

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL**  
**JORNADA DE INVESTIGACIÓN 2023**

**Medición y evaluación de calidad de energía en aerogeneradores de baja potencia conectados a red**

**Agnello Ariel, Bufanio Ruben, Marasco Damián, Monte Gustavo, Scarone Norberto**

**GESE de la FRN**

***Facultad Regional del Neuquén***



**Universidad Tecnológica Nacional**

## Justificación de la propuesta:

- ❑ Cambios en la manera de obtener la energía eléctrica, la cual va hacia un desarrollo sostenible en el lugar de consumo.
- ❑ Usuarios conectados en redes de baja tensión comiencen a tener una participación activa en el suministro energético.
- ❑ La transición indicada se apoya en fuentes de origen renovable, esto genera diversos desafíos relacionados al servicio y estabilidad del sistema de suministro.
- ❑ Es de suma importancia predecir el impacto que tendrá en la calidad del suministro eléctrico la inserción de la generación renovable, en especial dada sus características y la variabilidad del recurso, la **energía eólica de baja potencia**.
- ❑ Este estudio es continuación del trabajo sobre la emisión de flicker y se desarrolla sobre el mismo hardware. Se agrega la medición y evaluación de la emisión de armónicos en aerogeneradores de baja potencia según recomendaciones de las normativas internacionales.

## Objetivos:

- Medición y evaluación de la emisión de armónicos en aerogeneradores de baja potencia según recomendaciones de la **IEC-61400-21**, de manera sea útil tanto para fabricantes, usuarios, operadores y entes reguladores de la red.
- ❖ **Determinar los armónicos e interarmónicos, junto con otros parámetros de potencia, del aerogenerador bajo análisis.**

## Metodología:

- ❑ Reutilización del sistema de medición y evaluación de flicker.
- ❑ Utilización de mismo aerogenerador y electrónica de inyección a red monofásica de baja tensión.
  - ❑ Omniksol 1.5k-TL2-M de 1.5kW
- ❑ Pruebas en laboratorio de evaluación de aerogeneradores del INTI-NQN (Municipio de Cutral-Có, Neuquén).

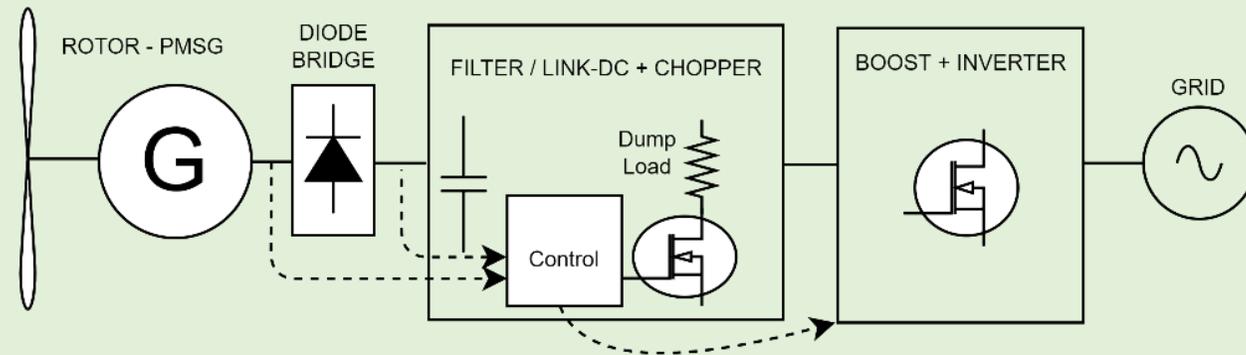
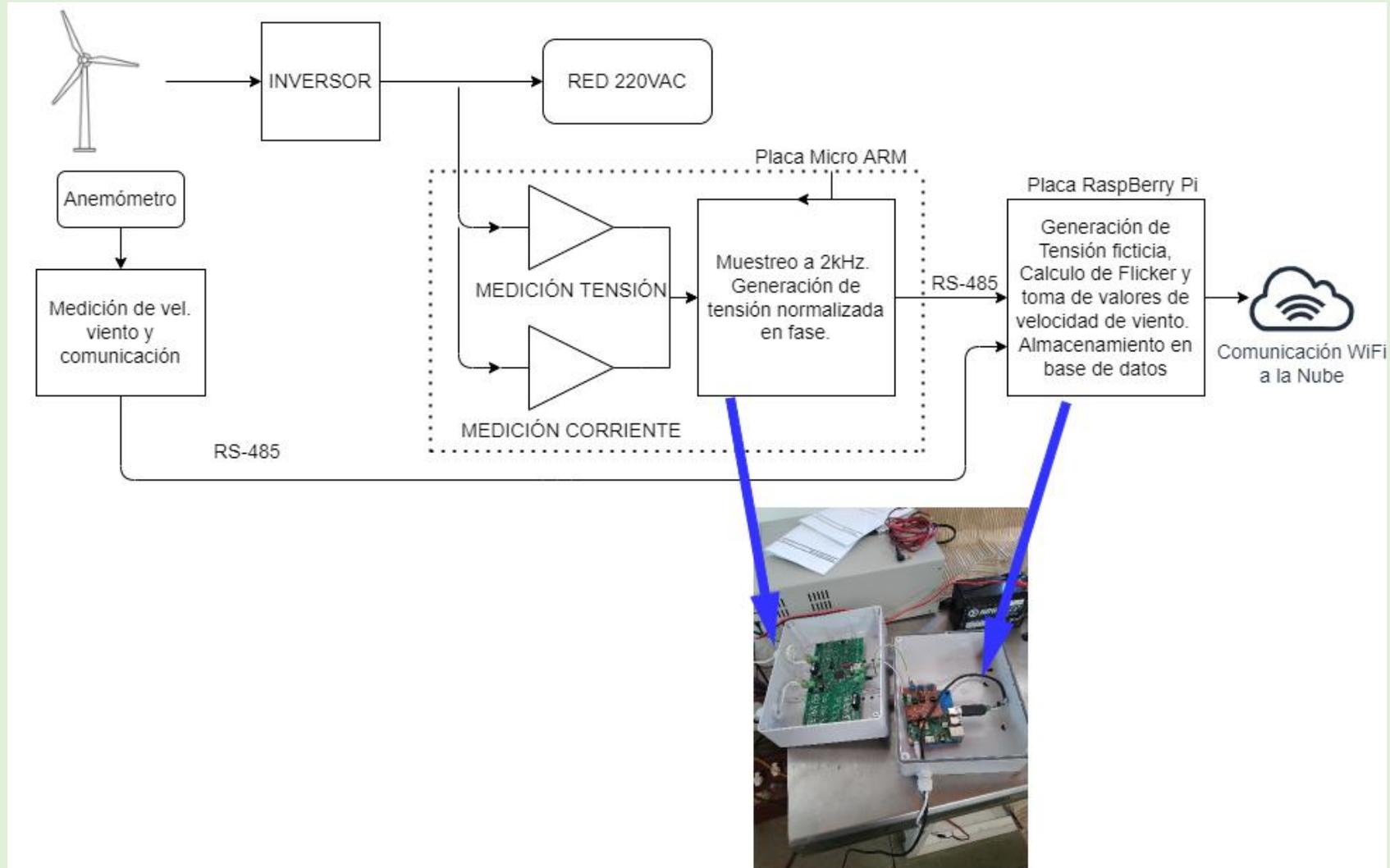


Diagrama de bloques de estructura típica de generación eólica de baja potencia por debajo de los 10kW, utilizada en este trabajo con vínculo a la red eléctrica monofásica.

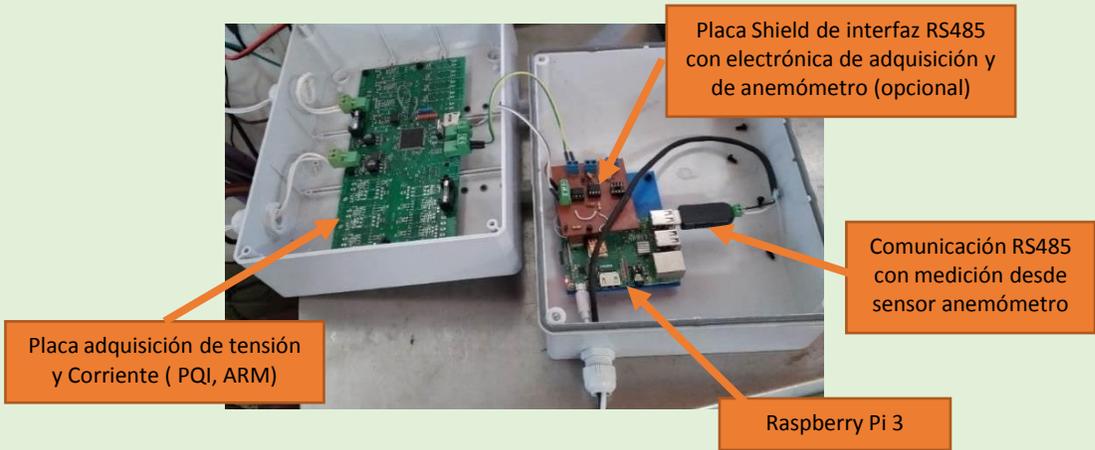
## Propuesta experimental:

- ❑ Sistema completo de medición de variables eléctricas, según recomendaciones de la IEC-61400-21.

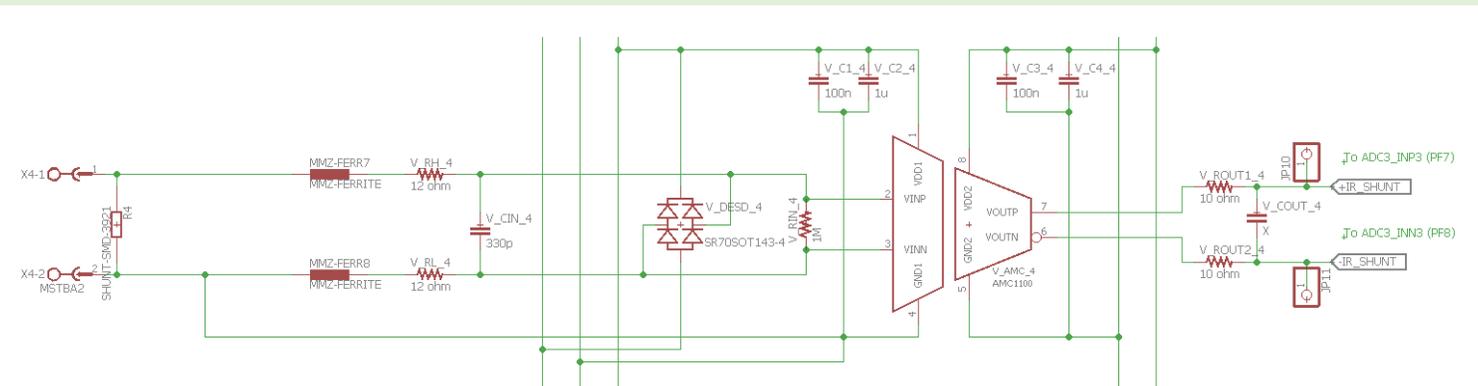


# ❖ Desarrollo de la Propuesta Experimental

## ➤ Medición de Armónicos de Corriente de Línea, Tensión y potencias.



## ➤ Placa PQI: Circuito implementado de medición de corriente modo diferencial



## ➤ Descripción general del Firmware PQI:

### ❖ Placa PQI:

- Microcontrolador de la familia ARM de 32bits.
- Conversor analógico digital de 16 bits de resolución, frecuencia de reloj para el core de 240MHz, puerto serie asincrónico UART de 115200 baudios.
- Librerías de FFT (CMSIS).
- Datos tratados y transmitidos al Raspberry Pi vía RS485.
- Dos conversores ADC (2 y 3) configurados en 16 bits de resolución y con disparo de conversión desde el temporizador (Timer 2).
- Vinculación a un reloj externo de 2.048 kHz.
- Evento cada 400 cuentas que dispara la conversión de ambos ADC, permitiendo con dicha frecuencia 1024 muestras en 0,2s.  
$$T_s = \frac{1}{2048K} \times 400 = 195,3125\mu s \quad F_s = 5120Hz$$
- Se habilitan las interrupciones para las conversiones ADC y se declaran buffer de datos de conversión, tanto para corriente como para tensión, de una longitud igual al doble de la ventana de 0,2s (2048).
- Mientras se procesan los primeros 1024 valores, se mide su segunda parte, lo cual permite adquirir y procesar datos en forma continua.
- Los datos obtenidos son previamente procesados para luego ser escalados según calibración del sistema.

## ➤ Descripción general del Firmware PQI:

Librería CMSIS: Funciones de cálculo especialmente optimizadas para micros ARM Cortex-M. En especial se utilizaron los relacionados con computo FFT.

- Para obtener los 50 armónicos de tensión, corriente y sus interarmónicos, se emplea el criterio de agrupación expresado en la norma IEC 61400-21 sección 6.4, el cual esta expresado con más detalle en la IEC 61000-4-7, en su figura 7.

- Potencia activa (solo componente fundamental):

$$P = \text{Re}(U_{rms}) * \text{Re}(I_{rms}) + \text{Im}(U_{rms}) * \text{Im}(I_{rms})$$

- Potencia reactiva (solo componente fundamental):

$$Q = \text{Im}(U_{rms}) * \text{Re}(I_{rms}) - \text{Re}(U_{rms}) * \text{Im}(I_{rms})$$

- Potencia Aparente:

$$S = U_{rms} * I_{rms}$$

- Calculo de valor eficaz de tensión y corriente por medio de cálculo en función del tiempo.

- Calculo de Componente de DC en tensión y corriente, derivados de la FFT como del cómputo en función del tiempo.

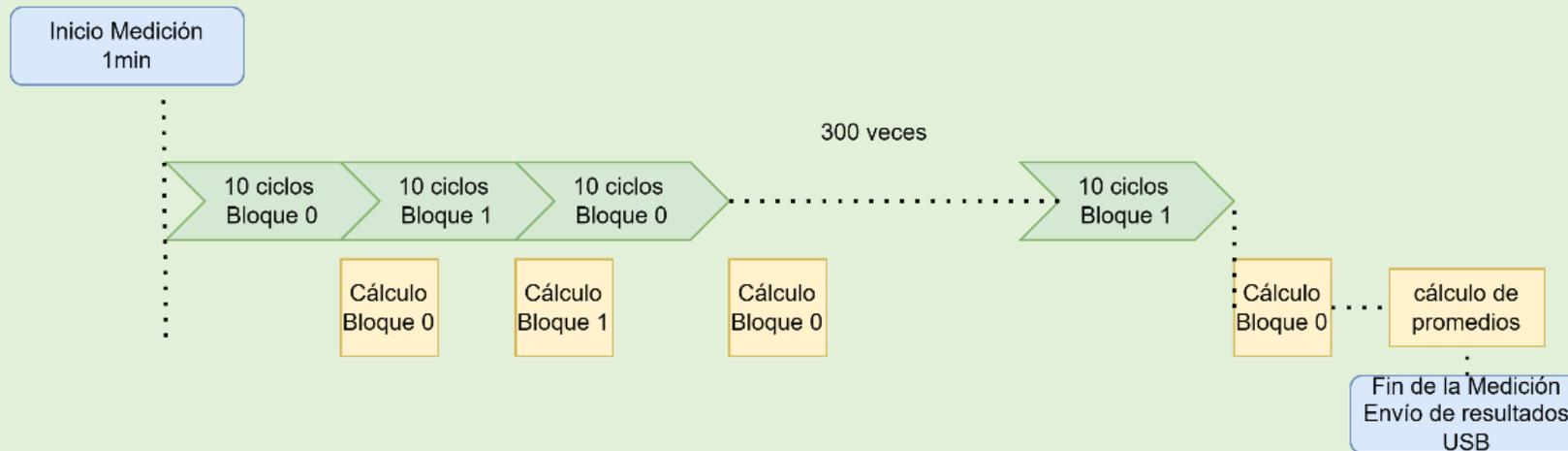
- Calculo la distorsión armónica de corriente, en acuerdo a la siguiente ecuación.

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{50} I_{hn}^2}{I_{h1}^2}}$$

## ➤ Descripción general del Firmware PQI:

### ▪ Cada 0,2s se calculan los siguientes valores:

- 50 primeros armónicos de tensión y de corriente.
- 50 primeros interarmónicos de corriente.
- Corriente DC (Calculada por FFT).
- Potencia Aparente (Tensión RMS x Corriente RMS 1er armónico)..
- Potencia Activa
- Potencia Reactiva
- Distorsión armónica
- Tensión RMS y de DC, Corriente RMS y de DC (calculadas en dominio del tiempo).



## ➤ Calibración:

- Ajuste de constantes de calibración para la medición de tensión y corriente.
- Se utilizan varios consumos monofásicos y se comparan los resultados provistos de la placa PQI con los medidos por un analizador de energía, (FLUKE 434).



Indicación PQI		Indicación FLUKE	Constante de calibración
V RMS	0,7227922	229,8	317,933702
V DC	0.00025844865		
I RMS	0.3242318		
I DC	-0.00040985644		
V RMS	0,71937096	229,5	319,514828
V DC	V DC:0.00032250586		
I RMS	0,3221569	4,3	13,2531902
I DC	I DC:0.0004791068		
V RMS	0,7179647	230	320,350012
V DC	V DC:0.0006184081		
I RMS	0,3193407	4,2	13,1520974
I DC	I DC:0.00070699403		
V RMS	0,7131091	227,6	319,165749
V DC	V DC:0.00028334817		
I RMS	0,31674352	4,2	13,2599398
I DC	I DC:-3.4506316e-05		

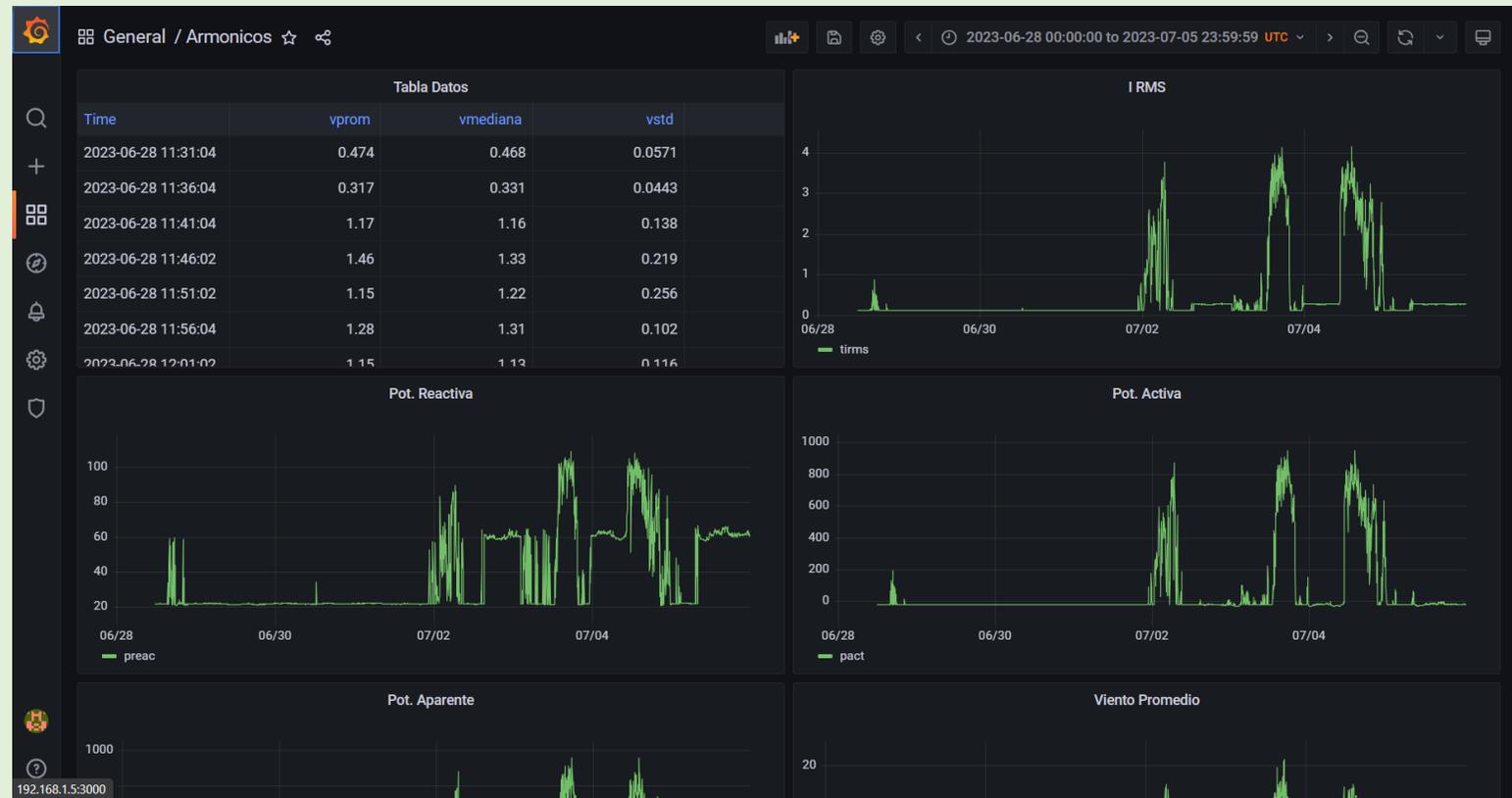
## ➤ Resultados:

- Mediciones continuas cada 5 min.
- Ventana de 1 min.
- Desde el 28/06/2023 al 05/07/2023
- 1980 mediciones.
- Se clasifica cada medición por bin de potencia (IEC 61400-21 - Sec. 6.4).
- Los valores de corriente armónica e interarmónica como porcentaje respecto a la componente fundamental de cada medición:

$$I_h[\%] = \frac{I_h}{I_1} \times 100$$

### ❖ Interface Grafana:

Recopilación de datos en forma remota desde Raspberry Pi.



## ➤ Resultados:

### ❖ Anexo A.3.1 de la IEC 61400-21: Resultados obtenidos de corrientes armónicas en función de bins de potencia

Pbin (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
H	Ih (%)										
2	3,69	2,49	1,20	0,91	0,79	0,76	0,66	0,69	0,73	0,72	0,88
3	20,15	11,88	3,47	2,39	1,73	1,30	1,04	0,89	0,81	0,74	0,85
4	3,56	2,22	1,17	0,83	0,65	0,51	0,44	0,38	0,36	0,35	0,38
5	29,66	19,12	5,15	3,71	3,15	3,14	2,87	2,73	2,46	2,28	2,14
6	3,57	2,51	1,76	1,31	1,01	0,73	0,65	0,50	0,45	0,42	0,41
7	13,02	8,05	3,82	2,76	2,26	1,68	1,37	1,27	1,18	1,14	1,09
8	3,51	2,25	1,74	1,30	1,00	0,72	0,64	0,50	0,43	0,41	0,39
9	8,84	5,49	2,32	1,94	1,84	1,66	1,53	1,33	1,18	1,05	0,93
10	3,49	1,92	1,10	0,79	0,61	0,46	0,39	0,32	0,29	0,27	0,26
11	5,61	4,37	2,00	1,82	1,51	1,33	1,21	1,11	1,04	0,94	0,86
12	3,43	1,65	0,76	0,56	0,44	0,37	0,31	0,27	0,25	0,23	0,23
13	5,21	3,85	1,37	1,14	1,10	1,16	1,10	1,09	1,03	0,94	0,89
14	3,41	1,71	0,74	0,54	0,42	0,36	0,30	0,27	0,24	0,23	0,22
...											
...											
45	3,48	2,36	0,85	0,58	0,47	0,37	0,32	0,28	0,26	0,23	0,22
46	3,22	1,57	0,66	0,46	0,36	0,29	0,24	0,21	0,20	0,18	0,17
47	3,44	2,33	0,82	0,55	0,46	0,36	0,31	0,27	0,25	0,23	0,22
48	3,22	1,56	0,65	0,47	0,35	0,29	0,25	0,22	0,21	0,19	0,18
49	3,48	2,34	0,82	0,55	0,47	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25	0,24
50	3,20	1,52	0,68	0,50	0,36	0,30	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18
<b>THD</b>	46,70	30,57	16,55	11,08	7,71	6,95	5,84	5,38	5,08	4,66	5,16

- Análisis respecto a los límites que impone tanto la IEEE 519 como la IEC-61000-3-2.
- Las emisiones individuales, acompañan al THD, se observan algunos valores fuera de los límites, pero solo para los dos primeros bins de potencia donde la corriente inyectada es de por sí muy baja en comparación a la nominal, por lo tanto, de bajo impacto para la conexión.

## ➤ Resultados:

- Anexo A.3.2 de la IEC 61400-21: Resultados obtenidos de corrientes interarmónicas en función de bins de potencia

Pbin (%)	0,00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100
f (Hz)	Ih (%)										
60/90	3,08	2,01	1,43	1,22	1,18	1,24	1,10	1,20	1,32	1,31	1,66
110/140	2,90	1,63	0,71	0,52	0,45	0,43	0,38	0,38	0,40	0,39	0,47
160/190	2,96	1,83	0,69	0,48	0,42	0,37	0,32	0,31	0,31	0,30	0,36
210/240	2,99	1,75	0,68	0,48	0,39	0,35	0,30	0,28	0,27	0,27	0,30
260/290	3,07	2,06	0,81	0,57	0,48	0,40	0,34	0,31	0,29	0,27	0,30
310/340	2,89	1,69	0,68	0,49	0,40	0,32	0,27	0,25	0,23	0,22	0,23
360/390	2,91	1,96	0,79	0,56	0,47	0,37	0,31	0,28	0,26	0,25	0,26
410/440	2,93	1,64	0,67	0,49	0,41	0,34	0,29	0,26	0,24	0,23	0,22
460/490	2,77	1,68	0,65	0,46	0,40	0,34	0,28	0,25	0,23	0,23	0,23
510/540	2,94	1,60	0,62	0,45	0,38	0,32	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21
560/590	2,81	1,72	0,61	0,45	0,37	0,32	0,27	0,24	0,22	0,21	0,21
610/640	2,88	1,43	0,58	0,43	0,34	0,30	0,26	0,24	0,22	0,20	0,20
...											
...											
2210/2240	2,79	1,40	0,60	0,40	0,32	0,24	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14
2260/2290	2,65	1,56	0,61	0,42	0,34	0,27	0,23	0,20	0,18	0,17	0,17
2310/2340	2,86	1,43	0,55	0,37	0,31	0,24	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15
2360/2390	2,72	1,64	0,62	0,42	0,33	0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18
2410/2440	2,80	1,41	0,55	0,39	0,33	0,25	0,22	0,19	0,17	0,16	0,15
2460/2490	2,82	1,65	0,67	0,46	0,35	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18
2510/2540	2,69	1,30	0,55	0,41	0,31	0,25	0,22	0,19	0,17	0,16	0,15

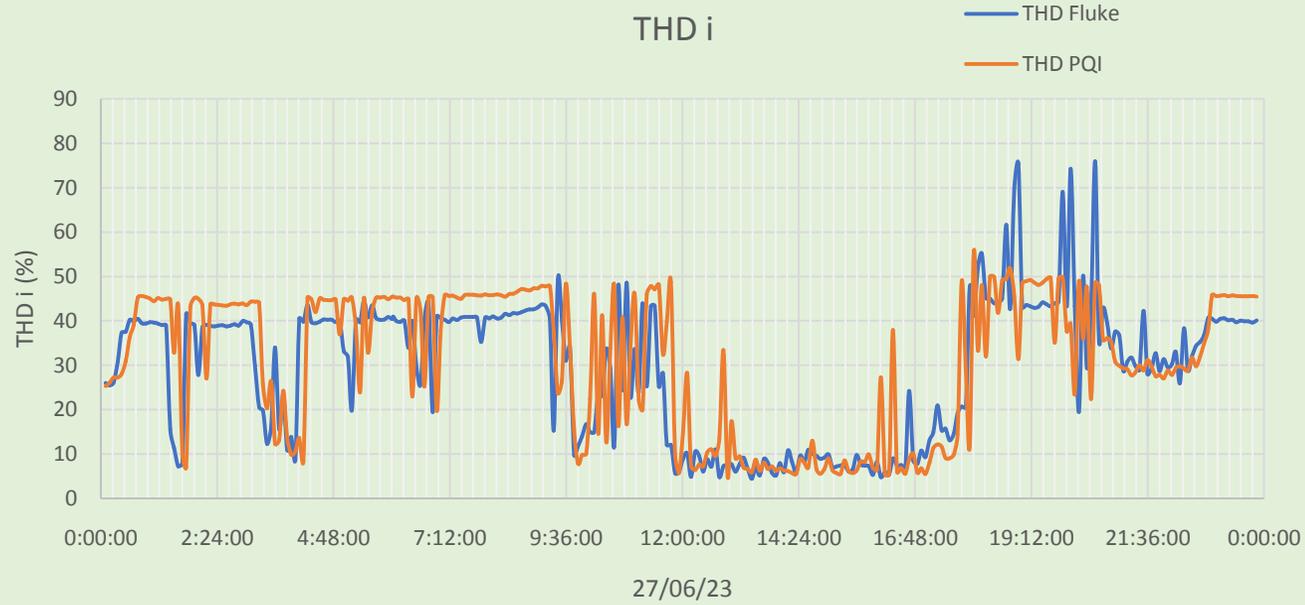
## ➤ Resultados:

- Anexo A.5.1 de la IEC 61400-21: Potencia Máxima medida.
- Anexo A.6 de la IEC 61400-21: Potencia Reactiva.
- Medición de componente de DC en diferentes bins de potencia.
- Corriente promedio de la componente fundamental para diferentes bins de potencia

A.5.1 Maximum measured power											
60 s average value											
Measured value, P60 (kW)	0,951										
Normalized value, p60=P60/Pn	0,951										
A.6 Reactive power											
Active power (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Max Reactive Power (W)	22	59	36	35	48	65	78	92	98	101	99
Max Reactive Power (%)	76	88	18	12	12	13	13	13	12	12	10
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	I (A)										
DC (FFT)	0,012	0,013	0,018	0,017	0,018	0,017	0,018	0,018	0,019	0,020	0,022
DC (Time)	-0,008	-0,009	-0,013	-0,012	-0,012	-0,011	-0,012	-0,011	-0,011	-0,011	-0,011
Pbin (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
H	Ih (A)										
1	0,13	0,30	0,88	1,30	1,73	2,18	2,61	3,04	3,42	3,79	4,14

- Valor más bajo en corriente registrado por el sistema del orden de los 20mA, límite impuesto por el ruido eléctrico.
- Máximo admisible de componente de DC por IEEE Standard 1547-2018 del 0,5% para la corriente nominal, que corresponde para este ensayo a un valor de 23mA, se observa que no es superado según tabla.
- Se concluye que el sistema de conversión eólica analizado no genera una componente de DC que supere dicho límite.

➤ **Comparativa con resultados de registrador comercial, Fluke 435:**

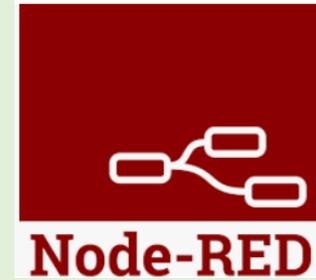


## ➤ Implementación del algoritmo en Raspberry Pi

Raspberry Pi:

¿Por qué?

- Dispositivo compacto con SO Linux (ARM)
- Conectividad a Ethernet y WiFi
- Implementación base de datos local
- Software Node-Red
- Posibilidad de conexionado de placas electrónicas
  - Puerto RS485 a placa PQI
  - Entrada a Anemómetro directo
  - Entrada a Anemómetro por comunicación RS485.



Inicio de Tarea cada 5'



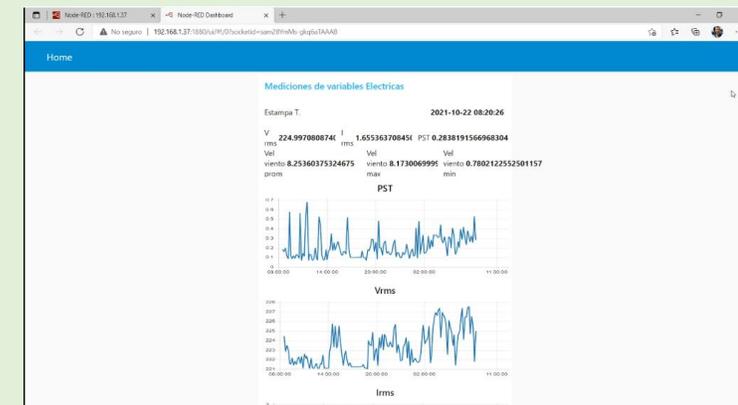
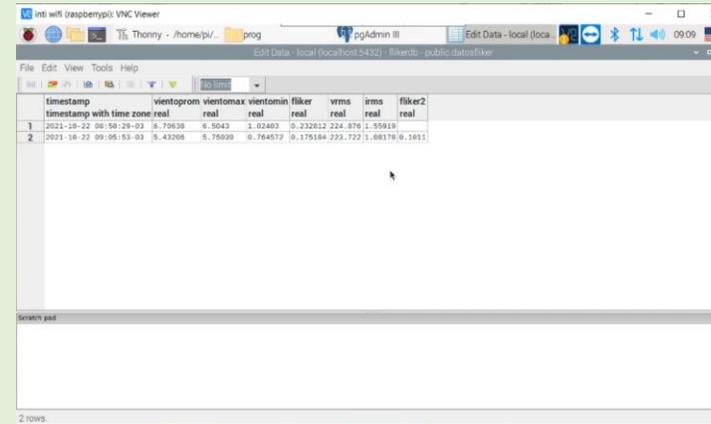
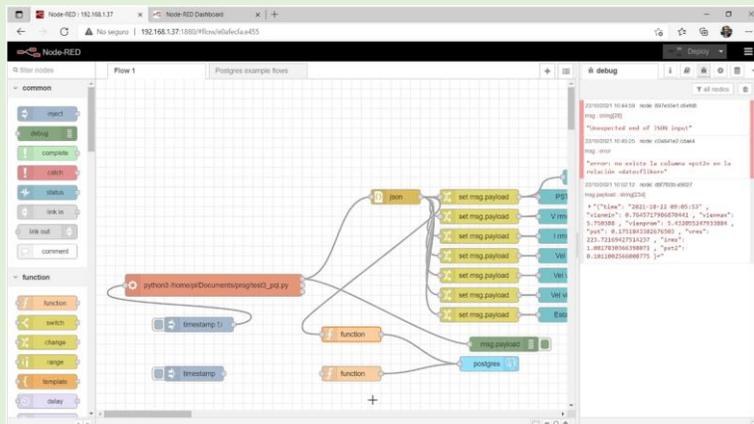
Ejecución de algoritmo python



Valores calculados Almacenado en Base de Datos



Otras posibilidades de Publicar



## ➤ Conclusiones:

- Se ha logrado un sistema completo de ensayo y obtención de la emisión de contenido armónico y otros índices como componente de DC, potencias máximas y reactiva, para aerogeneradores de baja potencia según normativas internacionales.
- El algoritmo desarrollado ha cumplido con las recomendaciones indicadas en la IEC-61400-21 e IEC-61000-4-7.
- Integrado a la electrónica experimental, y obtenido los primeros resultados mostrados en tablas y efectuadas comparaciones, ratifican la bondad del sistema desarrollado, que ahora suma a la evaluación del flicker otra cantidad de índices de calidad según establecen las normativas.
- Por otro lado, se ratifica lo indicado en bibliografía, donde para la eólica de baja potencia por sus particularidades técnicas, conformación de los sistemas, y variabilidad del recurso eólico, con “rápidos” cambios de potencias instantáneas inyectadas, se considera oportuno evaluar los índices de calidad de energía considerando al sistema de generación como una sola unidad (completa), de manera análoga al concepto aplicado para los aerogeneradores de alta potencia.
- Resta realizar mayor número de evaluaciones, utilizando aerogeneradores en otras potencias y tecnologías.

# Muchas Gracias

Ariel Agnello; [aagnello@frn.utn.edu.ar](mailto:aagnello@frn.utn.edu.ar)

Ruben Bufanio; [rbufanio@frn.utn.edu.ar](mailto:rbufanio@frn.utn.edu.ar)

