

TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER: DEMOSTRACIÓN DIDÁCTICA SOBRE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES ELÉCTRICAS

Diego M. Ferreyra^{a,**}, Emanuel Bernardi^b, Omar D. Gallo^{c,*}

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco.
Avenida de la Universidad 501 (2400) San Francisco. Argentina.
<http://www.sanfrancisco.utn.edu.ar/>*

^a*GISEner (Grupo de Investigación Sobre Energía)*

^b*GIDE (Grupo de Investigación y Desarrollo Electrónico)*

^c*Grupo CIDEME (Cálculo, Investigación, Desarrollo y Ensayo de Máquinas Eléctricas)*

Resumen

En este trabajo, se presenta el diseño de una actividad didáctica destinada a estudiantes avanzados de Ingeniería Electrónica y de Ingeniería Electromecánica, con el fin de ilustrar los aspectos centrales de la distorsión armónica en redes eléctricas. Para la implementación de dicha actividad, se recurre a la realización de mediciones de laboratorio y de campo sobre las tensiones y corrientes en ciertos elementos claramente distorsionantes, como un control por ángulo de fase, la salida de un sistema de alimentación ininterrumpida, y hasta un inversor solar fotovoltaico con conexión a red. Además, de forma complementaria, se incluyen simulaciones numéricas y gráficas que abordan la reconstrucción de las señales distorsionadas sobre la base del comportamiento temporal-fasorial para distintos órdenes de armónicos. Se considera de interés esta actividad en virtud de su aplicación y reajuste durante cuatro ciclos lectivos consecutivos. Se destaca la importancia de rescatar y sistematizar el diseño de la actividad propuesta en lo que respecta a la selección de las magnitudes por medir, las comparaciones que se establecen y el orden en que se desarrollan las sucesivas etapas.

Palabras clave: transformada discreta de Fourier, distorsión armónica, calidad de energía, educación en ingeniería

1. Introducción

En las redes eléctricas actuales, la distorsión armónica constituye uno de los aspectos de régimen permanente más críticos en el ámbito de la calidad de la energía. También denominada contaminación armónica o polución armónica, la distorsión armónica consiste en que las formas de onda de las tensiones de una red se apartan de una senoide ideal. Típicamente, surge distorsión armónica en dichas tensiones debido a la circulación de corrientes distorsionadas consumidas por cargas no lineales o inyectadas por fuentes de generación distribuida no lineales. Los efectos nocivos de este fenómeno obligan a cuantificarlo a fin de imputar responsabilidades sobre los causantes y acotar su impacto con el diseño de medios de mitigación.

*Tutor

** Autor en correspondencia

Correo electrónico: dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar (Diego M. Ferreyra)

Una herramienta analítica eficiente para el estudio y caracterización de señales es la transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform, DFT*) [1], que permite obtener la distribución de energías sobre el espectro de frecuencias de una señal muestreada en el dominio del tiempo. Así, sobre la base de las señales involucradas en esta experiencia de laboratorio, se utiliza el algoritmo de la DFT para computar la magnitud y fase de las frecuencias que la componen. Como ejemplo de aplicación, se presenta la Fig. 1, donde la Fig. 1b contiene la magnitud de cada componente del espectro de la señal evaluada, que se observa en la Fig. 1a. Por tratarse de una señal cuasisinusoidal, correspondiente a una tensión habitual en las redes eléctricas, su descomposición espectral arroja valores de componentes armónicas casi insignificantes en relación con el valor de la fundamental.

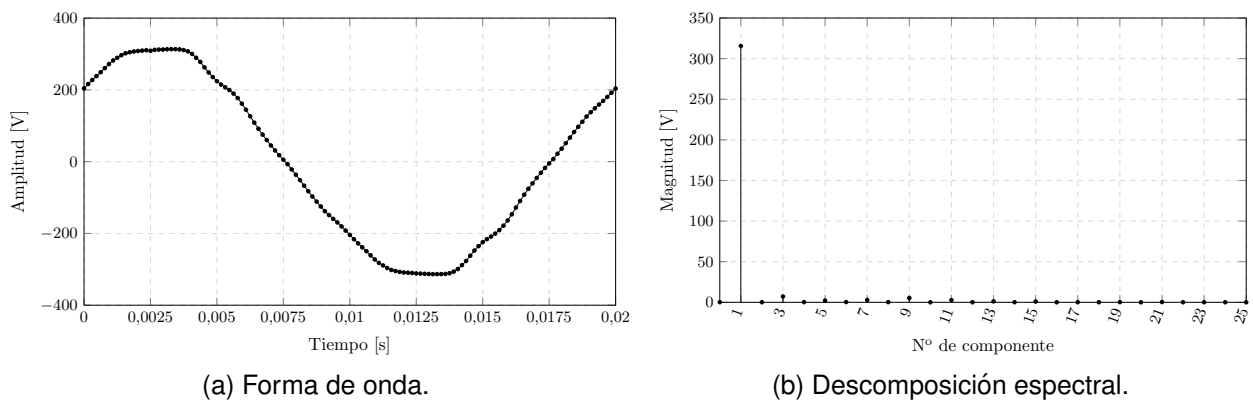


Figura 1: Tensión típica en una red eléctrica: señal cuasisinusoidal.

Las mediciones basadas en la DFT constituyen así un medio normalizado para la cuantificación requerida. Por lo general, se analizan frecuencias de hasta 63 veces la nominal, aunque la distorsión armónica total se calcula por norma con armónicas hasta el orden 40, y se acota la mayoría de los análisis a armónicas hasta el orden 25. Estos parámetros condicionan las especificaciones de las mediciones digitales relacionadas, que se orientan a describir fenómenos no lineales en las redes eléctricas. El ámbito de la calidad de energía en régimen permanente constituye así una aplicación práctica de la DFT valiosa para su visualización por estudiantes de grado de carreras de ingeniería afines a la temática.

2. Plan de clase propuesto

En la Fig. 2, se exhibe la disposición de los elementos involucrados en el ensayo de laboratorio propuesto en este trabajo con el formato de clase práctica.



Figura 2: Distintas disposiciones para el mismo ensayo

Según lo experimentado en sucesivas instancias de esta clase, se ha acordado la siguiente secuencia para el desarrollo de contenidos:

1. Breve puesta en contexto de la clase en el marco de la planificación de cada asignatura
2. Enumeración de los objetivos de la clase
3. Desarrollo de las mediciones sobre la disposición didáctica preparada y observación en línea de los parámetros medidos
4. Valoración adicional fuera de línea de las formas de onda y los parámetros registrados en las mediciones
5. Extrapolación de los criterios presentados al caso de las líneas eléctricas de distribución en baja tensión
6. Uso de animaciones didácticas para generalización de conceptos [2, 3, 4]
7. Resumen de la clase y provisión de los datos medidos

Seguendo criterios didácticos de uso común en el ámbito universitario [5], este plan de clase se considera adecuado para una comprensión inmediata por parte de los estudiantes. Naturalmente, se espera que la denominada etapa de fijación de los conocimientos por transferencia se produzca con una etapa adicional de trabajo fuera de clase [6]. Por lo tanto, se proporcionan a los estudiantes los datos medidos sin procesar, a fin de que ellos mismos puedan elaborarlos, graficarlos y ponderarlos por su cuenta. En las Figs. 3, 4 y 5, se muestran algunas de las formas de onda que se visualizan en el instrumental y que luego se procesan fuera de línea.

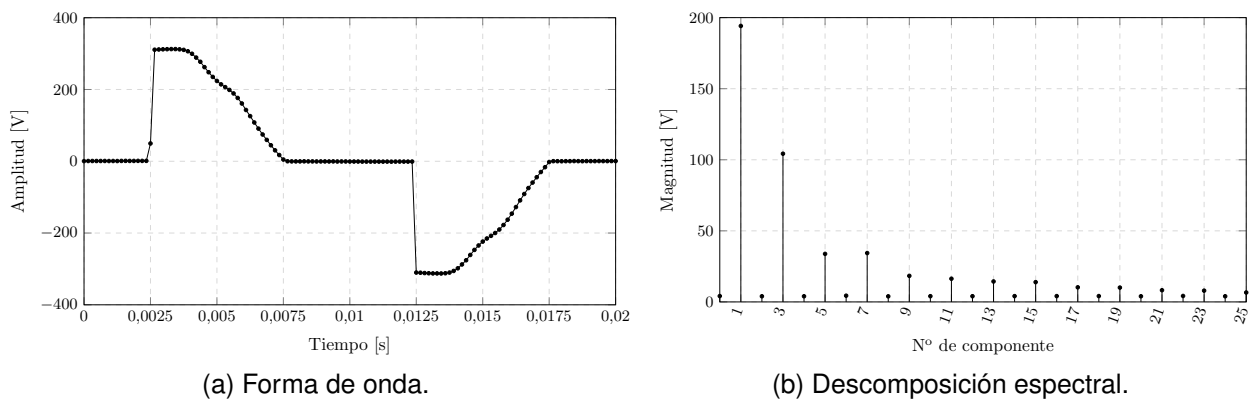


Figura 3: Tensión de salida de un sistema de control por ángulo de fase.

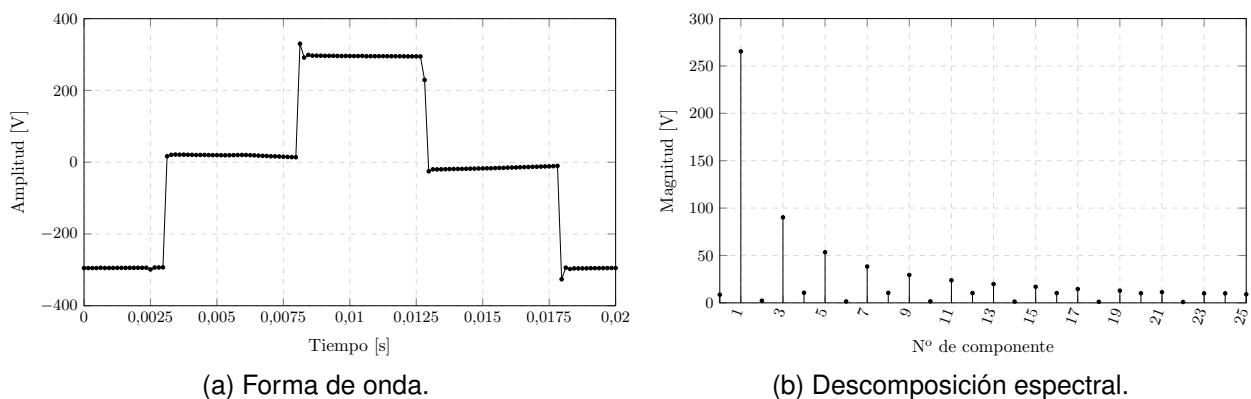


Figura 4: Tensión de salida de un sistema de alimentación ininterrumpida.

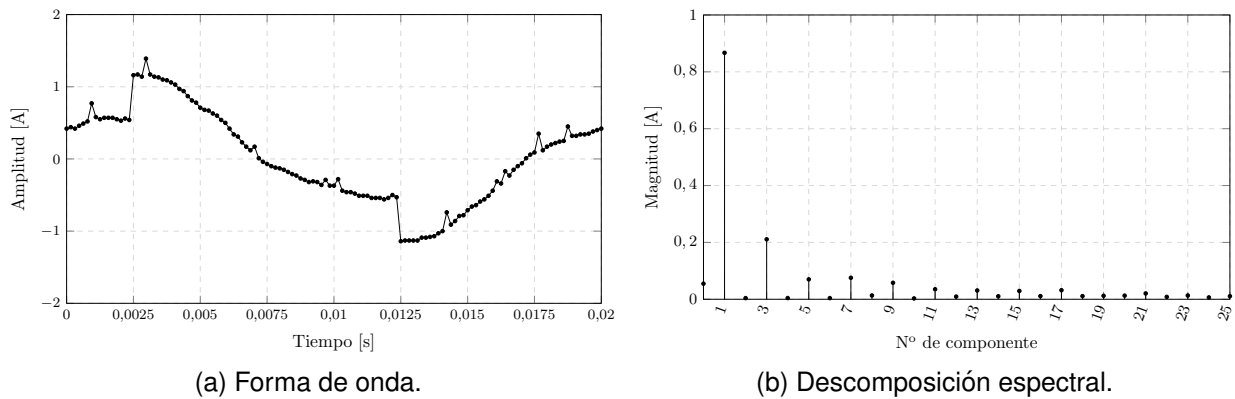


Figura 5: Corriente conjunta de una carga lineal más un control por ángulo de fase.

3. Desarrollo de la experiencia

Durante cuatro ciclos lectivos consecutivos (2014-2017), se destinó la actividad a la asignatura Análisis de señales y sistemas, del tercer nivel de Ingeniería Electrónica, para cohortes de diferentes cantidades de estudiantes: 8 en 2014, 12 en 2015, 10 en 2016, y 6 en 2017. En esos mismos ciclos lectivos, se desarrollaron instancias similares para la asignatura Mediciones eléctricas, del cuarto nivel de Ingeniería Electromecánica, con finalidades algo diferentes pero con la mayoría de los elementos en común en cuanto al plan de clase. Las cantidades de estudiantes involucrados en este caso fueron 13 en 2014, 7 en 2015, 15 en 2016, y 7 en 2017. En todos los casos, esta clase especial se llevó a cabo en el laboratorio académico de Electromecánica, con acceso a los medios de medición y simulación requeridos. En la Fig. 6, se muestra el desarrollo de algunas de estas clases.

En cada ocasión, se aplicaron sucesivas versiones de un plan de clase, hasta llegar a la versión final propuesta en el presente trabajo; los cambios implementados obedecieron a apreciaciones realizadas tanto por los estudiantes como por los docentes. En términos generales, la estructura del plan de clase y los contenidos abordados se mantuvieron similares en todas las ocasiones: los cambios consistieron en incrementar la diversidad y el contraste de los datos y gráficos mostrados sobre mediciones fuera de línea. Por ejemplo, por su significatividad para los estudiantes, se adicionó la curva diaria de carga de la instalación eléctrica del predio de la Facultad a fin de compararla con la curva de evolución de la tasa de distorsión armónica de tensiones y de corrientes en esta instalación. De manera similar, el análisis fuera de línea de diversas formas de onda de la tensión y corriente de salida del inversor fotovoltaico instalado en el predio de la institución constituye una muestra ilustrativa del impacto de la generación distribuida con energías renovables [7]. En la Fig. 7, se muestra una forma de onda de corriente del inversor fotovoltaico mencionado.



Figura 6: Diversas instancias de desarrollo de la experiencia.

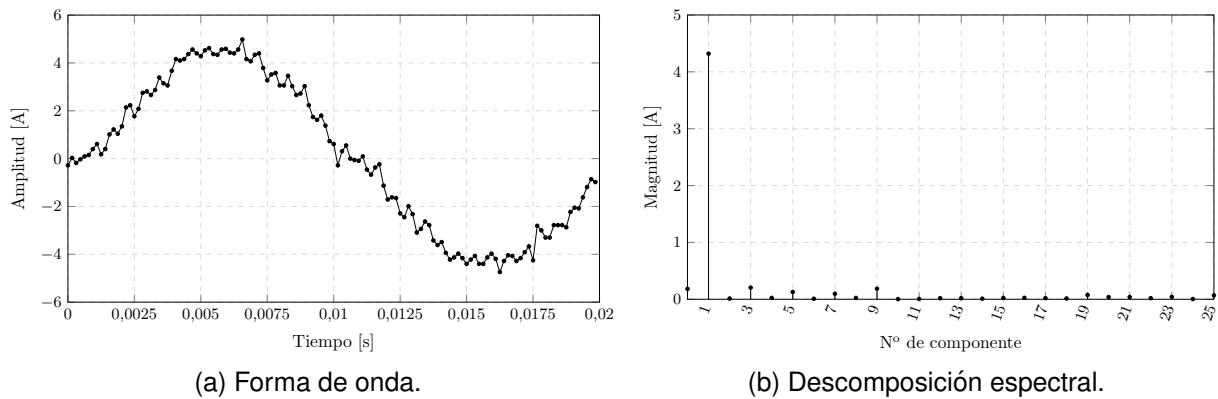


Figura 7: Corriente a la salida del inversor fotovoltaico con conexión a red conectado en la Facultad.

Con la presentación de ejemplos cada vez más específicos sobre la distorsión armónica en las redes eléctricas, cabe destacar que suele surgir de parte de los estudiantes un cuestionamiento sobre los criterios de imputación de responsabilidades por contaminación armónica. Este hecho pone de manifiesto la utilidad de esta actividad didáctica al hacer que los estudiantes desarrollen inquietudes propias y bien fundadas sobre los criterios vigentes o propuestos en este sentido, que se encuentran en el foco de diversos estudios [8].

Donde gradualmente se implementaron cambios más notorios es en la previsión explícita de ciertas instancias concretas de participación por parte de los estudiantes. Con el fin de que los contenidos abordados resulten significativos para ellos, se adicionaron ciertas interpelaciones específicas a los estudiantes para que elaboraran respuestas a criterio sobre la base de su formación previa. Uno de los ejemplos clave es, una vez mostrados los espectros en frecuencia correspondientes a diversas formas de onda, preguntar a los estudiantes si el espectro en frecuencia de las amplitudes de las componentes armónicas contiene suficiente información como para volver a sintetizar la forma de onda original. Los docentes han descubierto que este cuestionamiento en especial, entre otros, permite a los estudiantes revalorizar en contexto los contenidos que ya conocen de manera analítica. Se utilizan en este sentido diversas pautas y criterios explícitamente reconocidos para potenciar las interacciones sociales en las aulas de ingeniería.

Finalmente, el desarrollo de esta actividad marca un hito importante desde el punto de vista académico: en la planificación anual de las dos asignaturas involucradas, se ha asentado formalmente el desarrollo de esta clase especial con demostraciones didácticas como ámbito de interacción entre unidades curriculares y grupos de investigación. Dado que el material, las mediciones y las experiencias compartidas en esta actividad se proporcionan desde el ámbito de un grupo de I+D de la Facultad, se materializa así una modalidad concreta de extensión de actividades de investigación hacia las aulas de ingeniería.

4. Discusión y conclusiones

En el presente trabajo, se enumeran las características de una clase con demostraciones didácticas relativas a la transformada discreta de Fourier aplicada a la distorsión armónica en redes eléctricas. La instancia práctica aquí detallada se desarrolla como instancia de transferencia de un grupo de investigación hacia espacios curriculares de la formación de ingenieros. Específicamente, se destina a estudiantes del tercer nivel de Ingeniería Electrónica, en el marco de la asignatura Análisis de señales y sistemas, y también se desarrolla para estudiantes del cuarto nivel de Ingeniería Electromecánica, dentro de la asignatura Mediciones eléctricas. Se considera de gran valor esta experiencia y el plan de clase propuesto,

a fin de ilustrar y potenciar la teoría de sendas asignaturas con una aplicación ingenieril concreta.

Como futura mejora, se propone sistematizar un método de evaluación y diagnóstico de la actividad propuesta, a fin de cuantificar su impacto académico y comprobar el grado de asimilación de los contenidos desarrollados.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la cátedra Análisis de Señales y Sistemas, de la carrera de Ingeniería Electrónica; a los Ings. Raúl O. Ferrero y Román Mapelli por fomentar el inicio de esta actividad en dicho ámbito; al Ing. Osvaldo E. Cordoni y al Sr. Paulo J. Gianoglio por acceder gentilmente al desarrollo de esta misma actividad en Mediciones Eléctricas, de la carrera de Ingeniería Electromecánica; al Mg. Ing. Omar D. Gallo por su orientación en aspectos didácticos y pedagógicos.

Referencias

- [1] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Tratamiento de Señales de Tiempo Discreto*, 3rd ed. Prentice Hall, 2012.
- [2] H. G. Asís, F. Dopazo, P. J. Gianoglio, and D. M. Ferreyra, "Digital determination of output voltage harmonics in a single-phase voltage controller," Diciembre 2011, (Visitado: 10/05/2018). [Online]. Disponible en: <http://demonstrations.wolfram.com/DigitalDeterminationOfOutputVoltageHarmonicsInASinglePhaseVo/>.
- [3] A. D. Gudiño, J. F. Russo, and D. M. Ferreyra, "Magnetizing current waveform in an ideal saturable inductor," Octubre 2011, (Visitado: 10/05/2018). [Online]. Disponible en: <http://demonstrations.wolfram.com/MagnetizingCurrentWaveformInAnIdealSaturableInductor/>.
- [4] D. M. Ferreyra, "Phasor representation and time-domain plot of distorted waveforms," Mayo 2012, (Visitado: 10/05/2018). [Online]. Disponible en: <http://demonstrations.wolfram.com/PhasorRepresentationAndTimeDomainPlotOfDistortedWaveforms/>.
- [5] O. D. Gallo, "Las interacciones sociales en aulas de ingeniería: un terreno poco explorado," UTN - Facultad Regional Córdoba, Abril 2011, tesis para la obtención del grado de Magíster en Docencia Universitaria.
- [6] O. Menin, *Pedagogía y Universidad - Currículum, didáctica y evaluación*, 1st ed. Homo Sapiens Ediciones, 2004.
- [7] D. M. Ferreyra, A. C. Sarmiento, G. D. Szwarz, and N. J. Rocchia, "Energía solar fotovoltaica con conexión a red en la zona central de argentina," *1er. Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI)*, Septiembre 2017.
- [8] D. M. Ferreyra, "Implementación de técnicas de estimación de estado armónico en sistemas eléctricos de distribución," Universidad Nacional de Río Cuarto, Septiembre 2014, tesis para la obtención del grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Ingeniería Eléctrica.