



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

DINÁMICA TORSIONAL EN GENERADORES DIESEL: EFECTOS DE LAS VARIACIONES DE CARGA

Burgos, G. E. ⁽¹⁾, Casarotto, C.F. ⁽¹⁾, Kruger, H. M. ⁽¹⁾, Labriola, C. ^(*) ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires N° 1400, CP: 8300, Neuquén, Argentina.

^(*) carloslabriola54@yahoo.com.ar

RESUMEN

En la actualidad, la utilización de equipos de generación diesel autónomos, ya sea como fuente principal de energía o de respaldo, tienen frecuentes aplicaciones tanto en las actividades industriales metalúrgicas como las enfocadas a la industria energética del petróleo & gas. Esto obliga a que el diseño de los equipos de generación diesel, contemplen altas exigencias orientadas a la mejora continua y funcionamiento confiable durante la prestación de sus servicios. Es por tal motivo que es necesario realizar un análisis integral para reconocer los fenómenos que se presentan durante la operación en régimen permanente y transitorio de los equipos e identificar cualitativamente como afecta la eficiencia, confiabilidad y calidad de los mismos.

El objetivo principal del trabajo es estudiar el comportamiento dinámico de generadores diesel, frente a diferentes tipos de cargas eléctricas, tanto estáticas como dinámicas, y cuyos efectos derivan en la generación de oscilaciones torsionales sobre el eje de los mismos, que pueden producir fatiga tanto en el árbol de transmisión como en los acoplamientos a largo plazo. El trabajo persigue como finalidad adicional dar información práctica de partida, para todos los lectores que decidan incorporar mejoras en el diseño de los sistemas de control de velocidad, optimizar los sistemas de control de amortiguamiento mecánico, implementar adecuados planes de mantenimiento preventivo y/o predictivo y mejorar el diseño estructural tanto de los acoples como los ejes de estas unidades. Estas mejoras permitirían aumentar tanto la confiabilidad como la calidad del servicio que los mismos prestan en diferentes sectores industriales.

Palabras Claves: Dinámica torsional, Unidad de generación diesel, Variaciones de carga, DigSilent, Mantenimiento.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. Introducción

El presente trabajo se enfoca a estudiar de forma simple la dinámica torsional de las unidades autónomas diesel, analizando los efectos electromecánicos más significativos que impactan gravemente sobre la vida útil del eje acoplante del motor diesel-generador sincrónico. En una oscilación torsional producida por variaciones de carga en el generador, la frecuencia, que varía según la carga alimentada, puede aproximarse a la frecuencia natural propia del eje estableciéndose un modo vibracional sostenido en el tiempo y con incrementos importantes de su magnitud. Tal condición de resonancia dará origen a esfuerzos torsionales inapropiados y a esfuerzos de cortes que someterán peligrosamente al eje de vinculación mecánica. Para efectuar el estudio del efecto transitorio electromecánico citado, se utiliza la herramienta de simulación y cálculo integral de sistemas de energía eléctrica DigSilent Power Factory.

2. La unidad electrógena

Los grupos electrógenos básicamente están formados por un conjunto integrado que contiene un motor térmico primario (turbina de gas, motor c/ciclo Otto o Diesel), un generador eléctrico (generalmente de corriente alterna) acoplado en el mismo eje y los correspondientes elementos auxiliares y sistemas complementarios, como los distintos indicadores de estado, tableros de maniobra, tanques, radiadores, circuitos de lubricación, combustible, agua y eventualmente aire comprimido; excitatrices, cargadores de baterías, equipos de control de tensión y frecuencia, automatismos de transferencia, protecciones, etcétera. Se puede ver esquema en Figura 1.

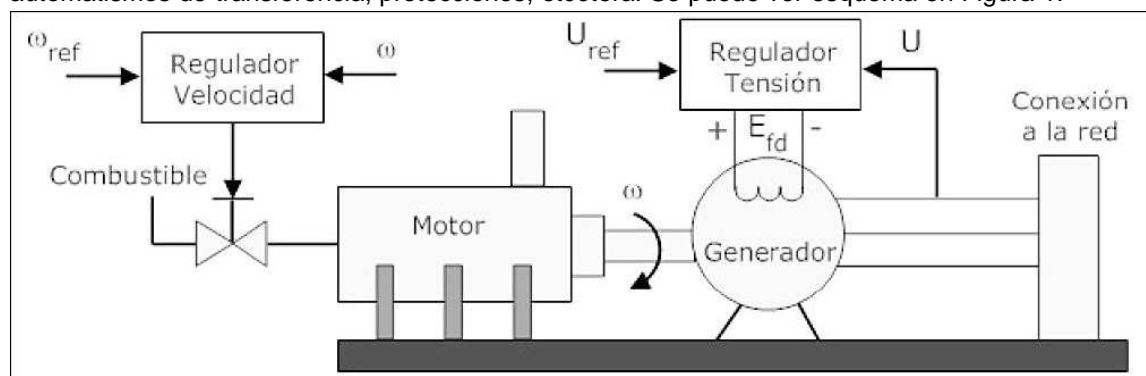


Figura 1: Esquema de un grupo electrógeno diesel y sus sistemas de control asociados.

El regulador de velocidad del motor (GOV) es un dispositivo electromecánico enlazado a un transductor, diseñado para mantener una velocidad constante del motor independientemente de los requisitos de la carga y a los cambios que existan en ésta. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del generador sincrónico (frecuencia sincrónica), por lo que cualquier variación de la velocidad afectará la frecuencia de la potencia de salida. Debido a la imposibilidad de obtener datos reales del regulador para grupos electrógenos



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

de mediana y baja potencia, se utilizaron criterios de sintonización tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, a fin de modelar el regulador del motor de referencia. Es de importancia recordar nuevamente que aquí solo se pretende realizar estudios demostrativos acerca del efecto de la *dinámica torsional*, para obtener resultados que sirvan de base informativa para futuros lectores interesados en avanzar más en el tema.

El control de la tensión que suministra el generador se consigue con un regulador automático de tensión (RAT o AVR). Para implementar tanto el regulador de velocidad (GOV) como el sistema de regulación de tensión (AVR) del generador en el simulador *DigSilent*, se utilizó una función de transferencia de lazo cerrado que reúne íntegramente y de manera simultánea las acciones de control. Dicha función consta de un proporcional, un integral y un derivativo, propio de un compensador o regulador PID genérico.

3. Transmisión mecánica

Una forma de representar la inercia del grupo electrógeno es a través de un modelo concentrado, donde se considera una sola masa para representar la suma de las inercias del motor diesel y del generador. Si bien esta manera es aceptada para el estudio de condiciones de estado estable, resulta sin embargo insuficiente a la hora de tener en cuenta las variaciones transitorias. La interacción electromecánica torsional en el eje genera fluctuaciones en la tensión, corriente y velocidad del generador entre otros parámetros. Por lo tanto, para representar todas estas fluctuaciones y evidenciar con mayor intensidad la relación inherente entre los transitorios electromecánicos y electromagnéticos ocurridos en la unidad, se considera un modelo de dos masas parciales concentradas. Siguiendo las consideraciones del documento de referencia [8], se representa por separado la mayor inercia del motor diesel y la pequeña inercia del generador síncrono en Figura 2.

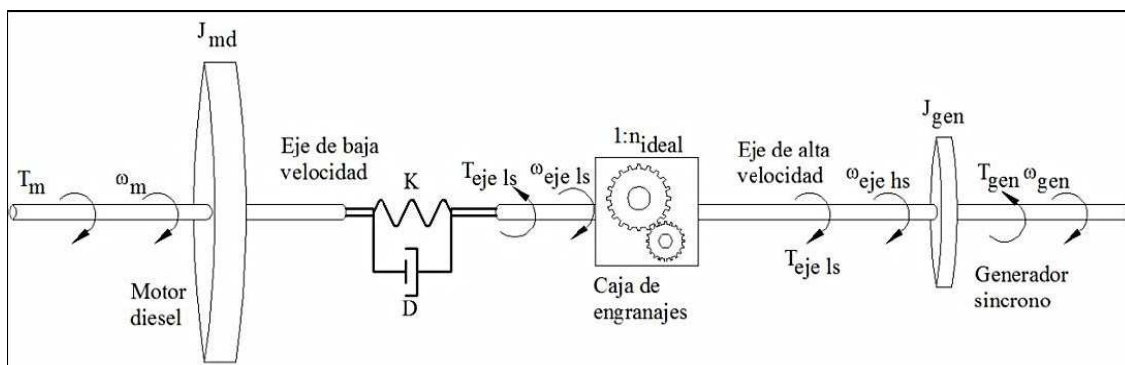


Figura 2: Modelo mecánico del eje de la unidad.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Cabe destacar que el modelo de eje de dos masas concentradas, cuyo medio mecánico de vinculación no es rígido, es admisible en los estudios transitorios y permite disminuir la complejidad y cantidad de ecuaciones diferenciales que darán origen al modelo final. Además se considera el efecto de la inercia de la caja de transmisión (correspondiente a las masas de los engranajes) adicionadas a las inercias de las masas concentradas del motor diesel y generador síncrono, sin incurrir en errores significativos. En el caso de unidades electrógenas sin caja de transmisión (gear box) y con acople directo entre motor primario y generador síncrono, podrá omitirse la misma del modelo de eje de transmisión, adoptando una relación de transmisión 1:1 para las ecuaciones diferenciales del modelo. El eje de baja velocidad es modelado como un resorte de constante de rigidez "K" y un amortiguador con un coeficiente "D", mientras que el eje de alta velocidad se considera rígido para no complicar aún más a las ecuaciones diferenciales que darán origen al modelo mecánico. Las ecuaciones diferenciales del modelo del eje se consideran lineales, bajo la hipótesis de que el material se comporta en régimen elástico ante los distintos tipos de cargas de servicio a la que está expuesto. Por lo tanto, esta condición hace factible aplicar las ecuaciones diferenciales lineales que modelan el comportamiento dinámico del eje, de acuerdo con la Ley de Hooke y de la mecánica de Newton; en las que pueden también integrarse todas las amortiguaciones pertinentes al sistema de transmisión.

4. Casos de estudio

En la figura siguiente, se muestra un diagrama unifilar del sistema bajo estudio, tal cual lo muestra la ventana de trabajo del simulador. Como se puede apreciar, se probaron diferentes cargas posibles, con especial atención al motor de inducción.

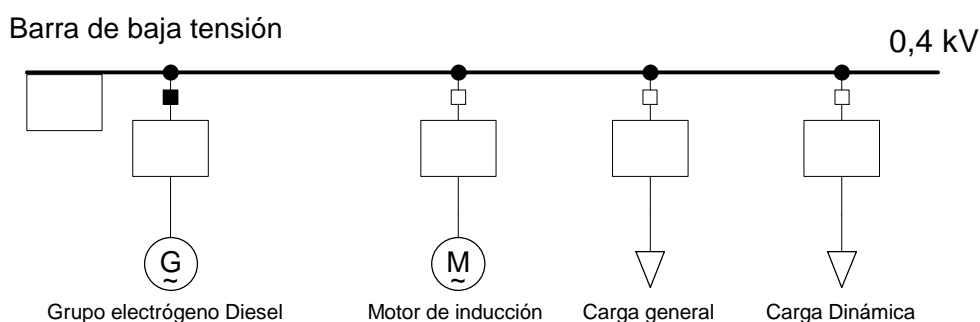


Figura 3: Red unifilar del grupo electrógeno diesel y de las cargas eléctricas de estudio.

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones de testeo previas, se observa que la pieza crítica y objeto de interés en la unidad electrógena, será el eje mecánico de vinculación motor diesel-generador síncrono, modelado tal cual se describió en el apartado anterior. Una vez definidos los aspectos relevantes de este estudio, se pretende formar una base de datos



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

congruentes que brinden información significativa y fehaciente para aquellos que necesiten estas herramientas y/o continúen con este trabajo.

Se consideraron para este estudio dos casos diferenciados. Por un lado la conexión y arranque de un motor de inducción típico, evento denominado simplemente caso de motor de inducción, y por otra parte, se contempló la operación conjunta y sincronizada de las cargas de estudio señaladas como general y dinámica, cada una de las cuales poseerá una magnitud eléctrica de dimensiones tales que su operación colectiva implique la misma carga que la del motor de inducción. Para simplificar se denominó a este caso como evento de simulación "A".

5. Discusión de los resultados obtenidos

Para concluir con el presente trabajo y realizar una breve reseña acerca del objetivo con que fueron desarrolladas ambas simulaciones a las que se hicieron referencia, podemos destacar en primera instancia, que cuando la unidad diesel se encuentra fuertemente amortiguada ($D=1$ [p.u.]) el escenario más desfavorable con respecto a la incidencia de los *esfuerzos torsionales* se presenta durante la alimentación de la carga representada por el motor de inducción, cuyo caso se corresponden con las figuras 4 a 6 obtenidas de la simulación y mostradas al final del trabajo antes de las conclusiones. Esto se hace evidente cuando las mismas son comparadas con aquellas curvas resultantes del evento de simulación "A", cuyas curvas se omitieron para no complicar la lectura de este informe.

Las figuras mencionadas con anterioridad son representativas del efecto del transitorio electromagnético que implica el evento de conexión del motor de inducción y sus sollicitaciones electromecánicas que imponen sobre el eje mecánico de la unidad en estudio. A partir de las mismas, se pueden reconocer, las diferencias significativas que se producen en la torsión y velocidad mecánica en el eje cuando se tienen en cuenta las propiedades reales de amortiguación mecánica que existen en la unidad, tanto en el propio eje como en las masas rotatorias que componen al modelo de la transmisión mecánica implementado para la realización de este trabajo. Además se puede destacar que el factor de utilización y su variación aplicada al motor de inducción, origina un efecto poco significativo sobre análisis de la oscilación torsional en el eje, tanto con respecto al ángulo torsional, como a las velocidades variables durante el tiempo de simulación, (denominadas mecánicas en el eje del motor y eléctricas en el eje del generador).

A su vez, para ambos casos amortiguado y no amortiguado (sistema mecánico ideal), dentro de los primeros instantes posteriores a la conexión del motor de inducción, en el tiempo estipulado de 0,5 [s] para el evento de simulación en cuestión, se producen magnitudes de torsión y torque angular transitorios de importancia, que se atenúan a un valor de estado estable al final de lapso de tiempo propuesto para tal evento, esto se debe a la respuesta retardada de los reguladores de la unidad



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

(AVR y GOV) durante la transición desde el torque electromagnético inicial de vacío hasta el régimen de carga que afecta al generador de la unidad. Así también en base a los resultados arrojados por las simulaciones respectivas, se puede advertir, que la magnitud de dicha torsión angular será significativamente disminuida en la medida que las propiedades mecánicas de amortiguación de la unidad diesel se incrementen.

Finalmente se presenta una tabla comparativa con los resultados de los eventos simulados desde el punto de vista de la torsión angular.

Tabla 1: Tabla comparativa de resultados.

Evento de carga simulado			Caso	Situación	Comparación	
Evento de simulación del motor de inducción	F.u. 50 %		Unidad diésel amortiguada (D = 1 [p.u.])	Amplitud inicial de orden levemente inferior a los 0,014 [rads. mecánicos] que se estabiliza aproximadamente a 0,0146 [rads. mecánicos] hacia el final del tiempo de simulación.	Se evidencia un efecto despreciable, en la <i>oscilación torsional</i> del eje de la unidad diésel amortiguada (D=1 [p.u.]) cuando se varían y comparan los estados de carga del motor de inducción.	
	F.u. 100 %			Amplitudes y periodo de amortiguamiento de la <i>oscilación torsional</i> ídem al caso con factor de utilización del 50 % en el motor de inducción.		Oscilación torsional convergente hacia el final del tiempo de simulación estabilizándose en los 0,0146 [rads. mecánicos], para todos los estadios de carga en el motor de inducción.
Evento de simulación "A"	Carga general	P= 3,75 [kw] cosφ= 0,85		Amplitud inicial de orden inferior a los 0,014 [rads. mecánicos] que decae a 0,0095 [rads. mecánicos] aproximadamente hacia el final del tiempo de simulación.	Se evidencia un impacto significativamente menor en eje, dado que la amplitud promedio de la <i>oscilación torsional amortiguada</i> , al ser comparada con la del motor de inducción a plena carga es aproximadamente 65% menor.	
	Carga dinámica	P= 3,75 [kw] cosφ= 0,85		Periodo de amortiguamiento de la <i>oscilación torsional</i> en eje inferior a 15 [s], con longitudes de onda muy espaciadas.		<i>Oscilación torsional</i> convergente hacia el final del tiempo de simulación para ambos eventos estudiados
Evento de carga simulado				Caso	Situación	Comparación
Evento de simulación del motor de inducción	F.u. 50 %			Unidad diésel no amortiguada (D = 0 [p.u.])	Amplitud inicial de orden levemente superior a los 0,03 [rads. mecánicos] decreciente hacia el final del tiempo de simulación a un valor aproximado de 0,0148 [rads. mecánicos].	Se evidencia un efecto despreciable de la <i>oscilación torsional</i> en el eje de la unidad diésel no amortiguada (D=0 [p.u.]), cuando se varían y comparan los estados de carga del motor de inducción.
	F.u. 100 %		Amplitudes y periodo de amortiguamiento de la <i>oscilación torsional</i> ídem al caso con factor de utilización del 50 % en el motor de inducción.		<i>Oscilación torsional</i> convergente hacia el final del tiempo de simulación del evento estudiado, para todos los estadios de carga en el motor de inducción.	
Evento de simulación "A"	Carga general	P= 3,75 [kw] cosφ= 0,85	Amplitud inicial de orden levemente inferior a los 0,02 [rads. mecánicos] pero que se incrementa de forma no convergente hacia el final del tiempo de simulación.		Se evidencia un efecto significativamente menor en la <i>oscilación torsional</i> del eje, al comparar el impacto en carga del evento "A" frente al del motor de inducción a plena carga.	
	Carga dinámica	P= 3,75 [kw] cosφ= 0,86	Periodo de amortiguamiento de la <i>oscilación torsional</i> en eje, inexistente e indefinido durante el tiempo de simulación.			<i>Oscilación torsional</i> no convergente e inestable, en comparación al del caso del motor de inducción.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

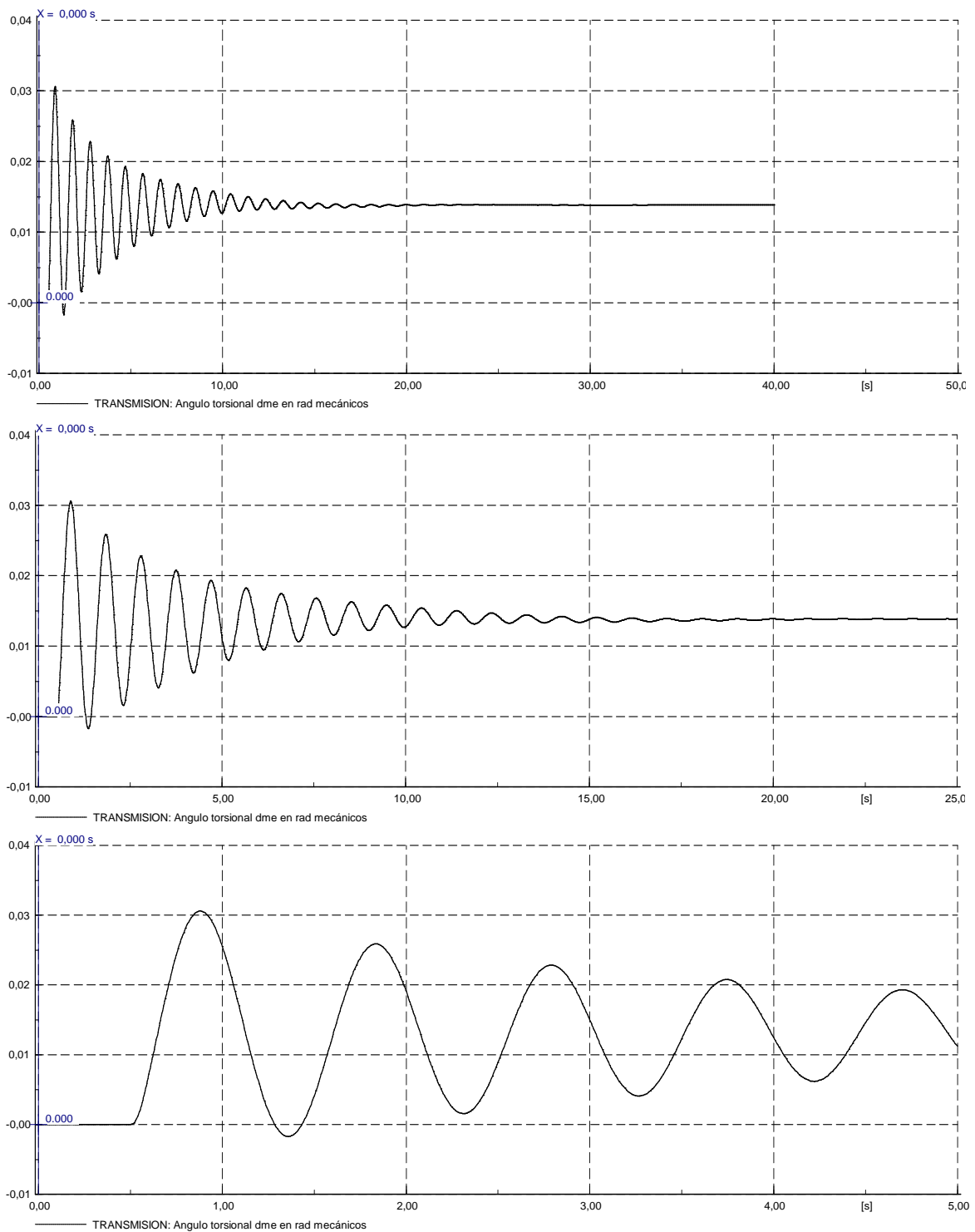


Figura 4: Torsión angular mecánica no amortiguada ($D=0$ [p.u.]) en eje de acoplamiento con 100 % de F.u.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

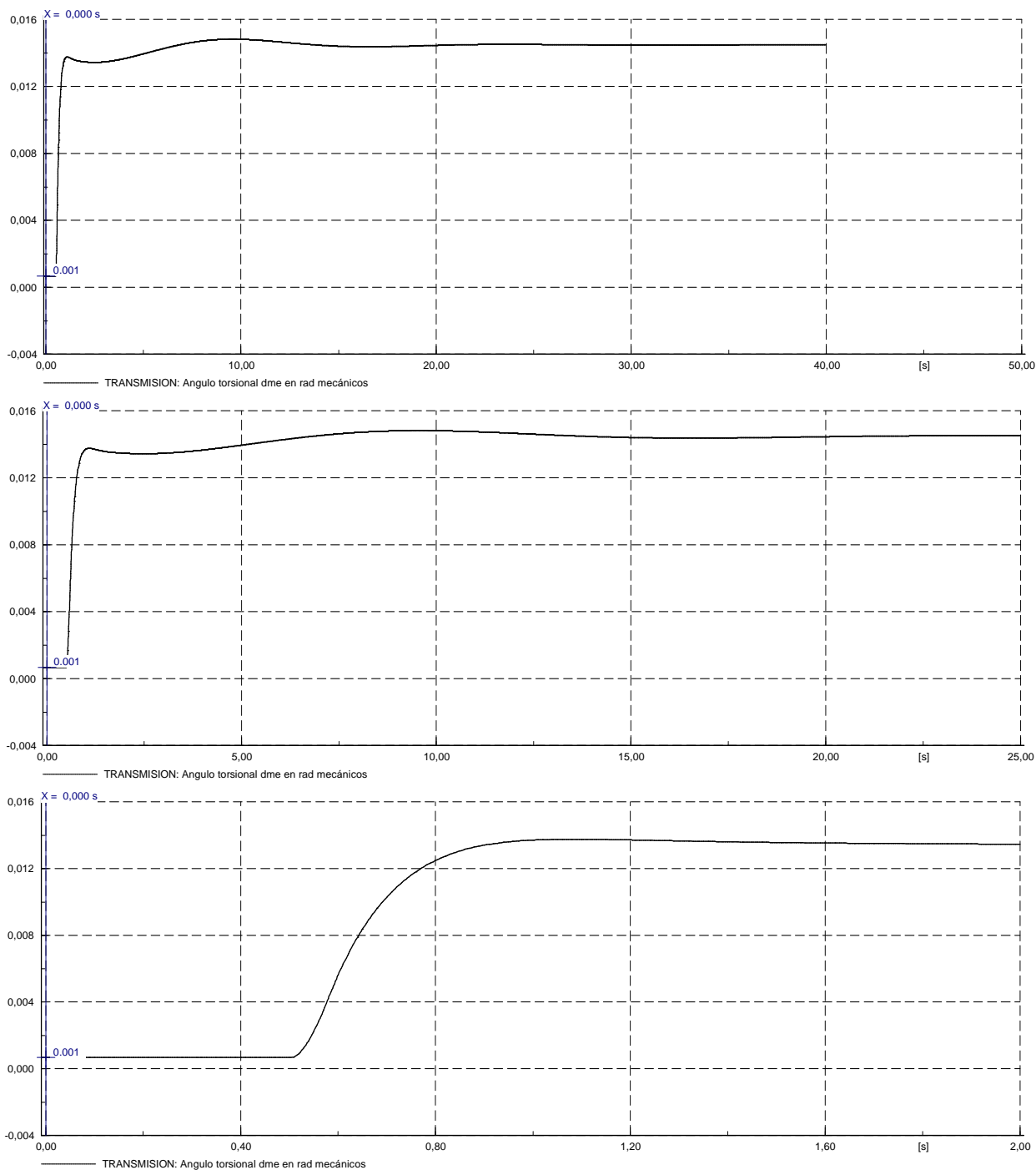


Figura 5: Torsión angular mecánica amortiguada ($D=1$ [p.u.]) en eje de acoplamiento con 100 % de F.u.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

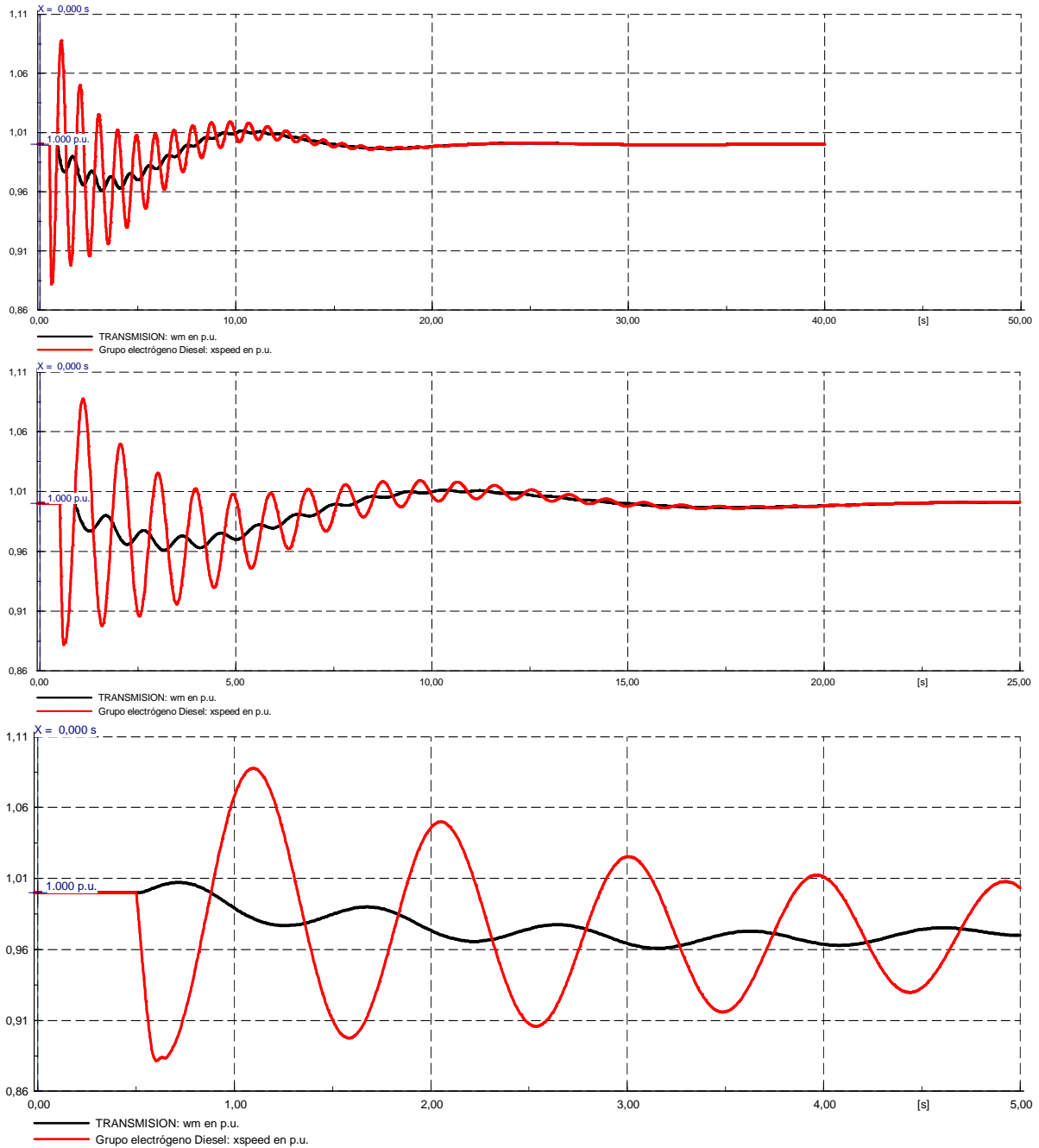


Figura 6: Velocidades mecánicas " w_m " y eléctricas " x_{speed} " de la unidad no amortiguada ($D=0$ [p.u.]) a un F.u. del 100%.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

6. Conclusiones

Los distintos casos de estudio con situaciones problemáticas típicas, nos permitió obtener resultados que evidenciaron los efectos nocivos de las variaciones de carga en la *dinámica torsional*. El caso de mayor relevancia sucede cuando se conectan motores de inducción trifásico a la unidad de generación diesel. La oscilación torsional a lo largo de la línea del eje, modifica notoriamente su amplitud, longitud de onda y periodo al variar las constantes de amortiguamiento "D". Sin embargo hay que aclarar que para realizar un estudio de la *dinámica torsional* de carácter *cuantitativo*, mejorando el modelo matemático del árbol de transmisión; se aconseja que se realicen los ensayos y mediciones en este último con instrumentos de deformación mecánica adecuados, que brinden los valores de los parámetros mecánicos de amortiguamiento "D" y rigidez elástica "K" con mayor grado de precisión. Cabe destacar que a su vez hay que cuantificar el efecto que provocan los reguladores de velocidad en estas unidades. Como alternativa, se sugiere la consulta de dichos datos al fabricante, previo a la compra de la unidad autónoma diesel, cuando no se disponga de instrumentos de medición afines.

7. Referencias

- [1] M. Mirosević, Z. Maljković, M. Milković - The Influence of Impact Load on Torsional Dynamics of Generator Units; 2011 IEEE Conference Publications.
- [2] J. C. Wachel, F. R. Szenasi - Analysis of torsional vibrations in rotating machinery; 2007 Engineering Dynamics Incorporated San Antonio, Texas.
- [3] M. Mirosević, Z. Maljković, M. Milković - Torsional Dynamics of Generator-Units during Autonomous Operation; 2007 IEEE Conference Publications.
- [4] E. F. Merrill - Torsional Dynamics of AC electrical machines & systems; 1994 Life Fellow IEEE Consulting Engineer Austin, Texas.-
- [5] C. Blome, M. De Bortoli, G. Stanic - Grid Fault Ride-Through Capabilities of Diesel-Electric Systems; XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010, Rome.-
- [6] D.N. Konidaris, Member, IEEE Public Power Corporation, Greece, J.A. Tegopoulos, Fellow, IEEE National Technical University of Athens, Greece - Sensitivity of torsional stress predictions of diesel Generator sets to critical parameter values; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, September 1996.
- [7] P. M. Anderson, B. L. Agrawal, J. E. Van Ness – Subsynchronous Resonance in Power Systems; 1989 Editorial Board.