

Módulo 7:

# “Dimensionado de electrolizadores con suministro variable”

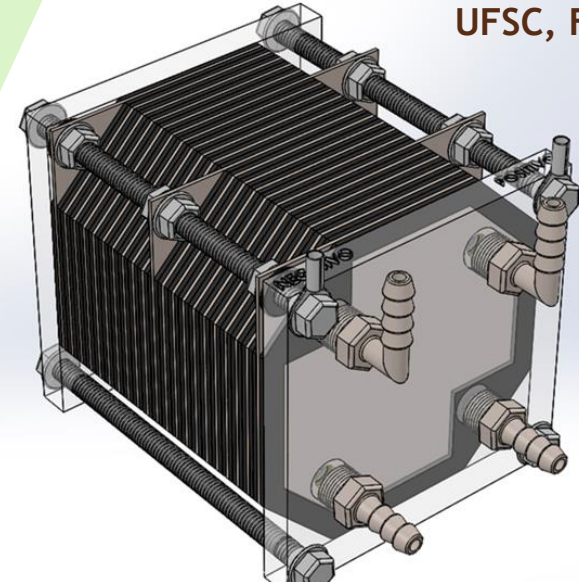
**Dr. José Gabriel García Clúa**

GCA, Instituto LEICI, UNLP-CONICET,  
Dpto. de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional de La Plata  
[jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar](mailto:jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar)

Basada en el artículo de  
María Angélica Gallo y José Gabriel García Clúa,  
“*Sizing and analytical optimization of an alkaline water electrolyzer powered by a grid-assisted wind turbine to minimize grid power exchange*”,  
Renewable Energy, ISSN 0960-1481, Vol. 216,  
118990, Elsevier, 2023.

**MINICURSO**  
**ELECTROLIZADORES**

8 de noviembre de 2024,  
UFSC, Florianópolis



➔ *Fundamentos y descripción de la operación variable del electrolizador alcalino.*

➔ *Caracterización del recurso eólico y de la turbina.*

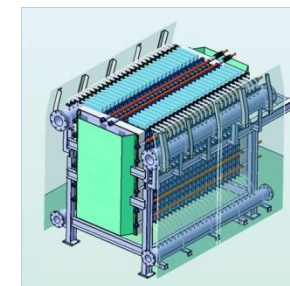


➔ *Producción de hidrógeno basado en energía eólica con asistencia de la red.*

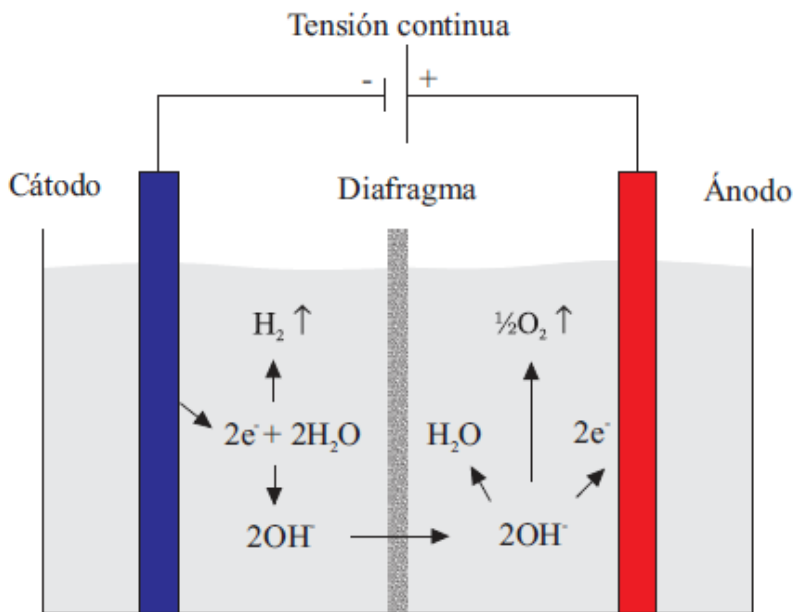


➔ *Dimensionado del electrolizador para optimización de la producción.*

➔ *Síntesis y discusión de resultado prácticos obtenidos.*



# - Fundamentos y descripción de la operación variable del electrolizador alcalino



Celda de electrólisis

El electrolizador alcalino se compone de N de ellas en serie (diseño bipolar)

## Modelo termodinámico

$$\Delta H = \underbrace{\Delta G}_{zFU_{cel}} + \underbrace{\Delta Q}_{T_E \Delta S}$$

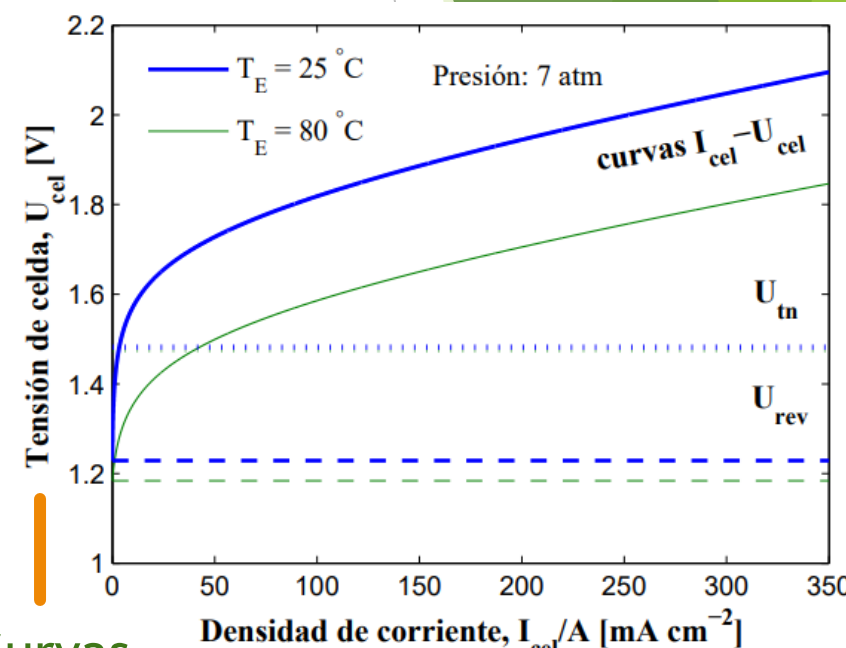
## Modelo electroquímico

$$U_{cel} - U_{rev} = \underbrace{\frac{r}{A} I_{cel}}_{U_{ohm}} + \underbrace{s \log_{10} \left( \frac{t}{A} I_{cel} + 1 \right)}_{U_{act}}$$

Tasa de producción  
Eficiencia energética

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{I_{cel}}{zF}$$

$$\eta_E = \eta_F \frac{U_{tn}}{U_{cel}}$$



Curvas características (modelo estático)

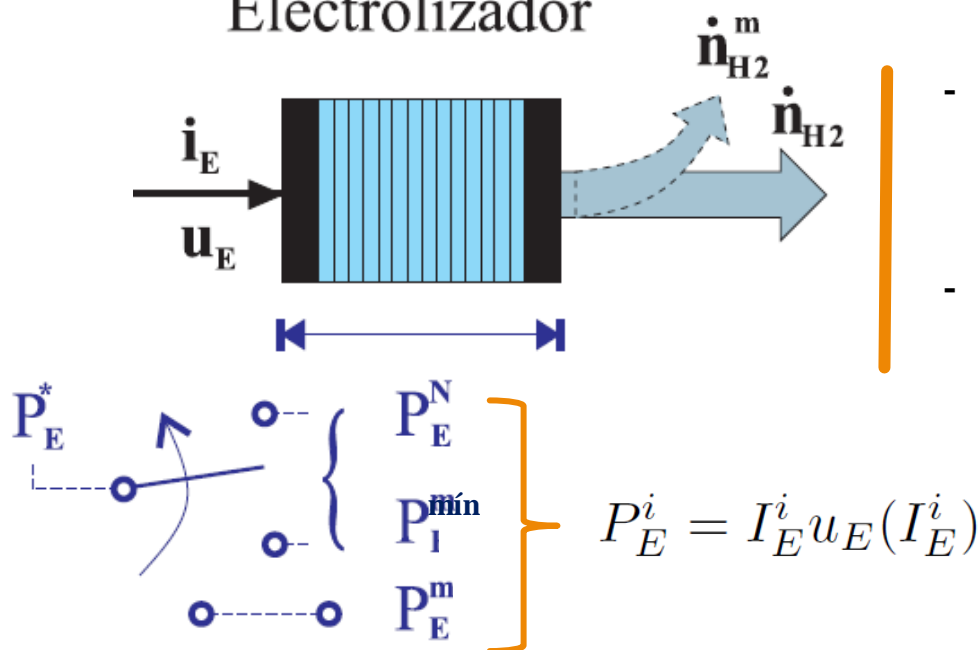
**Diseño comercial: operación fija que optimiza calidad y eficiencia de la electrólisis (corriente de celda nominal)**

# - Fundamentos y descripción de la operación variable del electrolizador alcalino

*Operación variable que se adapte y asegure requerimientos operativos del diseño comercial*

- Corriente de mantenimiento ( $i = m$ ) evita continuas paradas y arranques que aceleran corrosión de electrodos;
- Mantiene temperatura y presión de operación para rápido restablecimiento ante aumento suficiente del suministro;
- Los gases producidos - de pureza baja pero segura - son venteados;

Electrolizador



- Corriente mínima ( $i = mín$ ), límite inferior que evita que la pureza y eficiencia decaigan a valores críticos (típicamente 25-40 % de  $I_N$ );
- Corriente nominal ( $i = N$ ), límite superior establecido por el fabricante;

*Estas restricciones, basadas en experiencias publicadas, mejoran el desempeño y lo acercan más al **modelo cuasi-estático***

# - Caracterización del recurso eólico y de la turbina

Distribución de probabilidad de Weibull:

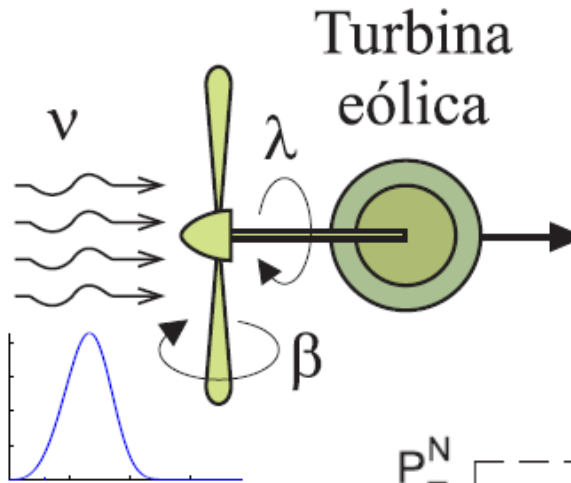
de velocidad viento  $v$ :

$$F(v) = 1 - \exp(-(\nu/c)^k)$$

con  $k$ , factor de forma y  $c$ , coeficiente de escala. Un parámetro más característico del recurso es el viento medio

$$v_m = c \Gamma(1 + 1/k)$$

**[1,66 - 1,77] es la relación  $v_N/v_m$  recomendada para su emplazamiento**

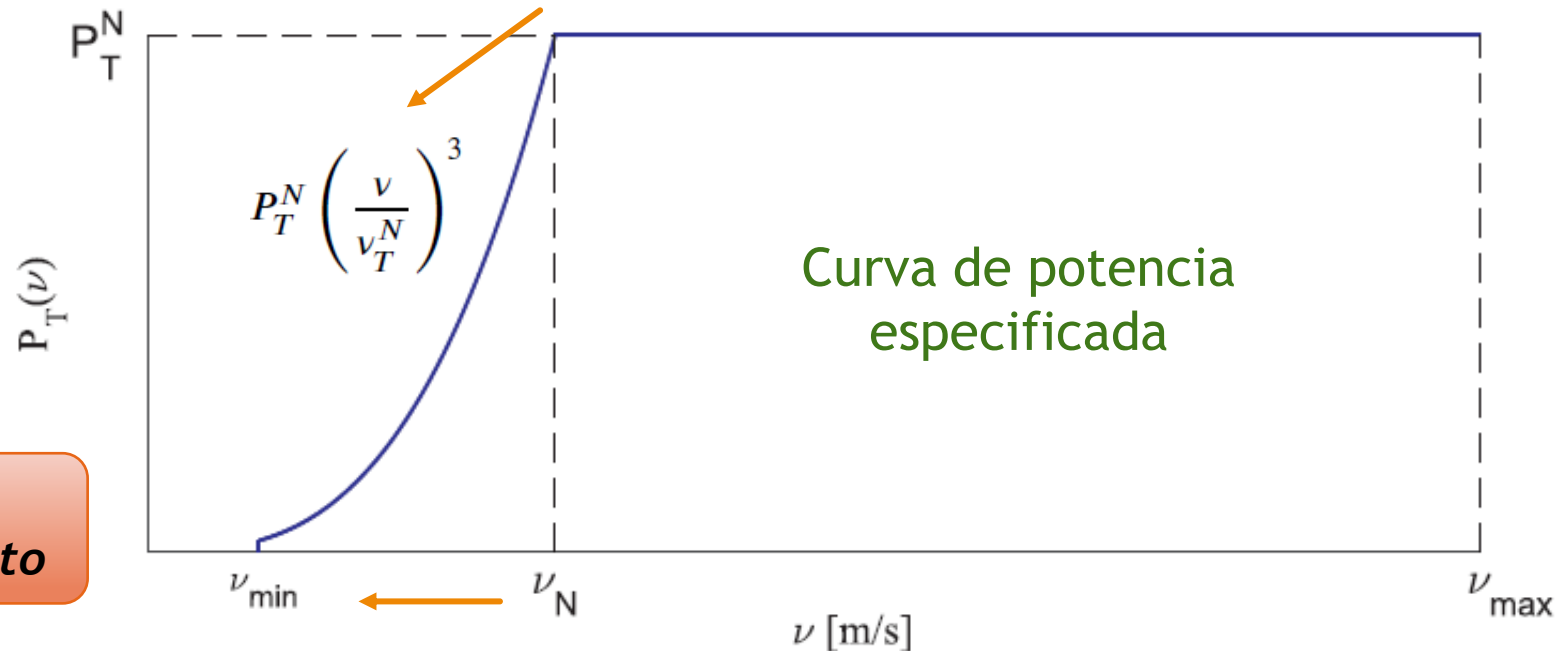


Potencia mecánica capturada

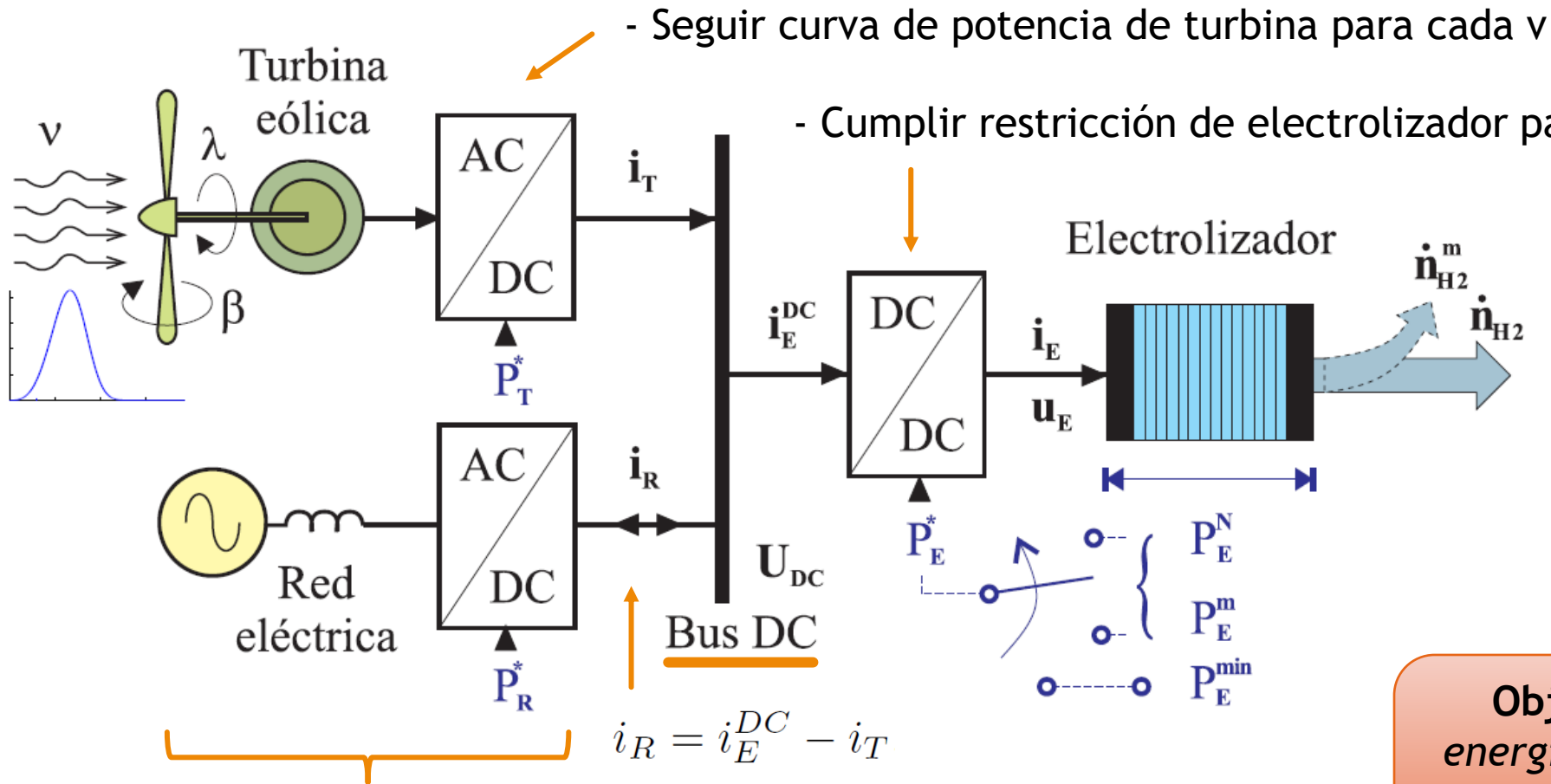
$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_T C_P(\lambda, \beta) v^3$$

Relación de punta de pala se fija para  $C_{P,max} < 16/27$  (límite de Betz)

Ángulo de *pitch* se regula para no superar potencia especificada por fabricante



# - Producción de H<sub>2</sub> basado en energía eólica con asistencia de red



Objetivos de control particulares de cada convertidor

Asistencia de red requerida:  $P_R(v) = P_E - P_T(v)$

Objetivo de diseño: anular energía promedio intercambiada con la red para maximizar producción de H<sub>2</sub> verde

# - Dimensionado del electrolizador para optimización de la producción de H<sub>2</sub> verde

Energía intercambiada con la red estimada en período T:

$$E_R = T \int_0^{\infty} P_R(\nu) F'(\nu) d\nu = 0$$

que la potencia excedente enviada a la red coincida con la suministrada por ésta

$$\int_0^{\infty} P_E(\nu) F'(\nu) d\nu - \int_0^{\infty} P_T(\nu) F'(\nu) d\nu \equiv 0.$$

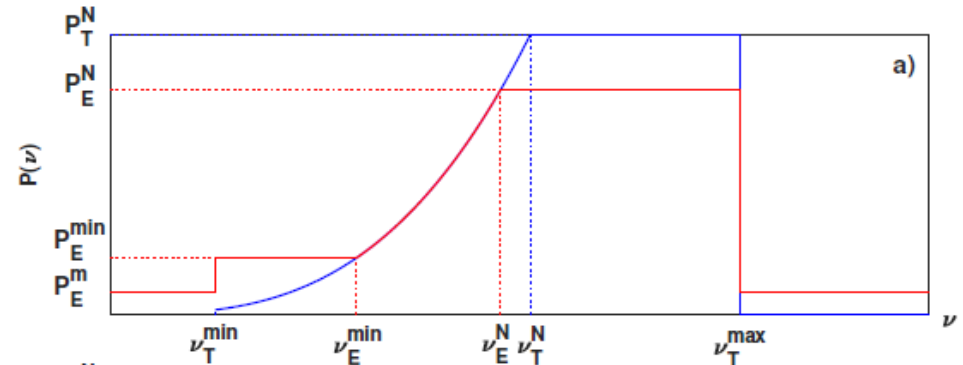
- se integra por partes tomando esta definición de límites de la turbina  $\nu_T^{min} = 0,25 \nu_T^N$ ,  $\nu_T^{max} = 2 \nu_T^N$ .

- se refieren las restricciones del electrolizador a su potencia nominal  $P_E^m = 10\% P_E^N$ ,  $P_E^{min} = 25\% P_E^N$ .

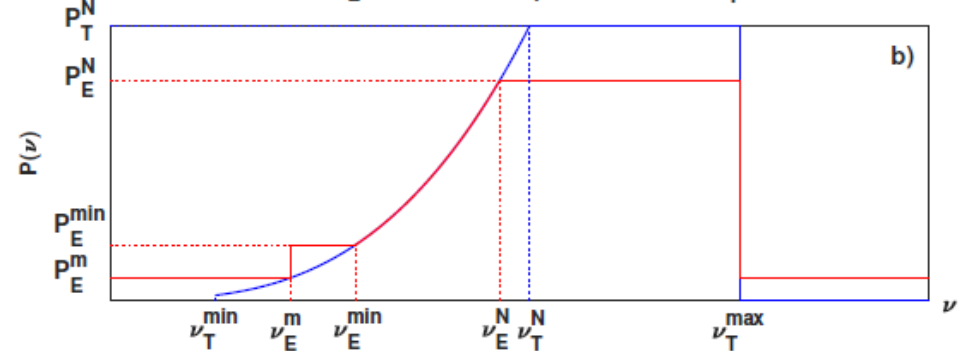
$$r = \frac{P_E^N}{P_T^N} = f(\nu_T^N / \nu_m, k)$$

Se despeja de forma analítica para cada modo de operación del electrolizador

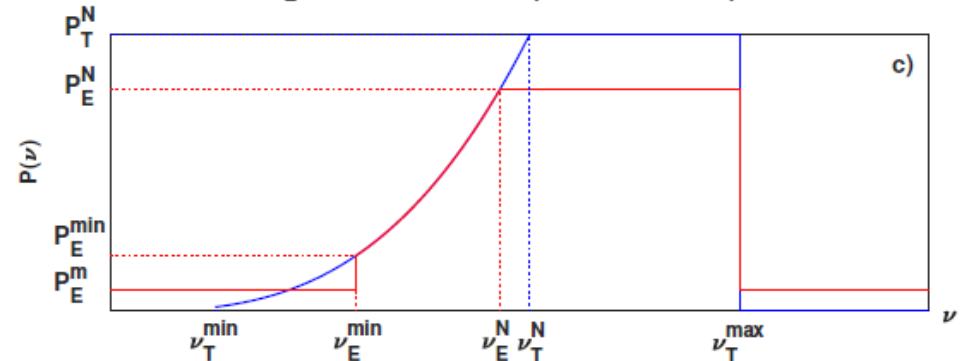
MO1:



MO2:



MO3:



# - Síntesis y discusión de resultados prácticos obtenidos

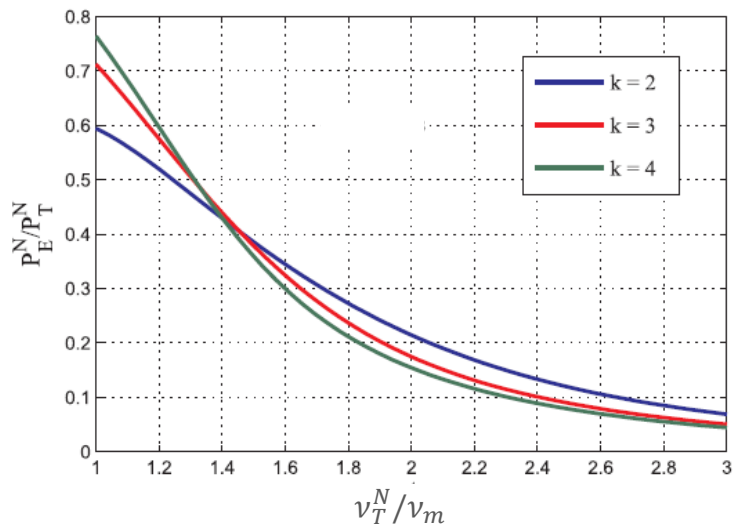
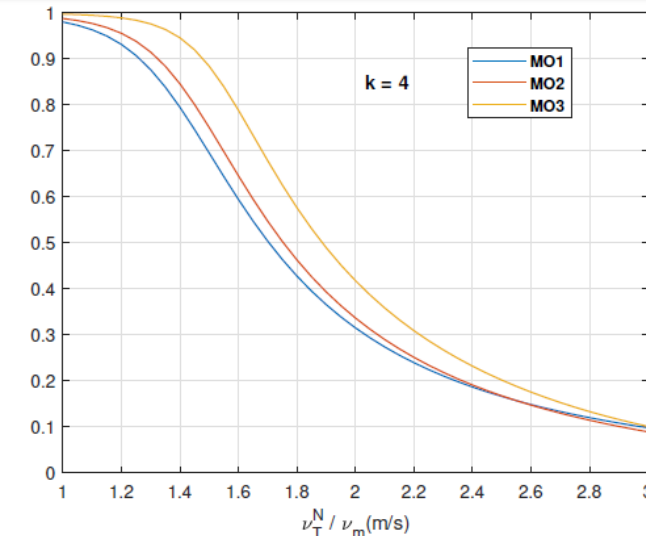
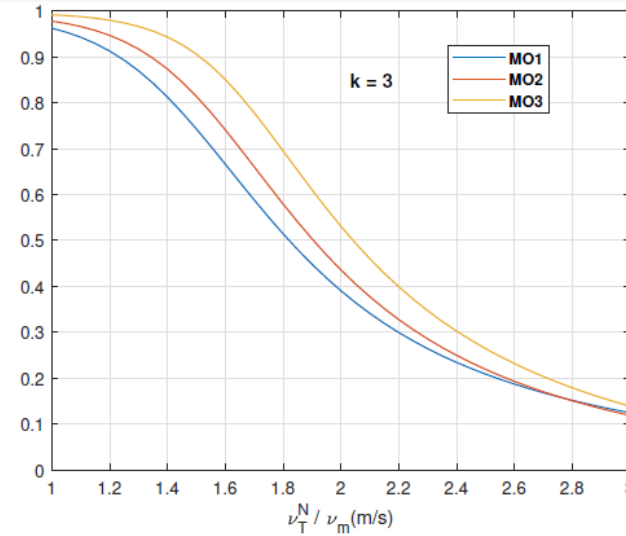
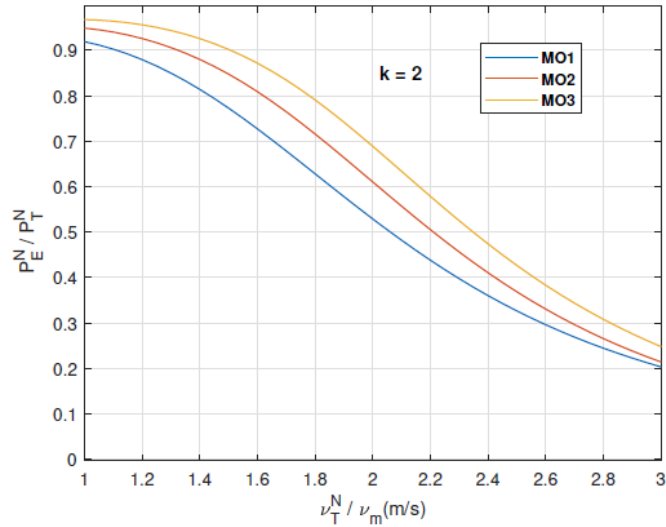
Condiciones de operación variables



$$\frac{P_E^N}{P_T^N} = f(v_T^N / v_m, k)$$



Condiciones de operación fijas



- Las condiciones operativas variables permiten obtener relaciones  $\frac{P_E^N}{P_T^N}$  más cercanas a uno.
- En el rango  $1.66 < \frac{v_T^N}{v_m} < 1.77$  recomendado el MO3 permite obtener valores de  $\frac{P_E^N}{P_T^N}$  1.4 veces mayores que en condiciones nominales fijas.



# - Síntesis y discusión de resultados prácticos obtenidos

## Condiciones de la simulación:

**Perfil de viento:** Generado aleatoriamente con distribución de Weibull -  $k = \{2, 3, 4\}$  y  $v_m = 5$  m/s - cada 12 h en  $T = 1$  año

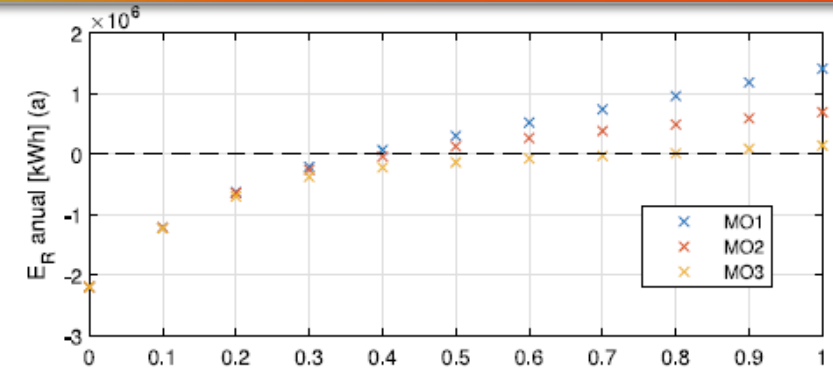
**Turbina:**  $P_T^N = 1,5$  MW y  $v_T^N = 10$  m/s

**Electrolizador:** Valores discretos de  $P_E^N$  entre 0 y  $P_T^N$ . Se corre una simulación para cada valor y cada modo de operación.

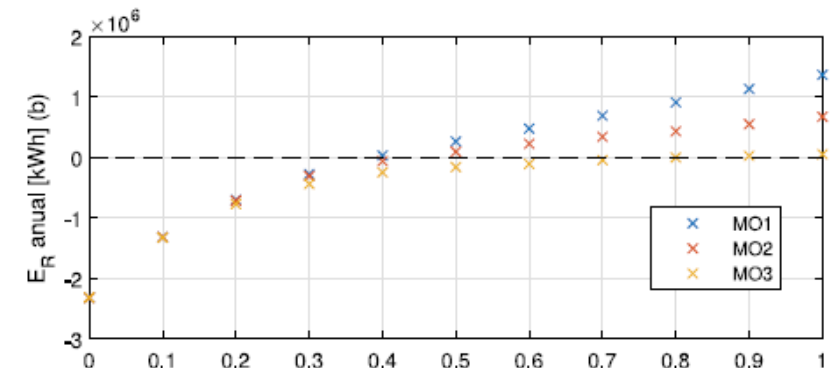
**Red:** Se integra su potencia para obtener la energía anual de cada simulación. De aquella más cercana a 0 resulta la relación de potencias óptima, que aproxima el resultado teórico.

En todos los casos el modo de operación que anula la asistencia de la red en un año con mayor relación de potencias es el MO3, seguido por el MO2 y luego el MO1

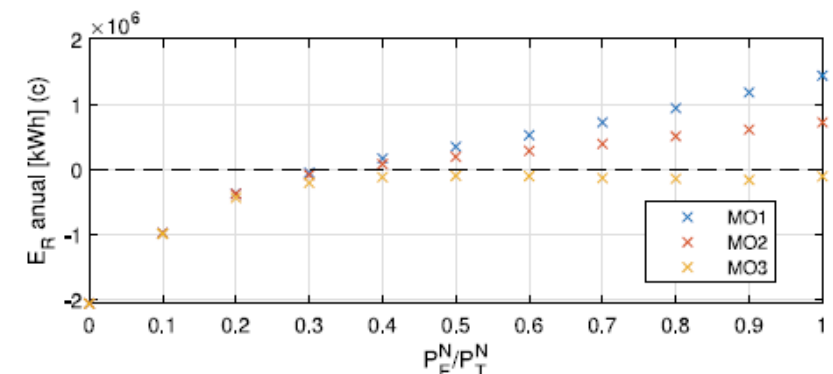
$k = 2$



$k = 3$



$k = 4$



# Continuará... en el Grupo de Control Aplicado, LEICI, UNLP-CONICET, Argentina

MINICURSO “ELECTROLIZADORES”  
8 de noviembre de 2024,  
UFSC, Florianópolis

- Dentro de la línea «**Control de sistemas de energías renovables**», se estudia dimensionamiento de electrolizador integrado por múltiples celdas electrolíticas y secuencia de su conmutación para optimizar la producción de  $H_2$  sustentable;



- Otras líneas de investigación del grupo: teoría de control; control de sistemas y procesos biológicos; control de sistemas autónomos (ver <http://gca.ing.unlp.edu.ar/>);



¡MUCHAS GRACIAS!

[jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar](mailto:jose.garciaclua@ing.unlp.edu.ar)



**Universidad Nacional de La Plata**



**Instituto LEICI**  
**Departamento de Ing. Química**  
**Facultad de Ingeniería (UNLP)**

CONICET



**Consejo Nacional de**  
**Investigaciones Científicas y**  
**Técnicas de Argentina**