



**PATRÓN NACIONAL PARA EL SOPORTE DE  
CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE  
CALIDAD DE ONDA Y MEDIDA DE POTENCIA Y  
ENERGÍA ELÉCTRICA BAJO CONDICIONES DE ONDAS  
SINUSOIDALES Y DISTORSIONADAS**

**Proyecto ANII FSE\_1\_2011\_1\_6225**

**UTE - LABORATORIO**

# Integrantes

- Daniel Slomovitz
- Leonardo Trigo
- Parcialmente
  - Andres Cardozo
  - Maria Inés Camacho

# Motivación

- Calidad de la energía eléctrica. Efectos negativos de los armónicos en las redes de potencia.
- Preocupación desde hace 90 años, pero impacto reciente:
  - Incremento de cargas distorsionantes en la red.
  - Energías renovables.
- Reglamentaciones:
  - Límites a distorsiones de las ondas de tensión y corriente para suministradores y consumidores.

# Problema abordado por el proyecto

- Falta de trazabilidad para medición ondas distorsionadas.
- Imposibilidad de calibrar en el país medidores de distorsión.
- Inexistencia de patrones comerciales

# Patrones Nacionales

- Laboratorio de UTE: Laboratorio Nacional Designado.
- Patrones Nacionales (estado antes del proyecto):
  - Resistencia
  - Voltaje continuo, alterno (sinusoidal).
  - Corriente continua, alterna (sinusoidal).
  - Potencia (sinusoidal).
  - Capacitancia, inductancia, frecuencia.

## Alcance del proyecto

- Desarrollo, diseño, construcción y calibración de un patrón de medida de corriente, voltaje y potencia para ondas distorsionadas, trazable a Patrones Nacionales existentes.
- Rango de frecuencias: hasta armónico 50.
- Rangos de tensión de 32 V a 256 V.
- Rangos de corriente de 10 mA a 10 A.
- Incertidumbre:
  - 15 ppm (distorsión inferior al 1%)
  - 50 ppm (distorsión del 1% al 10%)

# Sistema propuesto

- Digitalizadores de voltajes (2, comerciales)
- Divisores de tensión (4 de 32 V a 256 V, desarrollo).
- Resistores shunt de corriente (9 de 10 mA a 10 A, desarrollo).
- Transformador de corriente (desarrollo).
- Divisor inductivo de tensión (desarrollo).
- Patrón generador de onda distorsionada (desarrollo).
- Software de cálculo y manejo de los equipos.

# Digitalizador

- DMM Agilent 3458
  - Conversor analógico-digital: 8 ½ dígitos, 28 bits.
  - Manejo de tiempos de adquisición y conversión, sincronismo entre multímetros.
  - Exactitud dc: 1 ppm.
  - Resolución ac:
    - 8 ½ dígitos con tiempo de conversión de 200 ms.
    - 6 ½ dígitos con tiempo de conversión de 100 us, lento para la componente 50 (4 muestras por ciclo).
    - Algoritmo de Swerlein para sinusoides.

# Digitalizador

Mejor combinación:

Tiempo de conversión: 50  $\mu$ s

Tiempo de adquisición: 2,41 s (120,25 ciclos a 50 Hz, 48 000 muestras).

# Algoritmo de cómputo de armónicas

Dada una señal muestreada de  $M$  armónicos, el problema es determinar los valores de Fourier, en fase y en cuadratura.

$$y = A \cdot x + E$$

$y$ : vector de la muestra de la señal,

$x$ : vector desconocido de coeficientes de contenido armónico,

$E$ : ruido

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \cos(\omega t_1) & \dots & \cos(M\omega t_1) & \sin(\omega t_1) & \dots & \sin(M\omega t_1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & \cos(\omega t_n) & \dots & \cos(M\omega t_n) & \sin(\omega t_n) & \dots & \sin(M\omega t_n) \end{pmatrix}$$

Solución por mínimos cuadrados iterativo.

# Frecuencia

- La solución del sistema es altamente dependiente del valor de la frecuencia.
- Cálculo de la frecuencia: linealización.

$$f^{p+1} = f^p + df$$

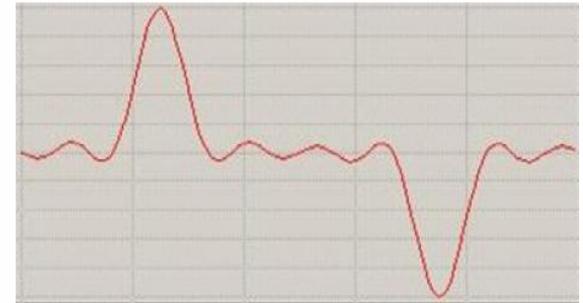
$$A_{i,2M+2} = \sum_{j=1}^M -A_j t_i \text{sen}(j\omega t_i) + B_j t_i \text{cos}(j\omega t_i)$$

# Correcciones

- Por el tiempo de conversión (sen x/x)
- Error dc y linealidad del DMM
- Ancho de banda del DMM

# Evaluación del algoritmo

- Formas de onda

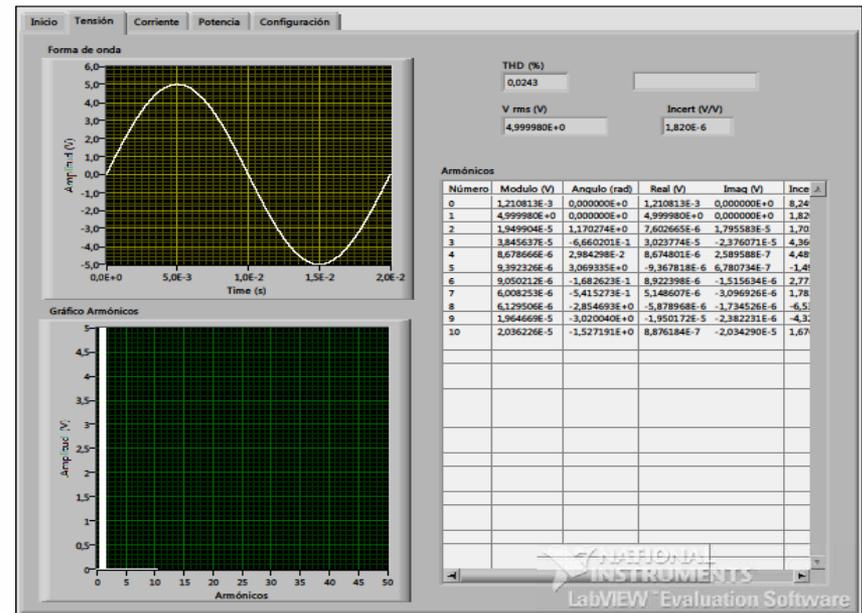


Wave number	time (s)	max. (ppm)	Veff (ppm)	freq. (ppm)
1	0.89	1.7	0.17	0.084
2	1.1	4.6	3.8	0.047
3	1.3	4.3	0.96	0.17
4	1.2	18	4.7	0.57

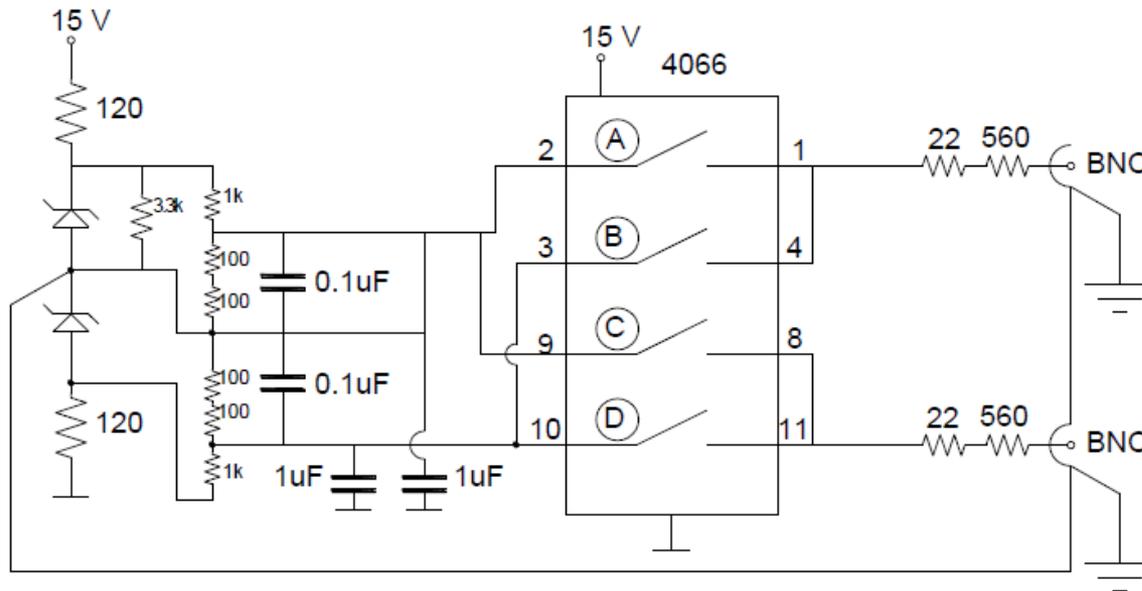
# Software

- Labview

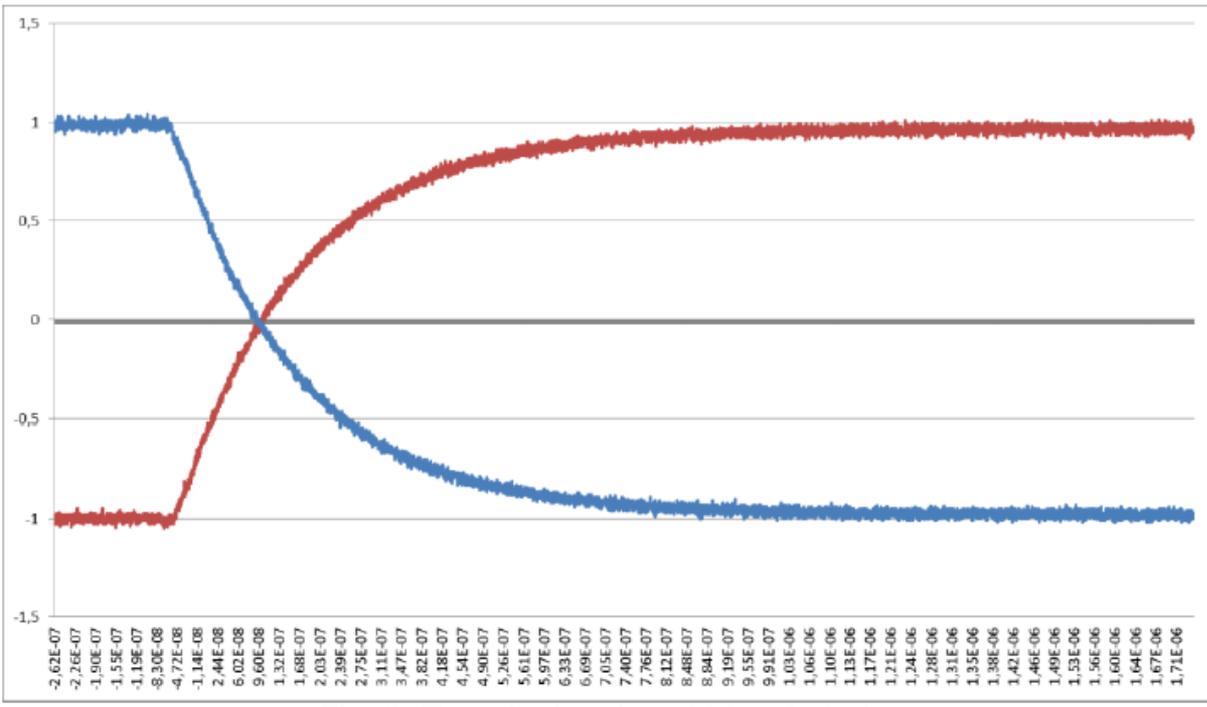
- Calibración DMMs
- Transductores
- Tiempo de conversión
- Número de muestras
- Cantidad de armónicos
- Maestro/esclavo
- Resultados ( $V_n$ ,  $I_n$ ,  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ , THD,  $P_n$ ,  $Q_n$ )



# Generador patrón



# Generador patrón



# Calibración con generador patrón

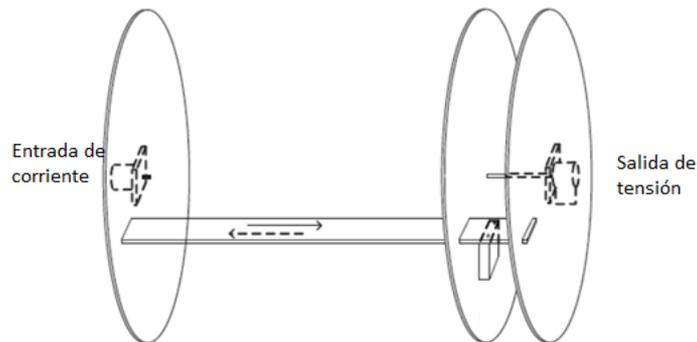
Orden de Armónico	Error Amplitud (ppm)	Error cuadratura (ppm)
1	0	0,5
5	-1,9	0,1
10	-2,2	-0,5
50	-4,1	-2,5
70	-5,5	-3,3
100	-7,5	-1,8

# Escalado

- Rangos del DMM: 100 mV up to 1000 V.
- Mejor exactitud: 1 V y 10 V.
- Shunts y divisores de tensión resistivos: mejor performance a 1 V.
  - Shunt: debido a potencia disipada
  - Divisor de tensión: debido a capacidades parásitas
- Transformador de corriente.
- Divisor de tensión inductivo.

# Shunts de corriente

- Rangos: 10 mA a 10 A en 10 pasos (2:1)
- Efectos parásitos: inductancias, capacidades, no lineales.
- Exactitud:
  - 10 ppm en los rangos de corriente de 10 mA a 1 A, con distorsión inferior al 1%.
  - 30 ppm en los rangos de corriente de 1 A a 10 A con distorsión entre el 1% y el 10%.
- Ancho de banda: 5 MHz equivalente a una constante de tiempo de 32 ns.



# Calibración de shunts

30 certificados:

a)  $R_{dc}$ ,  $R_{ac}$ .

b) Autocalentamiento:

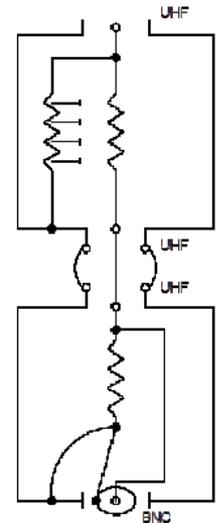
0,01 A a 0,1 A: no muestran variaciones significativas entre el 10% y el 100% de  $I_n$ .

0,2 A a 10 A: 3 ppm a 19 ppm para variación entre 50% y 100 % de  $I_n$ .

	dc	ac
Resistencia dc ohm	ppm	ppm
100,00067	6,7	4,6
49,999072	-18,6	-18,9
19,998871	-56,4	-56,8
9,999559	-44,1	-42,2
5,001714	343	342,3
2,00052	260	261,7
1,00012	120	117,3
0,5000542	108	98,8

# Divisores de tensión

- Rangos: 32 V a 256 V en 4 pasos (2:1).
- Efectos parásitos: capacidades, no lineales.
- Exactitud:
  - 7 ppm en los rangos de tensión de 32 V a 256 V con distorsión inferior al 1%
  - 25 ppm en los rangos de tensión de 32 V a 256 V con distorsión entre el 1% y el 10%.
- Ancho de banda: 5 MHz equivalente a una constante de tiempo de 32 ns.



# Calibración de divisores de tensión

- Alterna: patrón de transferidores térmicos (5 kHz).
- Linealidad: patrón divisor de tensión inductivo (1 kHz).
- 9 certificados.
- Errores:
  - ac/dc: menores a  $20 \times 10^{-6}$ .
  - Divisor inductivo: 3 ppm y 6  $\mu\text{rad}$ .

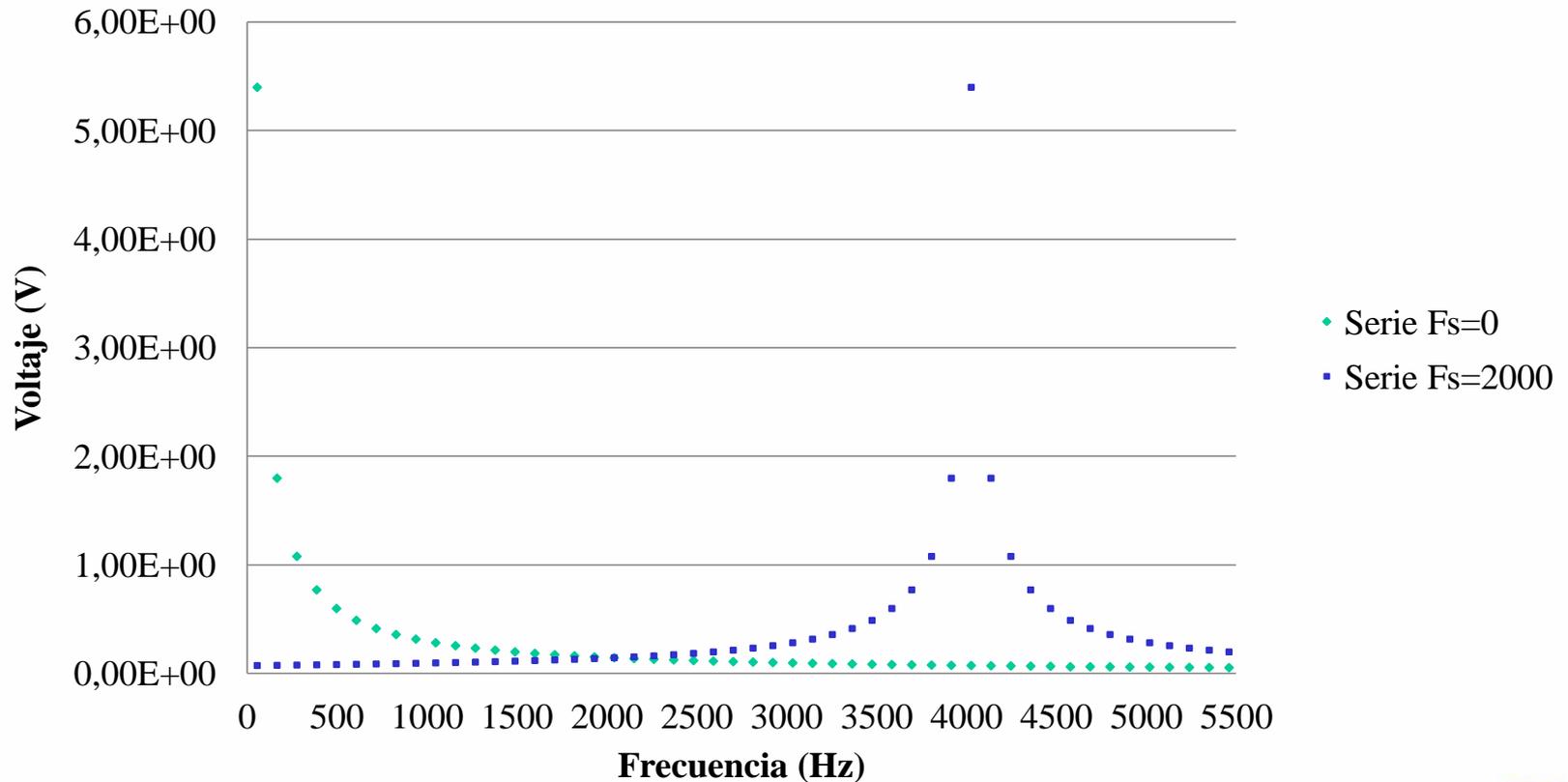
# Límite de Nyquist

- El DMM no tiene ningún filtro anti-aliasing. Todos los componentes armónicos alcanzan el digitalizador.
- Diseño inicial: señales con un orden armónico máximo de 40 veces la frecuencia de alimentación, 2 kHz a 50 Hz.
- Funcionamiento real: Errores bajos hasta 5 kHz, excediendo el límite de Nyquist por 2,5 veces.

# Límite de Nyquist

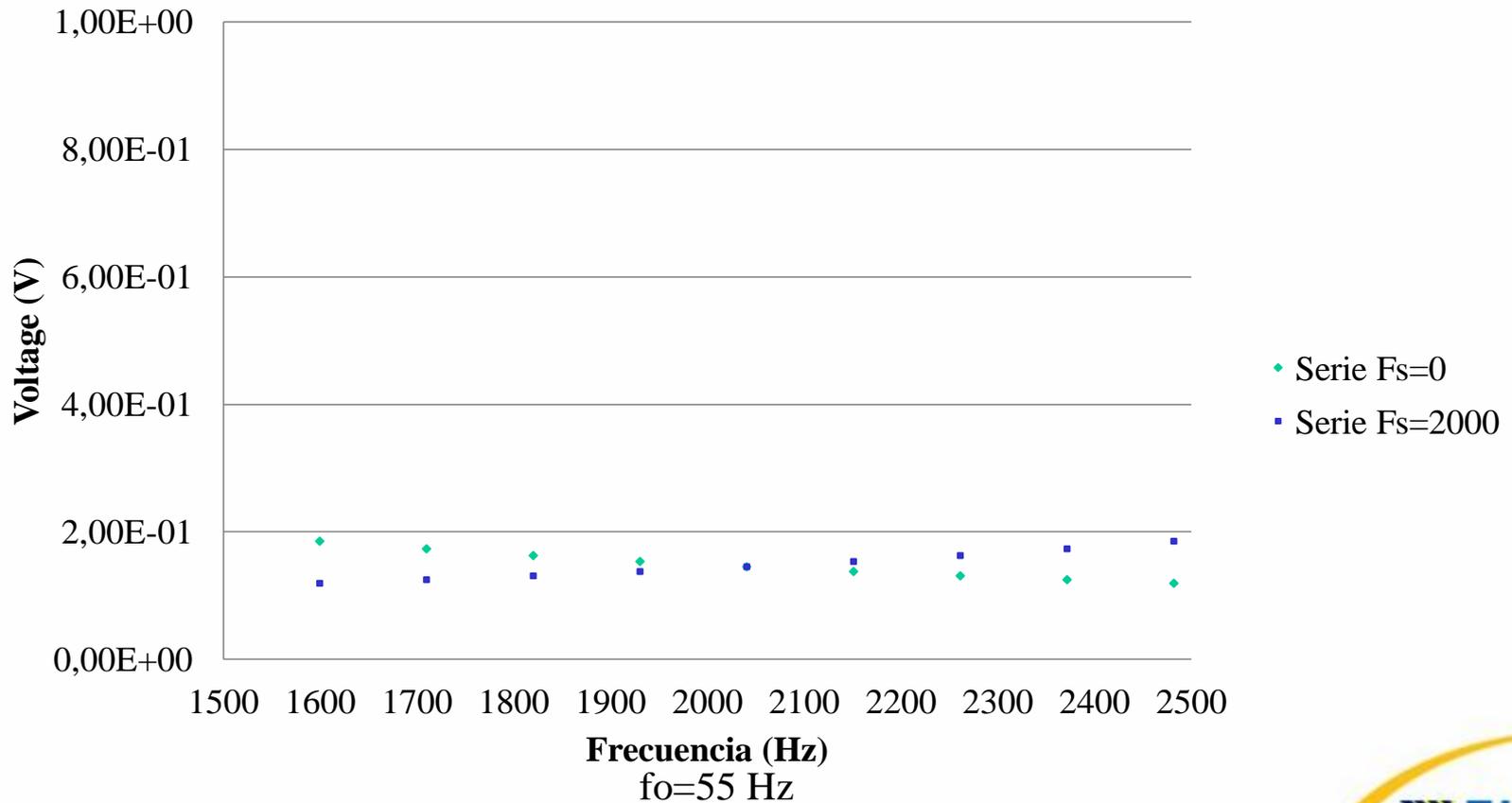
- El algoritmo calcula con gran precisión la frecuencia fundamental  $f_0$  y con este valor busca el mejor conjunto de contenidos armónicos que se ajustan a los valores digitalizados.
- El resultado es equivalente a tener un filtro muy estrecho alrededor de las frecuencias  $n \cdot f_0$ .
- Se realizó una determinación experimental del ancho de banda.

# Armónicos de onda cuadrada

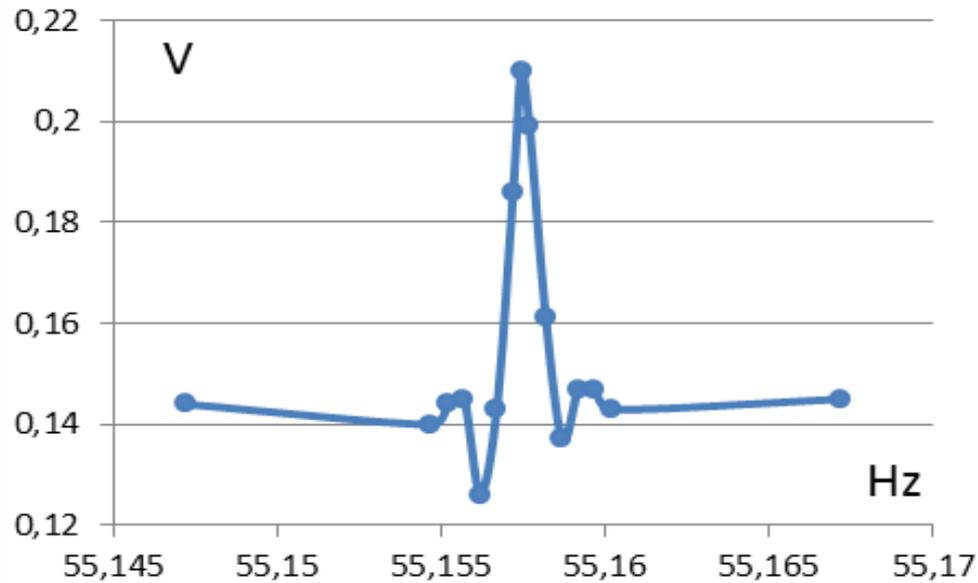


$f_0=55$  Hz

# Armónicos de onda cuadrada



# Superposición de armónicos



Armónico 37<sup>th</sup>.

Ancho de banda 2,5 mHz.

Relación entre el ancho de banda y  $f_0$ : 45 ppm, equivalente a  $Q = 22\ 000$ .

# Sistema completo



69/10/2015

# Conclusiones

- Desarrollos:
  - Control de DMM.
  - Algoritmos para el cómputo de armónicos.
  - Divisores de tensión.
  - Transductores de corriente.
  - Patrón de onda distorsionada.
  - Calibración de todo el sistema trazable a Patrones Nacionales.

# Publicaciones

- Automatic Calibration of Linearity in High Precision Digital Multimeters, I. Camacho, H. de Souza, D. Slomovitz, X SEMETRO, Buenos Aires, Argentina, Sep. 25, 2013.
- High-Precision Current Comparator for Current Transformer Calibrations, Daniel Slomovitz, Leonardo Trigo, Alejandro Santos, Gonzalo Aristoy, X SEMETRO, Buenos Aires, Argentina, Sep. 25, 2013.
- Standard for Electric Distorted Waveforms, L. Trigo, I. Camacho, D. Slomovitz, IEEE, I2MTC, 2014.
- Standard for calibrating harmonic measuring systems, D. Slomovitz, L. Trigo, G. Guerrero, Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014), DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898383, pp. 310- 311, 2014.
- Signal Processing for a Standard Harmonic Analyzer, L. Trigo, D. Slomovitz, IEEE, LASCAS 2015, febrero 2015



Gracias por su atención

[dslomovitz@ute.com.uy](mailto:dslomovitz@ute.com.uy)

[ltrigo@ute.com.uy](mailto:ltrigo@ute.com.uy)