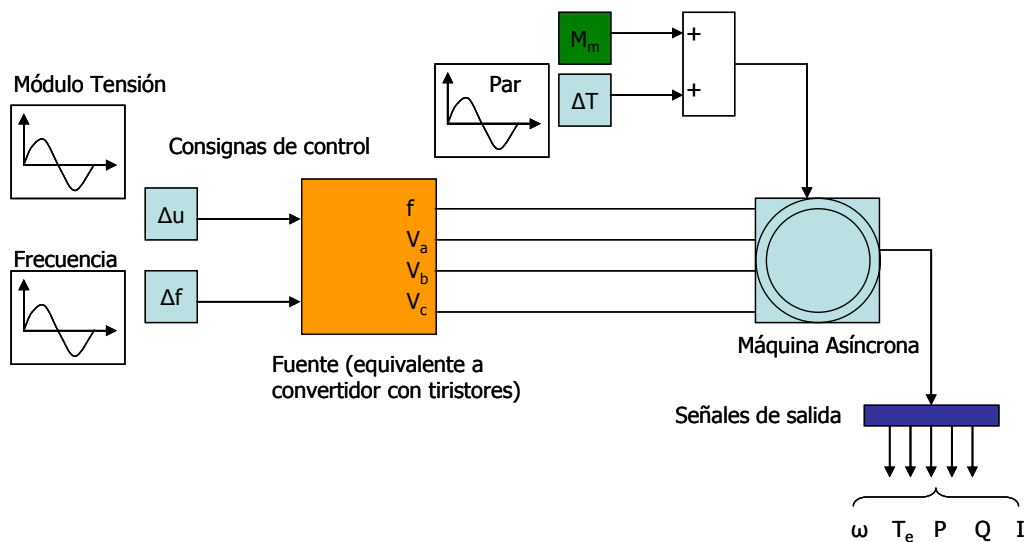


Figura 5.1.1. Esquema usado en la simulación

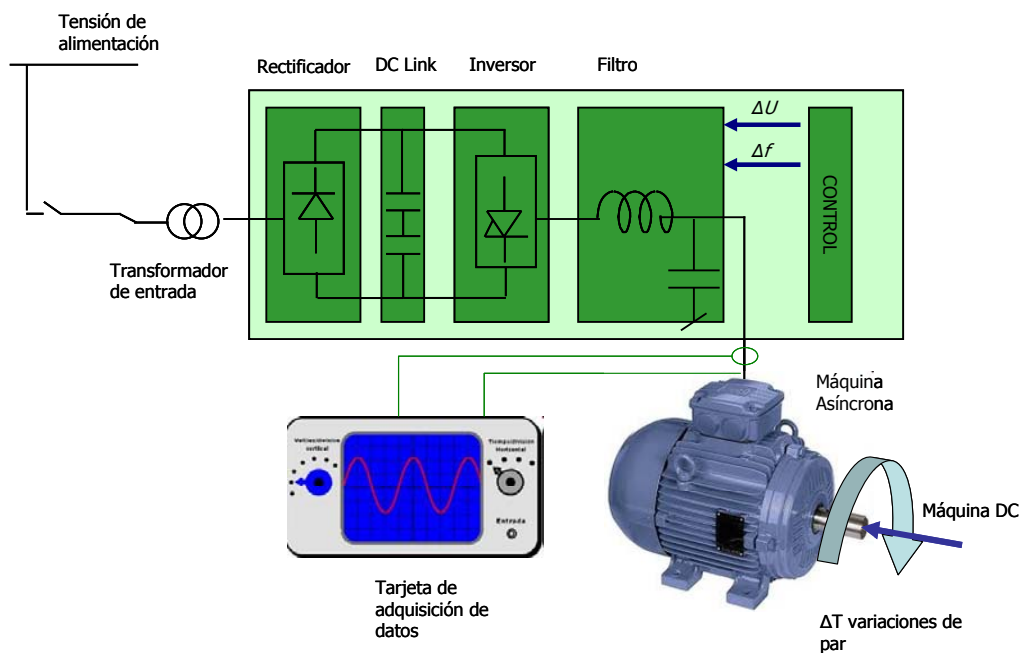


Figura 5.1.2 Esquema montaje experimental

La Fig. 5.1.2 sería el equivalente al esquema de la Fig. 5.1.1 a nivel experimental. Para obtención de la respuesta en frecuencia experimentalmente la máquina de inducción es conectada a una máquina de corriente continua a través de un transductor de par. La máquina de corriente continua se alimenta mediante un convertidor de tiristores de cuatro cuadrantes y por lo tanto puede producir cualquier par en el eje deseado.

La máquina de inducción es conectada a una red mediante otro convertidor, el cual puede generar desviaciones de la frecuencia deseada y de la magnitud de la tensión de alimentación

5.2. Comportamiento de los modelos reducidos

En el capítulo 4 se mostró que el modelo de quinto tiene un comportamiento para muchas funciones de transferencia semejante a modelos lineales de primer y segundo orden. Se observaban comportamientos de segundo orden en el caso de máquinas de pequeño deslizamiento y comportamientos de primer orden para el caso de máquinas de alto deslizamiento. En el presente capítulo se analizarán los modelos de pequeño deslizamiento por tratarse del tipo de máquina más comúnmente extendido.

En el caso de los modelos reducidos se puede demostrar que su comportamiento será similar a sistemas lineales de primer orden, en el caso de modelos reducidos de primer, y semejante a sistemas lineales de segundo (subamortiguado o sobre-amortiguado) orden para el caso del modelo reducido de tercer y segundo orden. En la Fig. 5.2.1 se representa la respuesta del par eléctrico ante escalón para una máquina de 15kW de bajo deslizamiento. Como se puede apreciar en la figura los modelos reducidos de primer y segundo orden siguen un comportamiento similar a un modelo de primer o segundo orden sobre-amortiguado mientras que el de tercer orden tiene un comportamiento claramente de segundo orden sub-amortiguado.

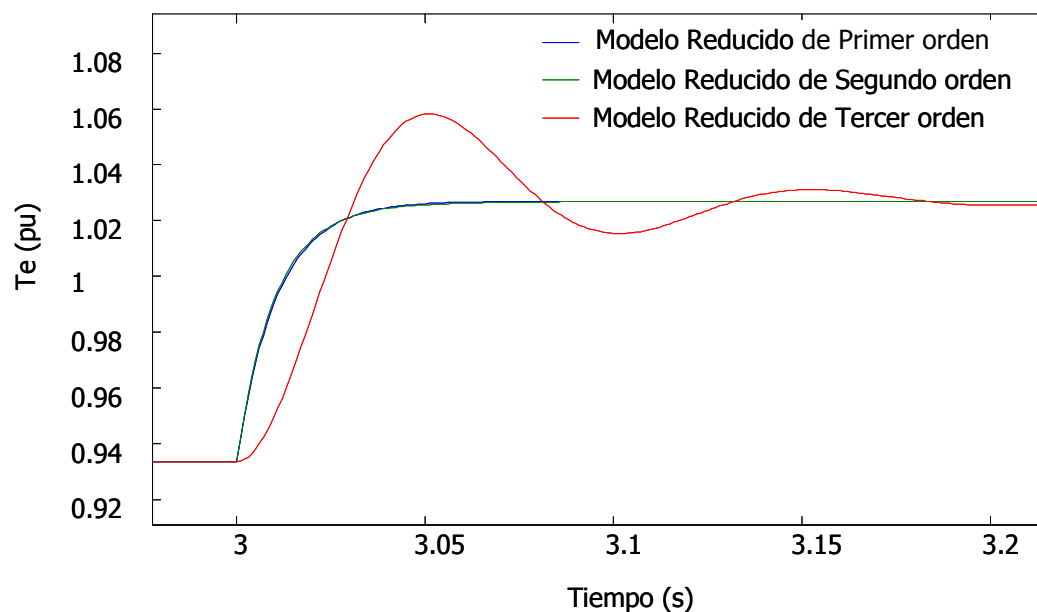


Figura 5.2.1. Respuesta escalón T_e ante escalón en par para distintos modelos reducidos de la máquina 6 (15 kW)

5.3. Validez de los Modelos Reducidos

Con el fin de determinar el rango de validez de los distintos modelos dinámicos, se determina mediante simulación la frecuencia límite o crítica de la perturbación por encima de la cual se supera un determinado nivel de error. Se compararán las respuestas de los modelos reducidos con las respuestas correspondientes del modelo de quinto orden. Para cada una de las distintas máquinas se determinan las diferentes funciones de transferencia, determinándose las frecuencias por debajo de las cuales la diferencias de error entre el modelo reducido y exacto es menor del 10%.

A fin de tener en cuenta una carga mecánica (o el motor primario) acoplada a la máquina de inducción, se ha considerado un momento de inercia con valor doble del indicado en la tabla 4.2.1.

La obtención de la respuesta en frecuencia se obtendrá mediante simulación aplicando una perturbación de carácter sinusoidal conforme a las ecuaciones (5.2), (5.3), (5.4) y midiendo posteriormente, pasado el transitorio, la magnitud y el desfase de la respuesta. Se realizará estas mediciones para un amplio abanico de perturbaciones entre 1 y 40 Hz. La obtención de la magnitud y el desfase se realizará utilizando la transformada rápida de Fourier, aplicando una ventana de tipo flat-top que es la que mejor se adapta a señales senoidales tal y como se comentó en el capítulo 3.

La amplitud de la perturbación será de una amplitud suficiente para garantizar la linealidad del sistema tal conforme a los resultados obtenidos en el capítulo 4 límites del comportamiento lineal.

5.3.1. Respuesta a perturbaciones en frecuencia

Para el caso del modelo reducido de tercer orden en la tabla 5.3.1 se muestran las frecuencias críticas, observándose que alcanzan valores altos de frecuencias límites de unos 20 Hz aproximadamente para la casi totalidad de las máquinas. Por tanto el modelo reducido de tercer orden resulta apropiado para representar transitorios producidos por perturbaciones en frecuencia. Además se observa una gran uniformidad en las frecuencias límites obtenidas para las distintas máquinas, no observándose cambios sustanciales entre las distintas funciones de transferencia. En la tabla 5.3.1 se muestra las frecuencias límites para distintas máquinas en el caso del modelo de tercer orden.

Para los modelos de primer y segundo orden las frecuencias límites van desde 1-7 Hz dependiendo de la máquina. El amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema indican como de bueno será el modelo reducido comparado con el modelo completo. Se puede obtener una relación entre estas magnitudes y la correspondiente frecuencia límite. En Fig. 5.3.1 se muestra, además de las frecuencias límites obtenidas, una regresión múltiple lineal función del

amortiguamiento δ y la frecuencia propia del sistema. Como se puede observar los la regresión mediante mínimos cuadrados aproxima bien los resultados obtenidos mediante simulación. En Fig. 5.3.1 se ha mostrado el caso del módulo de la intensidad estática para el modelo de segundo orden.

Tabla 5.3.1. Frecuencias límites del modelo de tercer orden perturbaciones en frecuencia

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta f$	$\Delta P/\Delta f$	$\Delta Q/\Delta f$	$\Delta Te/\Delta f$	$\Delta \omega/\Delta f$
1	0.42	14.7	22.0	20.0	<1	21.0	21.0
2	0.29	12.1	23.0	21.0	17.0	22.0	22.0
3	0.28	10.4	24.0	22.0	17.0	23.0	24.0
4	0.44	8.6	25.0	22.0	20.0	24.0	25.0
5	0.53	6.5	26.0	24.0	24.0	26.0	26.0
6	0.30	10.5	25.0	23.0	19.0	24.0	25.0
7	0.23	8.2	26.0	24.0	22.0	26.0	26.0
8	0.21	8.0	27.0	24.0	23.0	26.0	26.0
9	0.27	8.1	27.0	25.0	22.0	26.0	26.0
10	0.17	7.4	27.0	25.0	25.0	27.0	27.0
11	0.25	8.1	27.0	25.0	23.0	26.0	26.0
12	0.21	6.4	27.0	25.0	28.0	27.0	27.0
13	0.21	6.2	27.0	25.0	28.0	27.0	27.0
14	0.14	6.3	27.0	25.0	27.0	27.0	27.0
15	0.19	5.5	27.0	25.0	28.0	27.0	28.0
16	0.18	5.9	27.0	25.0	28.0	27.0	28.0
18	0.19	5.5	27.0	25.0	27.0	27.0	28.0
19	0.17	6.1	27.0	25.0	27.0	27.0	27.0
20	0.21	5.3	33.0	30.0	33.0	33.0	34.0
25	0.37	5.8	32.0	29.0	28.0	31.0	32.0
26	0.31	6.6	32.0	30.0	29.0	32.0	32.0
27	0.18	9.4	32.0	30.0	26.0	31.0	32.0
28	0.27	5.9	32.0	31.0	30.0	32.0	33.0
29	0.21	6.0	32.0	31.0	31.0	32.0	33.0
30	0.19	6.6	33.0	31.0	31.0	32.0	33.0
31	0.29	3.2	33.0	31.0	33.0	33.0	36.0

Tabla 5.3.2. Frecuencias límites del modelo de segundo orden perturbaciones en frecuencia

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta f$	$\Delta P/\Delta f$	$\Delta Q/\Delta f$	$\Delta Te/\Delta f$	$\Delta \omega / \Delta f$
1	0.42	14.7	7.0	7.0	1	7.0	7.0
2	0.29	12.1	6.0	6.0	5.0	6.0	6.0
3	0.28	10.4	5.0	6.0	2.0	6.0	6.0
4	0.44	8.6	4.0	5.0	3.0	5.0	5.0
5	0.53	6.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
6	0.30	10.5	5.0	6.0	2.0	5.0	6.0
7	0.23	8.2	4.0	4.0	1.0	4.0	4.0
8	0.21	8.0	4.0	4.0	1.0	4.0	4.0
9	0.27	8.1	4.0	4.0	1.0	4.0	4.0
10	0.17	7.4	3.0	4.0	1.0	3.0	3.0
11	0.25	8.1	4.0	4.0	1.7	4.0	4.0
12	0.21	6.4	3.0	3.0	1.7	3.0	3.0
13	0.21	6.2	3.0	3.0	1.7	3.0	3.0
14	0.14	6.3	3.0	3.0	0.7	3.0	3.0
15	0.19	5.5	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0
16	0.18	5.9	2.0	3.0	1.7	2.0	2.0
18	0.19	5.5	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0
19	0.17	6.1	2.0	3.0	1.7	3.0	3.0
20	0.21	5.3	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0
25	0.37	5.8	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0
26	0.31	6.6	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0
27	0.18	9.4	5.0	5.0	1.0	5.0	5.0
28	0.27	5.9	3.0	3.0	2.0	3.0	3.0
29	0.21	6.0	3.0	3.0	1.7	3.0	3.0
30	0.19	6.6	3.0	3.0	1.0	3.0	3.0
31	0.29	3.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

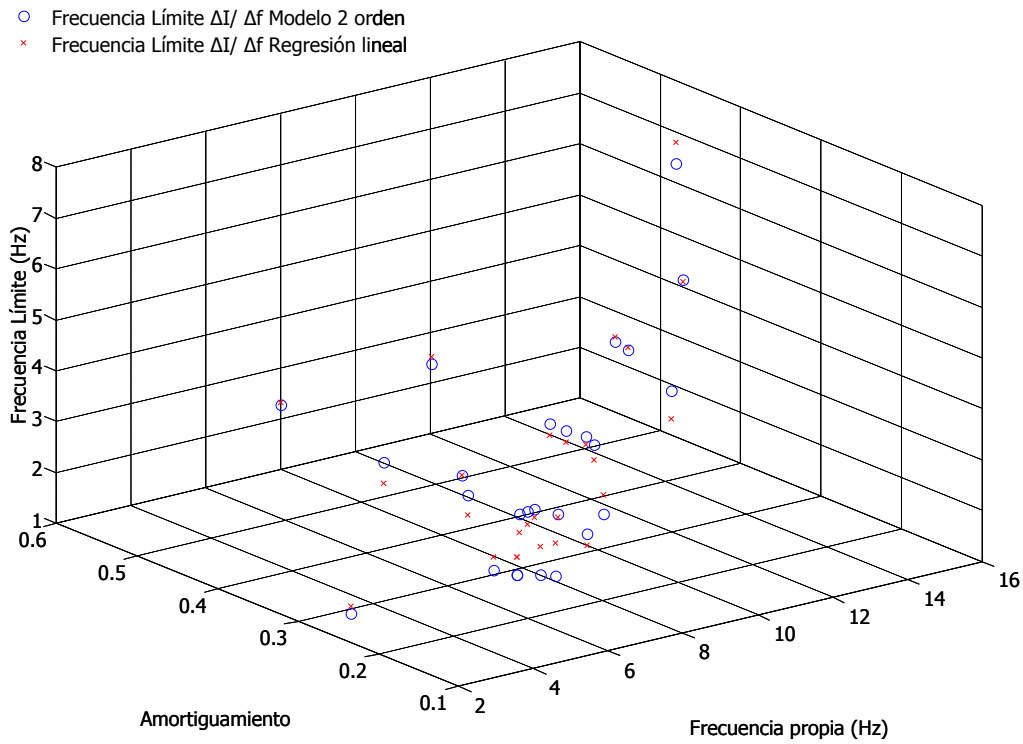


Figura 5.3.1. Frecuencias límites para la función de transferencia $\Delta I / \Delta f$ modelo de segundo orden y comparación con una regresión lineal

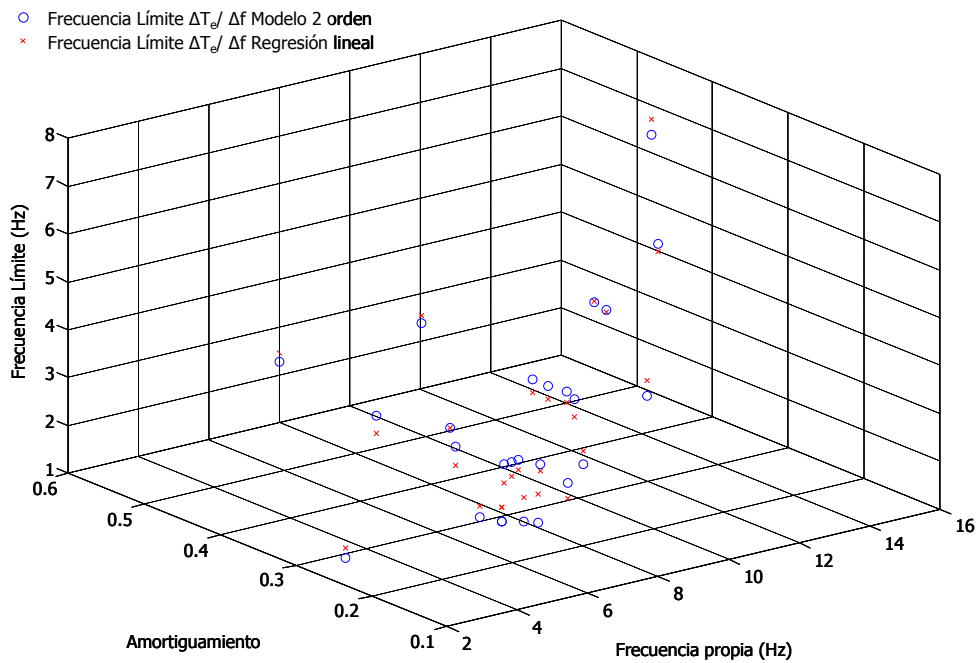


Figura 5.3.2. Frecuencias límites para la función de transferencia $\Delta T_e / \Delta f$ modelo de primer orden y comparación con una regresión lineal

Tabla 5.3.3. Frecuencias límites del modelo de primer orden perturbaciones en frecuencia

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta f$	$\Delta P/\Delta f$	$\Delta Q/\Delta f$	$\Delta Te/\Delta f$	$\Delta \omega / \Delta f$
1	0.42	14.7	<1	8.0	<1	7.0	7.0
2	0.29	12.1	<1	6.0	<1	6.0	6.0
3	0.28	10.4	<1	6.0	<1	5.0	5.0
4	0.44	8.6	<1	5.0	<1	4.0	4.0
5	0.53	6.5	<1	3.0	<1	3.0	3.0
6	0.30	10.5	<1	6.0	<1	5.0	5.0
7	0.23	8.2	<1	4.0	<1	4.0	4.0
8	0.21	8.0	<1	4.0	<1	4.0	4.0
9	0.27	8.1	<1	4.0	<1	4.0	4.0
10	0.17	7.4	<1	4.0	<1	3.0	3.0
11	0.25	8.1	<1	4.0	<1	4.0	4.0
12	0.21	6.4	<1	3.0	<1	3.0	3.0
13	0.21	6.2	<1	3.0	<1	3.0	3.0
14	0.14	6.3	<1	3.0	<1	3.0	3.0
15	0.19	5.5	<1	2.0	<1	2.0	2.0
16	0.18	5.9	<1	3.0	<1	2.0	2.0
18	0.19	5.5	<1	2.0	<1	2.0	2.0
19	0.17	6.1	<1	3.0	<1	2.0	2.0
20	0.21	5.3	<1	2.0	<1	2.0	2.0
25	0.37	5.8	2.0	3.0	<1	3.0	3.0
26	0.31	6.6	3.0	3.0	<1	3.0	3.0
27	0.18	9.4	0.0	5.0	<1	4.0	5.0
28	0.27	5.9	3.0	3.0	<1	3.0	3.0
29	0.21	6.0	3.0	3.0	<1	3.0	3.0
30	0.19	6.6	3.0	3.0	<1	3.0	3.0
31	0.29	3.2	1.7	1.0	<1	1.0	1.0

Para el caso del modelo de primer orden el rango de frecuencias de error aceptable está entre 1 y 5 Hz aproximadamente. Además tal y como se señaló en el capítulo 4, las funciones de transferencia que tienen un peor comportamiento son aquellas que son de fase no mínima. Concretamente las funciones de transferencia $\Delta T_e/\Delta f$ y $\Delta I/\Delta f$ son las que presentan unas menores frecuencias límites.

A igual que sucedía con el modelo reducido de segundo orden es posible ajustar una regresión lineal mediante mínimos cuadrados el cual es mostrado en la Fig. 5.3.2.

Los modelos de primer y segundo orden serán tanto mejor contra mayor sea el factor de amortiguamiento y mayor sea la frecuencia propia del sistema. O lo que sería lo mismo contra más parecido es el sistema a un sistema de segundo orden sobre-amortiguado o un sistema de primer orden

5.3.2. Respuesta a perturbaciones en tensión

Los resultados obtenidos para los distintos modelos muestran unas frecuencias límites elevadas para las funciones de transferencia $\Delta Q/\Delta u$, $\Delta Te/\Delta u$, $\Delta \omega / \Delta u$. Siendo las frecuencias límites obtenidas menores que las obtenidas para las perturbaciones en frecuencia.

Para este tipo de perturbaciones todos los modelos dan resultados muy similares siendo, como cabría esperar, el modelo de tercer orden el que tiene mayores frecuencias límites.

El modelo de primer orden ofrece un comportamiento poco adecuado para modelar transitorios debidos a perturbaciones en tensión. En la tabla 5.3.6 se observa que en gran cantidad de casos la frecuencia límite se encuentra por debajo de 1 Hz..

En las tabla 5.3.4, 5.3.5, 5.3.6 se muestran las frecuencias límites obtenidas para los distintos modelos y máquinas.

Al igual de cómo sucede en las perturbaciones en frecuencia es posible establecer una relación lineal entre amortiguamiento, frecuencia propia y la el correspondiente valor de frecuencia crítica. En la Fig.5.3.3 se muestra el caso concreto de $\Delta I/\Delta u$ para el modelo de segundo orden.

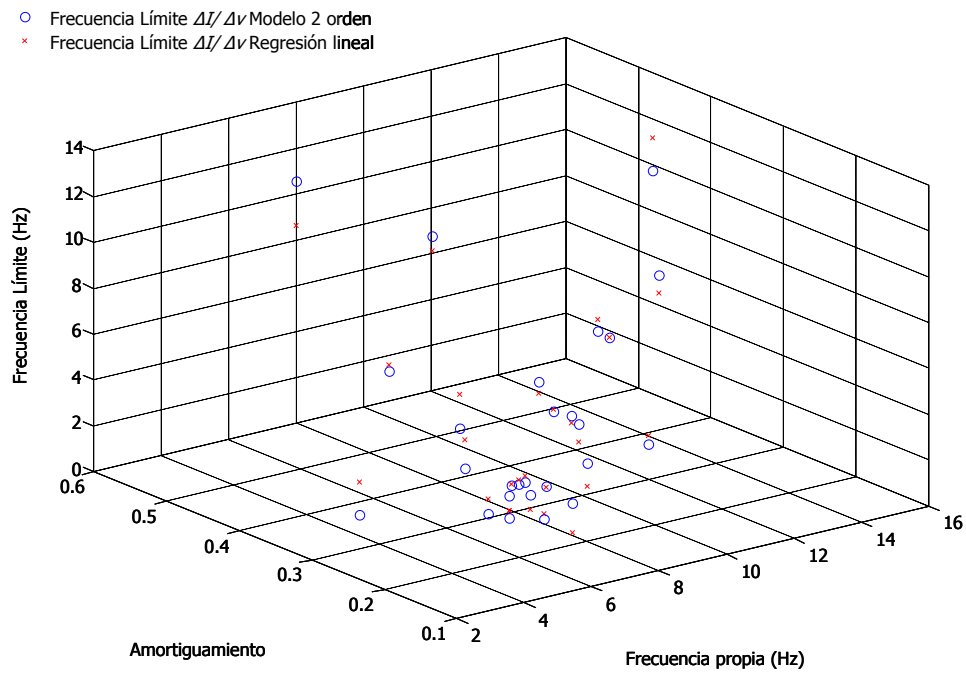


Figura 5.3.3. Frecuencias límites para la función de transferencia $\Delta I / \Delta u$ modelo de segundo orden y comparación con una regresión lineal

Tabla 5.3.4. Frecuencias límites del modelo de tercer orden perturbaciones en tensión

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta u$	$\Delta P/\Delta u$	$\Delta Q/\Delta u$	$\Delta Te/\Delta u$	$\Delta \omega / \Delta u$
1	0.42	14.7	13.0	7.0	22.0	7.0	7.0
2	0.29	12.1	11.0	6.0	23.0	5.0	5.0
3	0.28	10.4	9.0	6.0	24.0	5.0	5.0
4	0.44	8.6	11.0	5.0	24.0	5.0	5.0
5	0.53	6.5	10.0	5.0	26.0	5.0	5.0
6	0.30	10.5	9.0	6.0	25.0	5.0	5.0
7	0.23	8.2	7.0	5.0	27.0	4.0	4.0
8	0.21	8.0	7.0	4.0	27.0	4.0	4.0
9	0.27	8.1	7.0	4.0	27.0	4.0	4.0
10	0.17	7.4	6.0	4.0	27.0	4.0	4.0
11	0.25	8.1	7.0	4.0	26.0	4.0	4.0
12	0.21	6.4	7.0	5.0	28.0	4.0	4.0
13	0.21	6.2	6.0	4.0	27.0	4.0	4.0
14	0.14	6.3	5.0	3.0	27.0	3.0	3.0
15	0.19	5.5	6.0	4.0	28.0	4.0	4.0
16	0.18	5.9	6.0	4.0	27.0	4.0	4.0
18	0.19	5.5	7.0	5.0	28.0	4.0	4.0
19	0.17	6.1	6.0	4.0	27.0	4.0	4.0
20	0.21	5.3	8.0	5.0	34.0	5.0	5.0
25	0.37	5.8	7.0	5.0	30.0	5.0	5.0
26	0.31	6.6	7.0	5.0	31.0	4.0	4.0
27	0.18	9.4	7.0	5.0	32.0	4.0	4.0
28	0.27	5.9	6.0	4.0	31.0	4.0	4.0
29	0.21	6.0	5.0	4.0	32.0	3.0	3.0
30	0.19	6.6	5.0	4.0	32.0	3.0	3.0
31	0.29	3.2	4.0	3.0	33.0	3.0	3.0

Tabla 5.3.5. Frecuencias límites del modelo de segundo orden perturbaciones en tensión

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta u$	$\Delta P/\Delta u$	$\Delta Q/\Delta u$	$\Delta Te/\Delta u$	$\Delta \omega / \Delta u$
1	0.42	14.7	11.0	7.0	22.0	5.0	5.0
2	0.29	12.1	9.0	4.0	22.0	3.0	3.0
3	0.28	10.4	7.0	4.0	22.0	3.0	3.0
4	0.44	8.6	10.0	4.0	24.0	4.0	4.0
5	0.53	6.5	12.0	5.0	27.0	6.0	6.0
6	0.30	10.5	7.0	3.0	24.0	3.0	3.0
7	0.23	8.2	5.0	1.0	23.0	1.0	1.0
8	0.21	8.0	5.0	1.0	23.0	1.0	1.0
9	0.27	8.1	6.0	1.7	25.0	1.7	1.7
10	0.17	7.4	4.0	<1	20.0	<1	0.7
11	0.25	8.1	5.0	1.7	24.0	1.7	1.7
12	0.21	6.4	3.0	<1	20.0	0.7	0.7
13	0.21	6.2	3.0	<1	22.0	<1	0.7
14	0.14	6.3	3.0	<1	19.0	<1	<1
15	0.19	5.5	3.0	<1	20.0	<1	<1
16	0.18	5.9	3.0	<1	19.0	<1	<1
18	0.19	5.5	2.0	0.7	17.0	<1	<1
19	0.17	6.1	2.0	<1	17.0	<1	<1
20	0.21	5.3	2.0	<1	24.0	<1	<1
25	0.37	5.8	6.0	3.0	29.0	3.0	3.0
26	0.31	6.6	4.0	2.0	29.0	1.7	2.0
27	0.18	9.4	4.0	1.0	27.0	1.0	1.0
28	0.27	5.9	3.0	1.0	29.0	1.0	1.0
29	0.21	6.0	3.0	0.7	29.0	0.7	0.7
30	0.19	6.6	3.0	0.7	29.0	0.7	0.7
31	0.29	3.2	1.7	<1	32.0	<1	<1

Tabla 5.3.5. Frecuencias límites del modelo de primer orden perturbaciones en tensión

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta u$	$\Delta P/\Delta u$	$\Delta Q/\Delta u$	$\Delta Te/\Delta u$	$\Delta \omega / \Delta u$
1	0.42	14.7	<1	<1	5.0	5.0	5.0
2	0.29	12.1	<1	<1	3.0	3.0	3.0
3	0.28	10.4	<1	<1	3.0	3.0	3.0
4	0.44	8.6	<1	<1	4.0	4.0	4.0
5	0.53	6.5	<1	<1	4.0	4.0	4.0
6	0.30	10.5	<1	<1	3.0	3.0	3.0
7	0.23	8.2	<1	<1	1.7	1.7	1.7
8	0.21	8.0	<1	<1	1.0	1.0	1.0
9	0.27	8.1	<1	<1	2.0	2.0	2.0
10	0.17	7.4	<1	<1	0.7	0.7	0.7
11	0.25	8.1	<1	<1	2.0	2.0	2.0
12	0.21	6.4	<1	<1	0.7	0.7	0.7
13	0.21	6.2	<1	1.7	1.0	1.0	1.0
14	0.14	6.3	<1	<1	<1	<1	<1
15	0.19	5.5	<1	<1	<1	<1	<1
16	0.18	5.9	<1	<1	0.7	0.7	0.7
18	0.19	5.5	<1	<1	<1	<1	<1
19	0.17	6.1	<1	<1	<1	<1	<1
20	0.21	5.3	<1	<1	<1	<1	<1
25	0.37	5.8	<1	4.0	3.0	3.0	3.0
26	0.31	6.6	<1	3.0	2.0	2.0	2.0
27	0.18	9.4	<1	<1	1.7	1.7	1.7
28	0.27	5.9	<1	2.0	1.7	1.7	1.7
29	0.21	6.0	<1	1.7	1.0	1.0	1.0
30	0.19	6.6	<1	1.7	1.0	1.0	1.0
31	0.29	3.2	<1	1.7	1.0	1.0	1.0

5.3.3. Respuesta a perturbaciones en par

Las perturbaciones de par es sin duda el tipo de perturbación en los que los modelos reducidos producen las respuestas más próximas al sistema completo.

En la tabla 5.3.5 se muestran las frecuencias límites correspondientes al modelo de tercer orden. Como se puede observar el modelo es capaz de reproducir con error inferior al 10% todo el rango de frecuencias calculado (hasta 40 Hz). Es este por tanto un modelo óptimo para usarlo por ejemplo en el análisis de transitorios de turbinas eléctricas pues añade un grado de simplicidad sin reducir la exactitud. En el capítulo 6 se analizará convenientemente la interacción de turbinas eólicas y generadores comparando los diversos modelos reducidos.

Respecto a los modelos reducidos de primer y segundo orden ambos presenta frecuencias límites entre el 1 y 8 Hz, siendo las funciones $\Delta\omega/\Delta T$, $\Delta Q/\Delta T$ las que presentan frecuencias límites por debajo de 1 Hz lo que hace a estos modelos inadecuados para estudiar estas dinámicas.

En la figura 5.3.4 se muestra la función de respuesta del par electromecánico para distintos modelos. Se puede observar como los modelos reducidos de primer y segundo siguen al modelo de quinto de orden con exactitud para bajas frecuencias, lejos de la frecuencia de resonancia. Como se verá a continuación la frecuencia límite será mayor cuanto mayor sea la frecuencia de resonancia (para amortiguamientos menores que 1 la frecuencia propia y la frecuencia de resonancia son aproximadamente iguales).

Tabla 5.3.5. Frecuencias límites del modelo de tercer orden perturbaciones en par

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta T$	$\Delta P/\Delta T$	$\Delta Q/\Delta T$	$\Delta Te/\Delta T$	$\Delta \omega / \Delta T$
1	0.42	14.7	29.0	29.0	19.0	31.0	40.0
2	0.29	12.1	32.0	33.0	18.0	35.0	40.0
3	0.28	10.4	35.0	36.0	19.0	38.0	40.0
4	0.44	8.6	36.0	38.0	19.0	40.0	40.0
5	0.53	6.5	40.0	40.0	26.0	40.0	40.0
6	0.30	10.5	40.0	40.0	22.0	40.0	40.0
7	0.23	8.2	40.0	40.0	27.0	40.0	40.0
8	0.21	8.0	40.0	40.0	31.0	40.0	40.0
9	0.27	8.1	40.0	40.0	26.0	40.0	40.0
10	0.17	7.4	40.0	40.0	38.0	40.0	40.0
11	0.25	8.1	40.0	40.0	28.0	40.0	40.0
12	0.21	6.4	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
13	0.21	6.2	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
14	0.14	6.3	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
15	0.19	5.5	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
16	0.18	5.9	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
18	0.19	5.5	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
19	0.17	6.1	40.0	40.0	39.0	40.0	40.0
20	0.21	5.3	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
25	0.37	5.8	40.0	40.0	28.0	40.0	40.0
26	0.31	6.6	40.0	40.0	32.0	40.0	40.0
27	0.18	9.4	40.0	40.0	35.0	40.0	40.0
28	0.27	5.9	40.0	40.0	35.0	40.0	40.0
29	0.21	6.0	40.0	40.0	38.0	40.0	40.0
30	0.19	6.6	40.0	40.0	39.0	40.0	40.0
31	0.29	3.2	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0

Tabla 5.3.6. Frecuencias límites del modelo de segundo orden perturbaciones en par

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta T$	$\Delta P/\Delta T$	$\Delta Q/\Delta T$	$\Delta Te/\Delta T$	$\Delta \omega / \Delta T$
1	0.42	14.7	8.0	8.0	8.0	8.0	2.0
2	0.29	12.1	6.0	6.0	6.0	6.0	1.0
3	0.28	10.4	5.0	5.0	5.0	5.0	0.7
4	0.44	8.6	4.0	4.0	4.0	4.0	1.0
5	0.53	6.5	3.0	3.0	3.0	3.0	0.7
6	0.30	10.5	5.0	5.0	5.0	5.0	0.7
7	0.23	8.2	4.0	4.0	4.0	4.0	<1
8	0.21	8.0	4.0	4.0	4.0	4.0	<1
9	0.27	8.1	4.0	4.0	4.0	4.0	<1
10	0.17	7.4	4.0	4.0	4.0	4.0	<1
11	0.25	8.1	4.0	4.0	4.0	4.0	<1
12	0.21	6.4	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
13	0.21	6.2	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
14	0.14	6.3	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
15	0.19	5.5	2.0	2.0	2.0	2.0	<1
16	0.18	5.9	2.0	2.0	2.0	2.0	<1
18	0.19	5.5	2.0	2.0	2.0	2.0	<1
19	0.17	6.1	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
20	0.21	5.3	2.0	2.0	2.0	2.0	<1
25	0.37	5.8	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
26	0.31	6.6	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
27	0.18	9.4	5.0	5.0	5.0	5.0	<1
28	0.27	5.9	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
29	0.21	6.0	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
30	0.19	6.6	3.0	3.0	3.0	3.0	<1
31	0.29	3.2	1.0	1.0	1.0	1.0	<1

Tabla 5.3.7. Frecuencias límites del modelo de primer orden perturbaciones en par

Máquina	δ	f (Hz)	Frecuencia Límite (Hz)				
			$\Delta I/\Delta T$	$\Delta P/\Delta T$	$\Delta Q/\Delta T$	$\Delta Te/\Delta T$	$\Delta \omega / \Delta T$
1	0.42	14.7	6.0	8.0	1.0	8.0	2.0
2	0.29	12.1	5.0	7.0	<1	6.0	1.0
3	0.28	10.4	5.0	6.0	<1	5.0	0.7
4	0.44	8.6	3.0	4.0	0.7	4.0	1.0
5	0.53	6.5	2.0	3.0	0.7	3.0	0.7
6	0.30	10.5	5.0	6.0	0.7	6.0	0.7
7	0.23	8.2	4.0	4.0	<1	4.0	<1
8	0.21	8.0	3.0	4.0	<1	4.0	<1
9	0.27	8.1	4.0	4.0	<1	4.0	<1
10	0.17	7.4	2.0	4.0	<1	4.0	<1
11	0.25	8.1	4.0	4.0	<1	4.0	<1
12	0.21	6.4	2.0	3.0	<1	3.0	<1
13	0.21	6.2	3.0	3.0	<1	3.0	<1
14	0.14	6.3	2.0	3.0	<1	3.0	<1
15	0.19	5.5	1.0	2.0	<1	2.0	<1
16	0.18	5.9	2.0	3.0	<1	3.0	<1
18	0.19	5.5	1.0	2.0	<1	2.0	<1
19	0.17	6.1	2.0	3.0	<1	3.0	<1
20	0.21	5.3	1.7	2.0	<1	2.0	<1
25	0.37	5.8	2.0	3.0	<1	3.0	<1
26	0.31	6.6	3.0	3.0	<1	3.0	<1
27	0.18	9.4	5.0	5.0	<1	5.0	<1
28	0.27	5.9	3.0	3.0	<1	3.0	<1
29	0.21	6.0	3.0	3.0	<1	3.0	<1
30	0.19	6.6	3.0	3.0	<1	3.0	<1
31	0.29	3.2	1.0	1.0	<1	1.0	<1

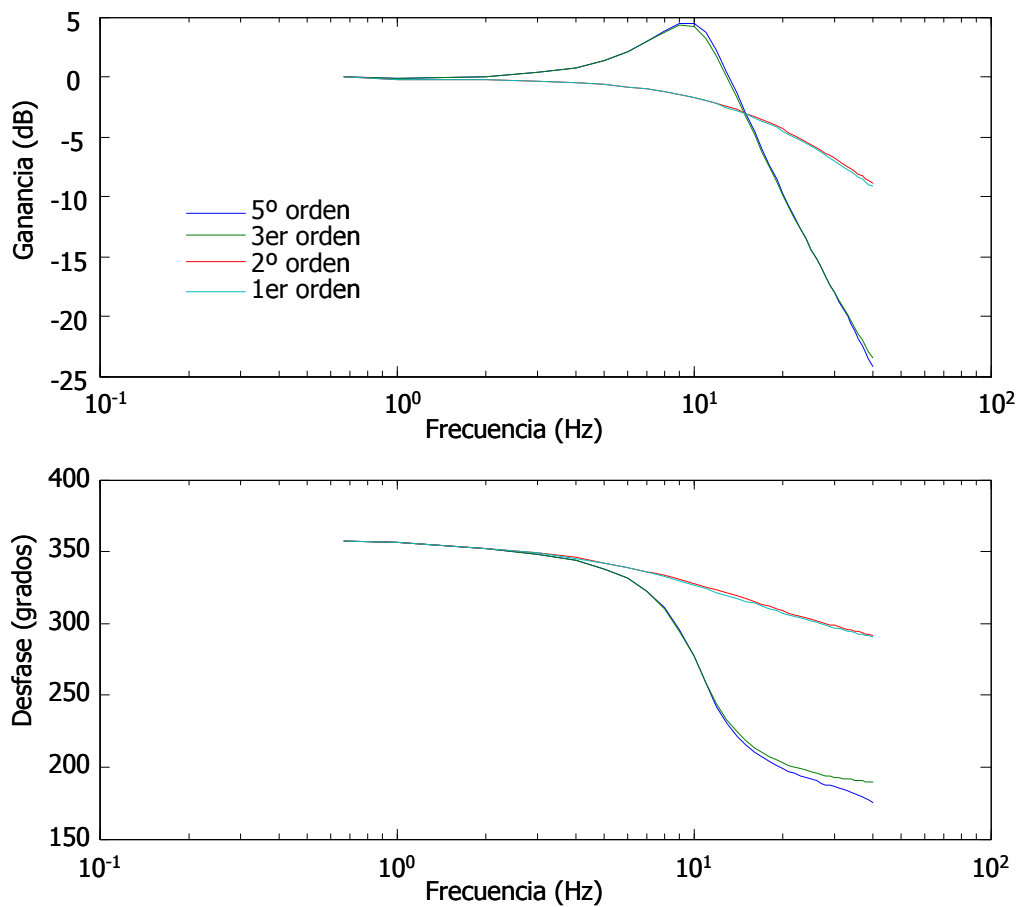


Figura 5.3.4. Función de transferencia $\Delta T_e / \Delta T_L$ máquina 6 (15kW)

Al igual que en el caso de las perturbaciones en frecuencia y tensión, a mayor valor de la frecuencia natural y del amortiguamiento mayor frecuencia límite para el modelo reducido. Además el amortiguamiento tiene una influencia determinante, a frecuencias naturales similares el mayor amortiguamiento dará como resultado un modelo reducido de mayor validez. Es posible extraer y expresar esta tendencia mostrada mediante una regresión lineal de dos variables, expresando la frecuencia límite de cada máquina en función de la frecuencia natural y el amortiguamiento. En Fig. 5.3.5 y 5.3.6 se muestran como el ajuste de la regresión lineal se aproxima con exactitud a los valores obtenidos mediante simulación de las distintas frecuencias límites. Los puntos rojos corresponden a los valores calculados mediante el plano de regresión lineal. En este caso concreto la expresión de la regresión lineal sería la siguiente:

$$f_{l_{Te}} = -0.528 - 0.152\delta + 0.602f \quad (5.5)$$

El ajuste de la regresión lineal en función de la variables amortiguamiento y frecuencia natural predice con una buena exactitud el rango de validez del modelo reducido de primer orden. Aunque se obvió en los casos anteriores en la Fig. 5.3.6 se muestra el plano correspondiente a la regresión lineal para más claridad. Se

muestran dos vistas para que se pueda apreciar el ajuste de la nube de puntos al plano calculado mediante la regresión lineal.

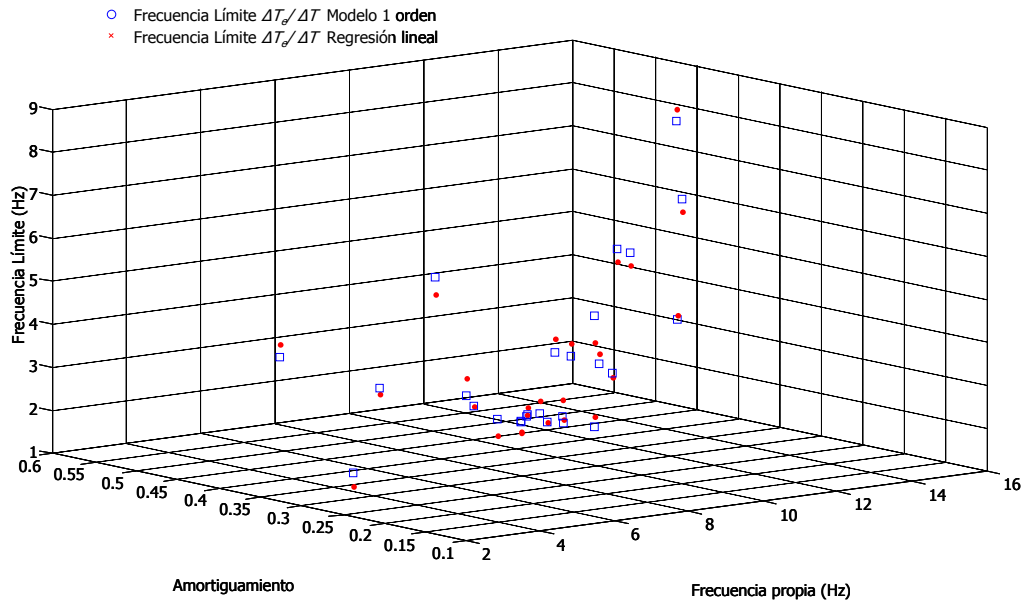


Figura 5.3.5. Frecuencias límites para la función de transferencia $\Delta T_e / \Delta T_L$ modelo de primer orden y comparación con una regresión lineal

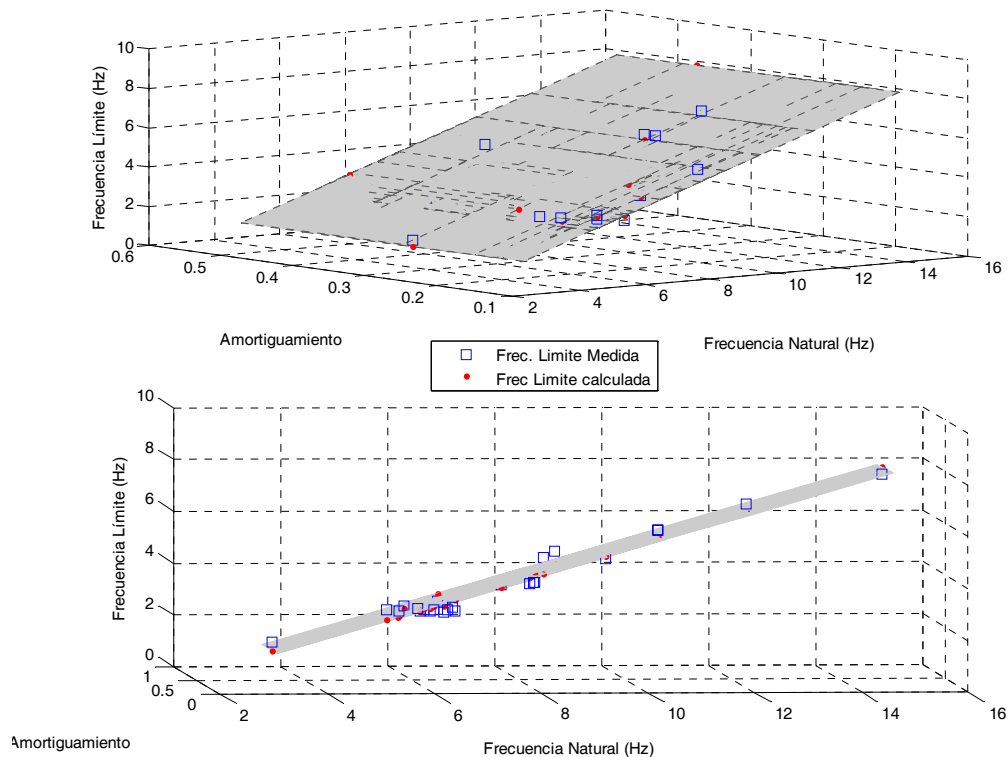


Figura 5.3.6. Representación del plano regresión lineal para la función de transferencia $\Delta T_Q/\Delta T_L$ en el modelo de primer orden.

5.4. Conclusiones

Dependiendo de la perturbación y la señal de respuesta a estudiar es posible emplear modelos reducidos teniendo como techo máximo de error el 10% comparado con el modelo completo.

Los resultados muestran que el modelo de tercer orden es mejor que el de segundo y primer orden. No siendo el de segundo orden significativamente más exacto que el de primer orden.

A la vista de los resultados obtenidos y para el modelo de primer orden para las funciones de transferencia $\Delta P/\Delta f$, $\Delta T_Q/\Delta f$, $\Delta \omega/\Delta f$, $\Delta I/\Delta T$, $\Delta P/\Delta T$, $\Delta Q/\Delta T$, $\Delta T_Q/\Delta T$ se tienen un comportamiento aceptable siempre por encima de un mínimo 1 Hz para todas las máquinas. En el caso de perturbaciones en tensión el modelo de primer orden no resulta adecuado en un gran número de máquinas y funciones de transferencia.

El modelo de segundo orden tiene frecuencias límites por encima de 1 Hz para las perturbaciones en frecuencia. Además el este modelo tiene unas frecuencias límites muy similares a las del modelo de tercer orden para el caso de perturbaciones en tensión. En el caso de perturbaciones de par este modelo tienes frecuencias límites entre 1 y 8 Hz excepto en el caso de la de la función de

transferencia $\Delta\omega/\Delta T$ que presenta un comportamiento alejado del modelo completo.

En los modelos de primer y segundo orden es posible relacionar el amortiguamiento y frecuencia propia con las frecuencias límites mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados. La cual deja entrever la dependencia que tiene la frecuencia límite con estos parámetros. Sistemas con alto valor de amortiguamiento y frecuencia propia son candidatos idóneos a ser representados mediante un modelo reducido.

Como se puede observar en las tablas anteriores,. En líneas generales se puede concluir que el modelo de tercer orden es una buena elección en análisis de sistemas potencia, debido a su correcta capacidad para predecir la respuesta en potencia reactiva a las perturbaciones de frecuencia y tensión. También tiene un buen comportamiento ante perturbaciones en par por lo que es un modelo adecuado para la descripción de transitorios turbina-generador. En cuanto a los modelos de primer y segundo orden su uso o no deberá ser analizada convenientemente dependiendo, además de la precisión deseada, de diversos factores como pueden ser el tipo máquina, las perturbaciones esperadas y respuestas necesarias.

