



Control Automático - (E1237)
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata
Curso 2024



Descripción y Funcionamiento de un Sistema para la Emulación de Turbinas en Laboratorio

Barrios, Leonardo Agustín
Anderson, Jorge
Puleston, Paul
Mancini, Claus Nahuel

Índice

1	Introducción	2
2	Modelo matemático del sistema OWC	3
2.1	Mecánicas del agua	3
2.2	Turbina auto-rectificadora y cámara OWC	4
2.3	Modelado de curvas	5
2.3.1	Ajuste por modelo racional	5
2.3.2	Validación del ajuste	6
3	Banco de emulación de turbinas undimotrices	8
4	Módulo de control de la máquina impulsora	11
5	Interfaz de usuario	11
5.1	Lectura del recurso y guardado de los datos de emulación	13
5.2	Función de la interfaz durante la emulación	13
6	Pruebas y resultados	13
7	Agracedimientos	16

1. Introducción

El propósito de esta publicación es ofrecer a los alumnos una comprensión clara de lo que es un emulador y su utilidad en el contexto de las turbinas para sistemas de columna de agua oscilante (OWC). Un emulador de turbinas permite reproducir en tiempo real las curvas de cupla-velocidad de estas turbinas utilizando un perfil de recurso seleccionado, que consiste en el flujo de aire producido por las olas que pasa a través de la turbina.

En este emulador se emplea el microcontrolador DSP TMS320C28335 de Texas Instruments, que fue previamente utilizado en un proyecto de emulación de turbinas eólicas. Este microcontrolador realiza los cálculos necesarios en tiempo real, permitiendo la correcta emulación de las curvas deseadas. La señal de referencia proporcionada por el módulo de control varía de 0 a 20 mA y es proporcional a la cupla calculada según las características del modelo seleccionado, la velocidad de rotación de la turbina y el perfil de ola dado.

La configuración del dispositivo se realiza a través de una interfaz de usuario que se comunica mediante USB, permitiendo seleccionar el modelo a emular, los rangos de operación, las características del banco de trabajo y el perfil de olas. Además, esta interfaz permite visualizar en tiempo real los resultados de la emulación, facilitando el análisis del comportamiento del generador. Los datos obtenidos de la emulación, incluyendo recurso, tiempo, cupla y velocidad, pueden ser guardados en un archivo CSV para su posterior análisis.

El uso de emuladores es de gran utilidad para el desarrollo y optimización de tecnologías de conversión de energía marina. Estas tecnologías aprovechan la energía cinética de las olas y la convierten en energía eléctrica utilizable. Comprender y emular el comportamiento de las turbinas en diferentes condiciones de operación es esencial para mejorar la eficiencia y fiabilidad de estos sistemas.

En este contexto, el mar y el océano ofrecen diversas formas de energía, pero la complejidad se encuentra en convertirla en energía eléctrica. La mayoría de estos dispositivos extractores de energía marina siguen un esquema de conversión en dos etapas: la primera convierte la energía cinética de las olas en un movimiento mecánico oscilatorio, mientras que la segunda convierte este movimiento en energía eléctrica utilizable mediante un generador eléctrico [1].

En este caso, se abordará en específico el dispositivo de extracción de energía undimotriz llamado *Columna de agua oscilante* (OWC: Oscillating water column). Este sistema consiste en una cámara que captura las olas, formada por una estructura fija con la parte inferior abierta por debajo del nivel del agua. Las olas que entran en esta cámara comprimen y descomprimen el aire en su interior. Este aire atraviesa un orificio generando un flujo de aire oscilante en donde se encuentra una turbina acoplada a un generador, convirtiendo de esta manera este flujo de aire oscilatorio en energía eléctrica. La turbina implementada en estos sistemas debe ser **rectificante**, lo que significa que sin importar el sentido del flujo del aire, la turbina debe aplicar un torque en un solo sentido. Algunos ejemplos de estas turbinas son la turbina de Wells (el cual se explicará más adelante), o la turbina de impulso axial. Se puede ver un esquema del dispositivo en la Figura 1.

Este sistema de extracción de energía marina requiere control para lograr una operación eficiente, lo que implica la aplicación de técnicas de control. Generalmente, se emplean simulaciones o emulaciones para diseñar los algoritmos de control, las primeras son útiles en las etapas iniciales del diseño, pero cuando se busca analizar el comportamiento real del generador, la mejor opción es llevar a cabo una emulación, donde se realiza físicamente la prueba.

Un emulador es un dispositivo que reproduce el comportamiento de otro sistema diferente,

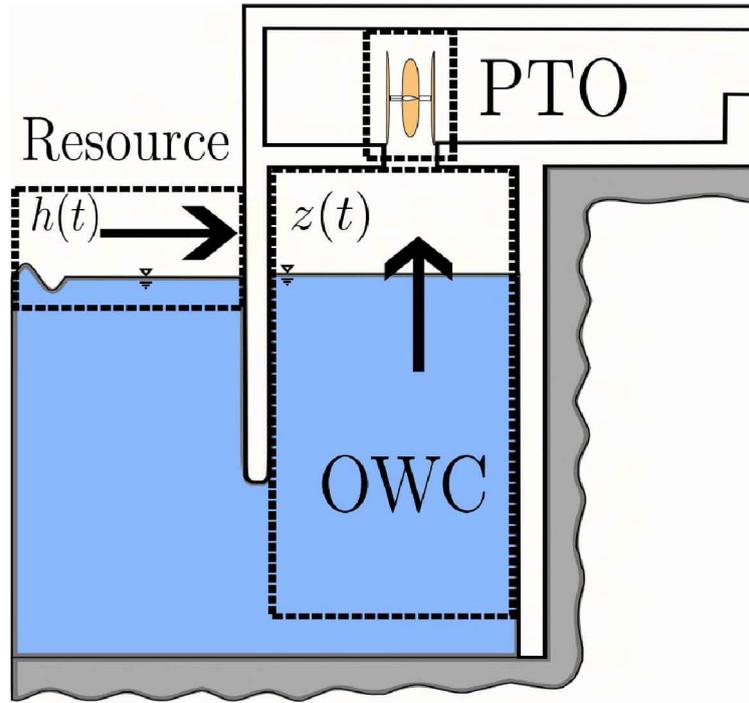


Figura 1: Esquema de funcionamiento del sistema OWC, (PTO, es el sistema de extracción de potencia) [2].

generalmente con el propósito de probar, demostrar o investigar su funcionalidad sin necesidad de tener acceso al sistema original. Básicamente, emula las características y funciones del sistema objetivo para simular su comportamiento en un entorno controlado y seguro. Por esta razón, aquí se demuestra la implementación y funcionamiento del emulador del sistema de extracción de energía undimotriz mediante el dispositivo de columna de agua oscilante (OWC). Es importante destacar que este emulador se construye sobre la base de otro previamente desarrollado para turbinas de energía eólica [3].

2. Modelo matemático del sistema OWC

El sistema de aprovechamiento de energía marina de columna de agua oscilante implica captar energía a través del flujo de aire generado por las oscilaciones del agua. Se instala una turbina en un conducto por donde fluye el aire oscilante generado por las olas, permitiendo así la extracción de energía mediante la rotación de la turbina. Para calcular las magnitudes del torque y el flujo de aire generados por las propias olas, se emplean ecuaciones descriptivas. A continuación se detallan estas ecuaciones.

2.1. Mecánicas del agua

La representación más básica de una ola es una senoide variable en la superficie del agua. Esta descripción puede definirse teniendo en cuenta la altura del agua, H , que es la distancia entre la cresta de la ola hasta el canal, y el período de la ola, T , que es el tiempo que se toma la ola para volver a pasar, como se puede ver en la Figura 2.

Quedando la ecuación que describen las olas:

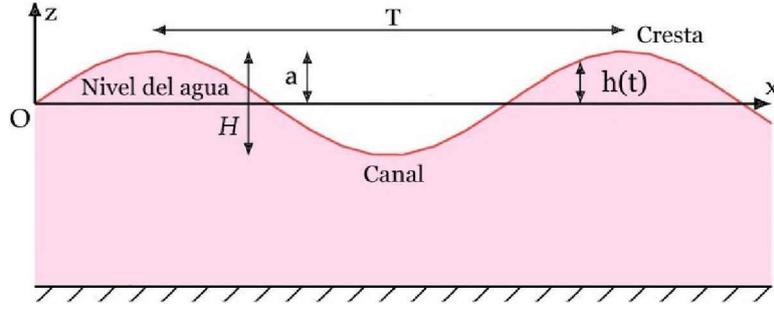


Figura 2: Ejemplo de ola sinusoidal con el valor de H y T definido [4].

$$h(t) = \frac{H}{2} \sin(\omega t) \quad (1)$$

Donde t es el tiempo [s], y $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Es importante destacar que el recurso del que se extrae directamente la energía es el flujo de aire que atraviesa la turbina, por lo que no se correlaciona linealmente con las olas. Solo por aspectos prácticos se obviaré esta problemática, y se considerará que el flujo de aire si depende linealmente con las olas, ya que su simplicidad permite un análisis detallado del comportamiento del sistema con una predicción suficiente.

2.2. Turbina auto-rectificadora y cámara OWC

Para poder convertir el flujo bidireccional (ν_t) en movimiento rotatorio unidireccional (ν_x), se utilizan turbinas auto-rectificantes, de los cuales la mayoría son máquinas de flujo axial de dos tipos: turbinas de Wells [5] y turbinas de impulso. En este caso se hará el análisis teniendo en cuenta las turbinas de Wells, que están construidas a partir de palas escalonadas a 90° respecto del flujo, teniendo así un funcionamiento sencillo y de buena fiabilidad [6]. Se puede ver un esquema del funcionamiento de la turbina en la Figura 3.

El modelo completo de las dinámicas mecánicas del sistema OWC está descrito por la siguiente ecuación:

$$J\dot{\Omega}_r = T_t - T_e - T_r \quad (2)$$

Donde J representa la inercia de las partes móviles, T_t el torque de la turbina, T_r el torque de pérdidas por roce y T_e el torque del generador.

El rol esencial del emulador es representar lo más fiel posible el comportamiento de la turbina de Wells. Por lo que se tiene en cuenta la ecuación que describe el torque que genera la turbina cuando se le aplica un determinado recurso [8]:

$$T_t = C_t(\phi)kr[\nu_x^2 + (r\Omega_r)^2] [Nm] \quad (3)$$

donde $k = \rho bnl/2[kg/m^3]$, $\rho[kg/m]$ es la densidad del aire, $b[m]$ es el largo de la pala, n es el número de palas y $l[m]$ es la longitud de la cuerda, $r[m]$ es el radio de la pala, ν_x es el flujo de aire rectificado ($\nu_x = |\nu_t|$), $\Omega_r[rad/s]$ es la velocidad rotacional de la turbina, y $C_t(\phi)$ es el coeficiente de torque, que también depende de ϕ , el coeficiente de flujo. El valor de este coeficiente es particular de cada dispositivo.

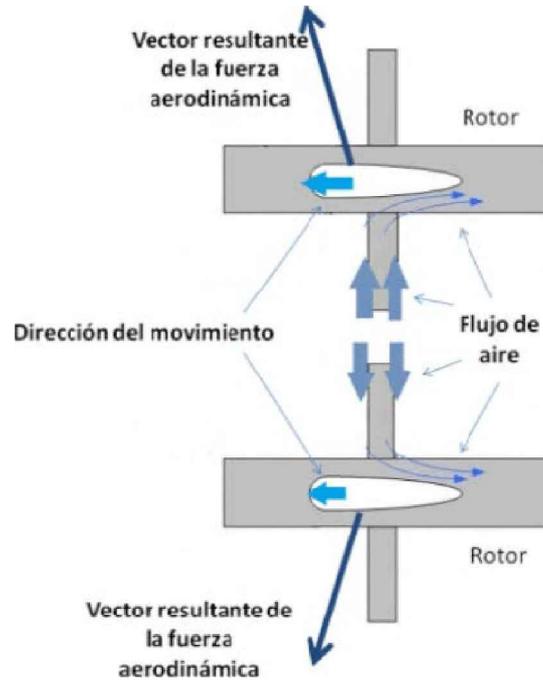


Figura 3: Esquema del funcionamiento de la turbina de Wells [7].

Coefficiente de flujo:

$$\phi = \frac{v_x}{r\Omega_r} \quad (4)$$

donde $r[m]$ es el radio de la pala. Notar la semejanza con la relación de velocidad periférica λ o TSR, propia de las turbinas eólicas.

2.3. Modelado de curvas

El emulador para funcionar realiza el cálculo del valor de la cupla que se debe imponer en la máquina impulsora actuando como la turbina rectificadora. Se calcula el valor de esta una vez que se obtienen los datos del recurso y la velocidad, utilizando la Ecuación 3, por lo que es necesario caracterizar la curva $C_t(\phi)$. Se puede la puede ver en la Figura 4.

Para ello se realiza un ajuste de la curva $C_t(\phi)$, en donde se pueden usar varios tipos. Luego de probar con distintos ajustes, se terminó por elegir el método de ajuste por modelo racional.

2.3.1. Ajuste por modelo racional

El ajuste por modelo racional, también conocido por ecuaciones racionales, son razones entre polinomios dados por:

$$y_R = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} p_i x^{n+1-i}}{x^m + \sum_{i=1}^m q_i x^{m-i}} \quad (5)$$

donde n es el grado del numerador, y m es el grado del denominador.

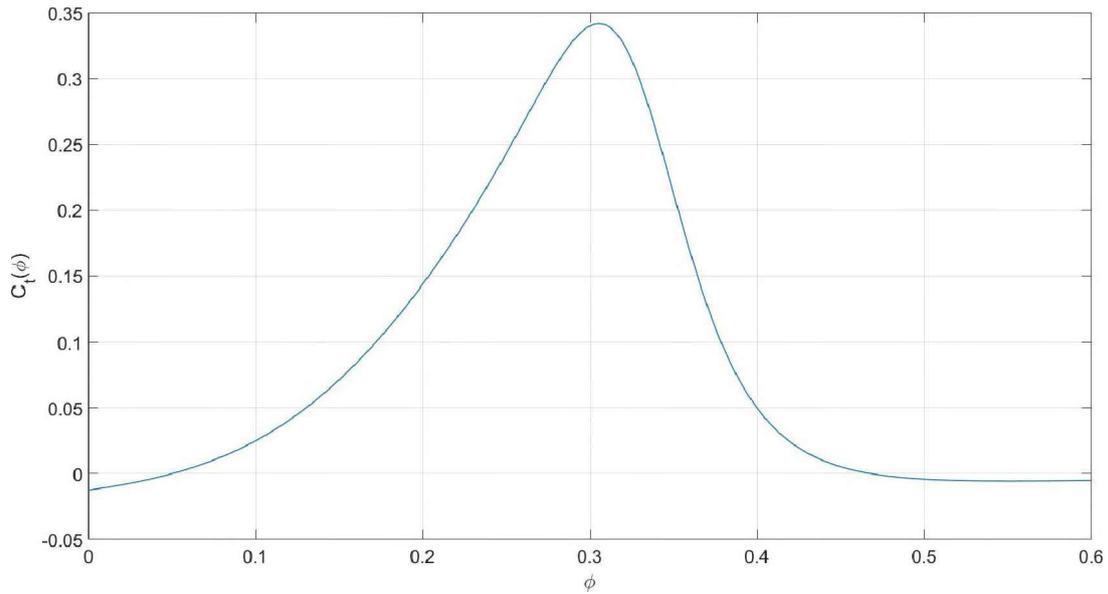


Figura 4: Curva $C_t(\phi)$ que se quiere ajustar, extraído por datos experimentales.

Utilizando la herramienta de Matlab para ajustar curvas, “*Curve Fitting*” se obtiene que el mejor resultado de ajuste es un polinomio en el numerador de grado 2, y uno de grado 4 en el denominador. Llegando entonces la siguiente expresión:

$$C_{tR} = \frac{p_1x^2 + p_2x + p_3}{x^4 + q_1x^3 + q_2x^2 + q_3x + q_4} \quad (6)$$

Agregando 2 parámetros adicionales de normalización para que los valores de estos sean más sencillos de manipular: desviación estándar, σ y media, μ , considerando que $x = \left(\frac{\phi - \sigma}{\mu}\right)$.

Los valores obtenidos son:

$$\begin{aligned} p_1 &= -0,2096 \\ p_2 &= 0,1659 \\ p_3 &= 0,573 \\ q_1 &= -1,459 \\ q_2 &= 2,409 \\ q_3 &= -4,349 \\ q_4 &= 3,991 \\ \sigma &= 0,1159 \\ \mu &= 0,2 \end{aligned}$$

que describen la curva azul de la Figura 5.

2.3.2. Validación del ajuste

Para verificar el buen ajuste a la curva C_t se calcula la curva Cupla-Velocidad y la curva Potencia-Velocidad de la turbina con el C_t obtenido, y se lo compara con lo que se obtiene

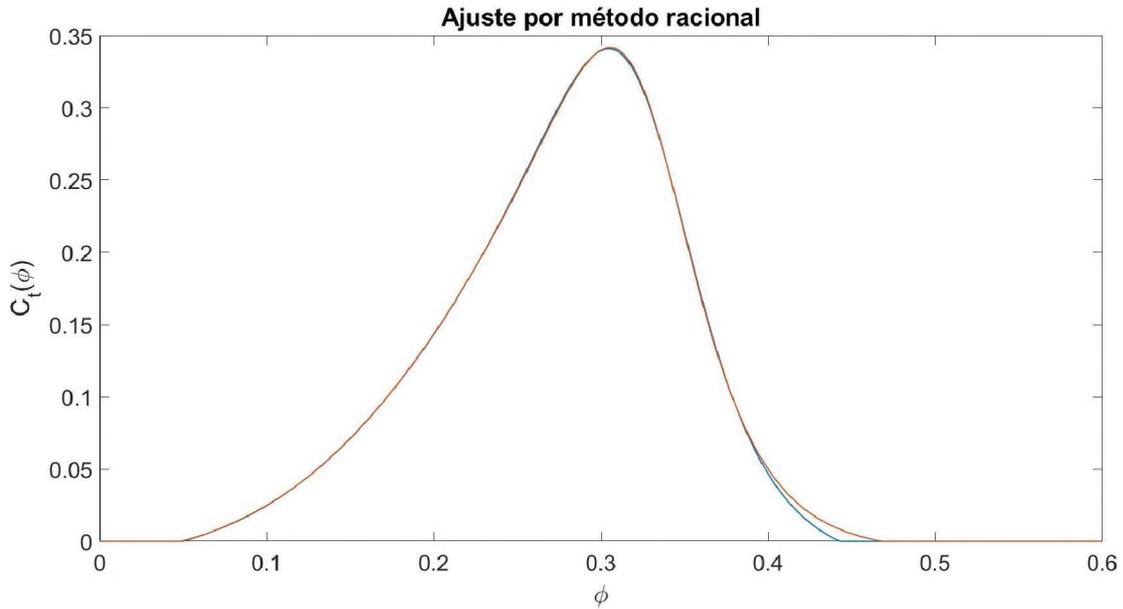


Figura 5: Comparación de la curva C_t original (naranja) con el ajuste realizado por método racional (azul).

calculando con los valores originales obtenidos de C_t 3. El resultado se puede ver en la Figura 6.

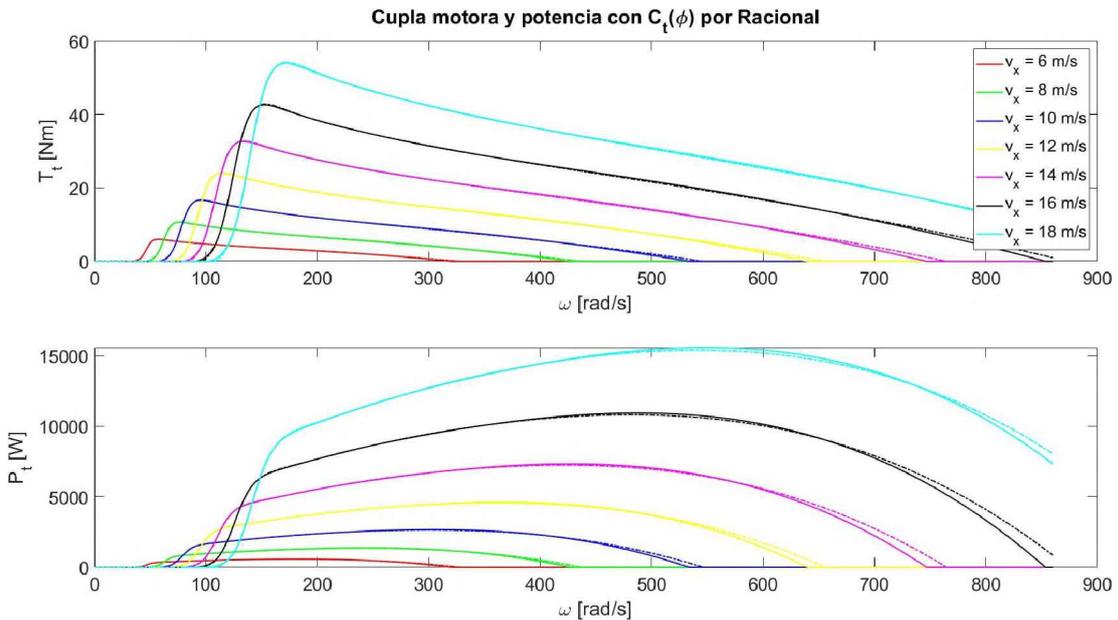


Figura 6: Comparación del torque y potencia extraída de la turbina para diferentes recursos calculando con el ajuste C_t racional (línea punteada y discontinua) y C_t original (línea continua).

Al analizar las curvas de torque, se nota que en la región ascendente el error es mínimo, y en la descendente el ajuste racional exhibe un error aceptable. La parte descendente de la curva es crítica, ya que es donde se logra la mayor extracción de potencia (donde se tienen los máximos valores de potencia). Teniendo en cuenta la Figura 7, la curva de color negro, indicada como $T_{t_{opt}}$, corresponde a estos valores máximos de potencia. Como el ajuste obtenido tiene poco error en esa zona, se puede ver que cumple con el objetivo.

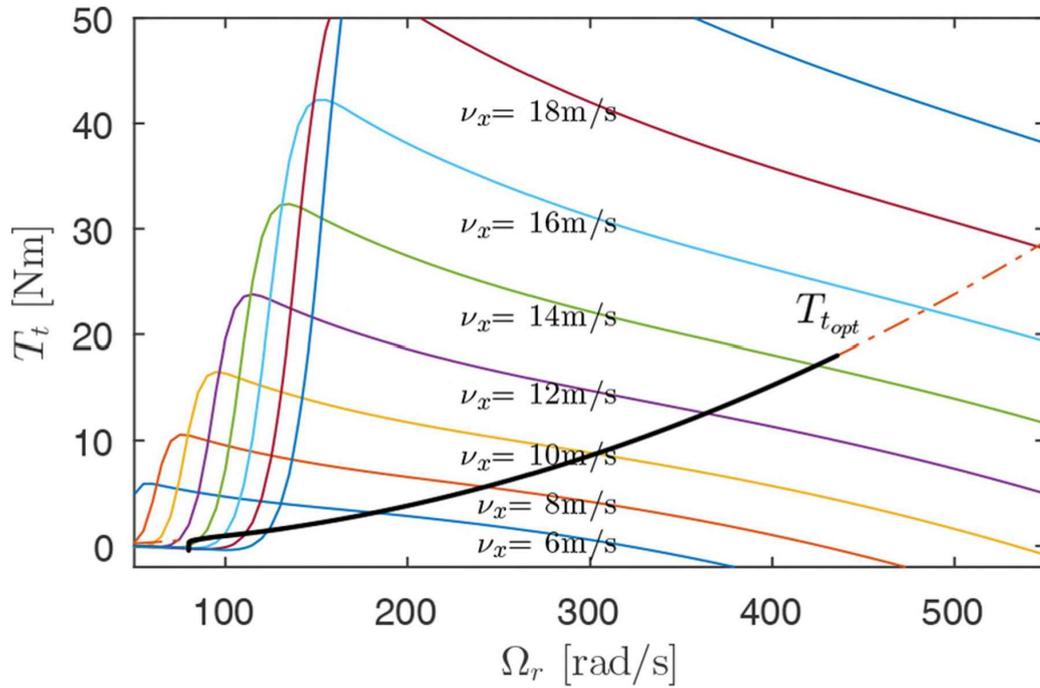


Figura 7: Curva característica del sistema (línea sólida negra) en el plano Cupla-Velocidad. Lugar de máxima extracción de energía de las olas (línea punteada y discontinua naranja). Característica de la turbina para distintos recursos v_x (líneas sólidas coloreadas) [9]

3. Banco de emulación de turbinas undimotrices

Un emulador de turbinas para sistemas de columna de agua oscilante (OWC) permite representar las características cupla-velocidad de un OWC real en el eje de una máquina eléctrica. De este modo, es posible reproducir el funcionamiento de diferentes tipos de turbinas implementadas dentro de estos sistemas. Así, se pueden ensayar estrategias de control sobre el generador eléctrico asociado a la turbina en condiciones que serían difíciles de reproducir en un sistema OWC real. En la Figura 8 se pueden ver las diferentes partes del emulador.

En primer lugar, se observa que la máquina de carga (MC) o generador eléctrico está acoplado mecánicamente a la máquina impulsora (MI). Por un lado la máquina impulsora es la encargada de imponer en su eje la cupla de la turbina emulada, de acuerdo a su velocidad de rotación y la curva característica cupla-velocidad. Por el otro, el generador absorbe esta energía y la reinyecta a la red. La máquina impulsora y la de carga son marca WEG de propósito general tipo W22-IE1-132M-cast iron (15HP) y W21-IE1-132M-aluminio (10HP), respectivamente. Ambas poseen dos pares de polos, siendo la velocidad nominal aproximada de ambas 1500RPM [3]. Se puede ver una imagen en la Figura 9

Para la excitación de ambas máquinas se utilizan variadores de velocidad, estos controlan las cuplas motoras impuestas por estas en su eje, según una referencia que es provista por el módulo de control de cada uno. Los que se utilizaron en este proyecto son Marca Allen-Bradley modelo PowerFlex 755 con corrientes de salida máximas de 30A y 22A para las máquinas impulsora (MI) y de carga (MC) respectivamente [3]. Se puede ver una fotografía en la Figura 10

En cuanto a las variables medidas, la velocidad del eje se realiza mediante un encoder incremental de 1000 pulsos por vuelta marca HEDSS modelo ISC5210-001G. La señal de velocidad es enviada a ambos variadores y a los sistemas de comando de los mismos, los cuales consisten en dos plataformas de cómputo independientes basadas en hardware DSP.

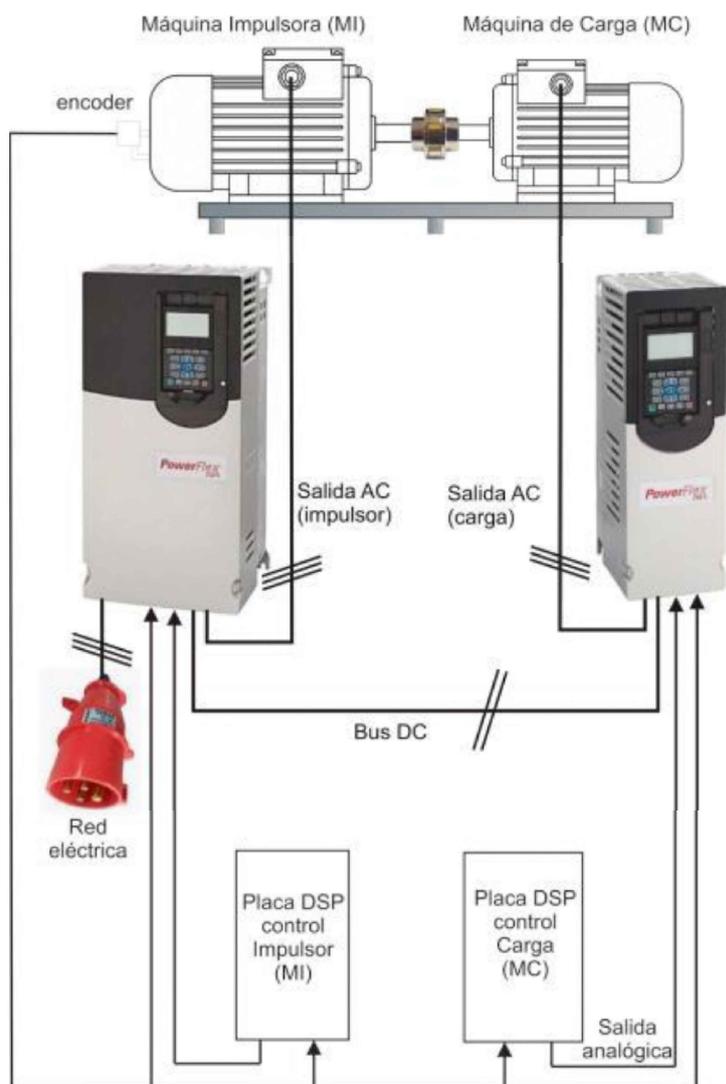


Figura 8: Esquemático del emulador de turbinas para OWC [3].



Figura 9: Máquinas acopladas mecánicamente. Izquierda, máquina de carga. Derecha, máquina de impulsión.



Figura 10: Variadores de velocidad utilizados en el banco de emulación.

Finalmente, los controladores dedicados, conformados por el microcontrolador DSP F28335, de la familia TMS320C28x de Texas Instruments, se encargan de generar la señal de referencia para cada uno de los convertidores. El módulo de control para la máquina de carga (o generador) es donde se implementa la estrategia de control a probar.

Por otro lado, en el módulo de control para la máquina impulsora, la señal de referencia es calculada a partir de la velocidad de rotación de la máquina y el modelo de turbina emulado, en conjunto con los parámetros del banco de emulación y el perfil de recursos. Esta señal es enviada a través de un puerto serie desde la interfaz de usuario hacia el microcontrolador. Ver Figura 11.

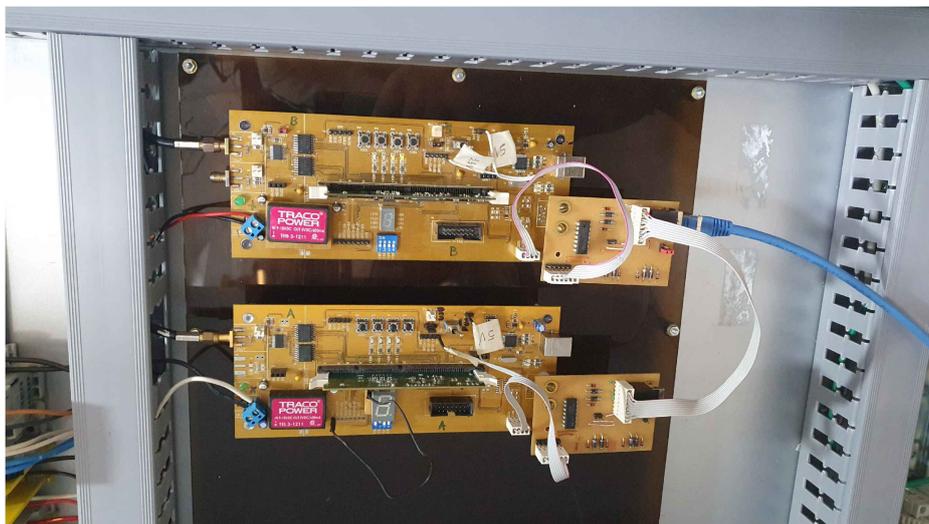


Figura 11: Módulos de control utilizados en el banco de emulación.

Entonces, para la generación de la cupla de referencia, el módulo de control puede descomponerse básicamente en:

- Medición de velocidad.
- Interfaz de usuario.
- Recepción de recurso mediante la interfaz de usuario.
- Unidad de procesamiento.

- Generación de señal de referencia.

4. Módulo de control de la máquina impulsora

Este módulo es el que se utiliza principalmente para la emulación. En este se realiza el cálculo de la cupla motora que se debe imponer en el eje para que refleje el comportamiento de la turbina de Wells.

Para realizar el cálculo de la cupla que debe imponer la máquina impulsora se implementa una interrupción que se ejecuta cada 1ms, con posibilidad de modificación. Esta consiste en la lectura de velocidad, cálculo de ϕ (Ecuación 4), con lo que se calcula el valor de C_t mediante el ajuste descrito en la Sección 2.3.1. Luego se calcula el valor de cupla de la turbina T_t con la Ecuación 3, y finalmente se envía el valor correspondiente al Conversor Digital-Analógico (DAC) a través de la comunicación serial SPI, enviando así el valor al variador de velocidad mediante la señal analógica de referencia. Se puede ver un diagrama de flujo de los pasos que se realizan en la Figura 12.

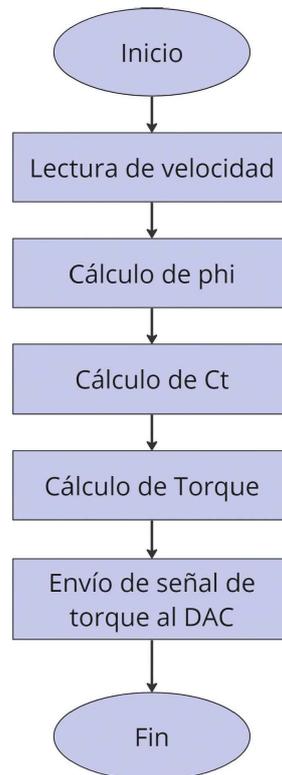


Figura 12: Diagrama de flujo de la interrupción de cálculo de cupla.

5. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario, o interfaz gráfica, es fundamental para simplificar el uso del emulador. Se optó por diseñarla en Python debido a su amplia variedad de librerías con una documentación detallada y accesible. Además, Python ofrece una sintaxis clara y legible, lo que facilita el desarrollo y mantenimiento de la interfaz.

La interfaz consta de distintas partes, que incluyen:

1. Conexión del microcontrolador.
2. Modificación de los parámetros de configuración y del banco de emulación, junto con la carga y descarga de estos.
3. Generación de gráficas de torque-velocidad, potencia-velocidad, recurso-tiempo, torque-tiempo, etc.
4. Lectura del recurso en función del tiempo, guardado de los datos de emulación, inicio y detención de la emulación.

En la Figura 13 se puede ver donde se encuentran estas partes en la ventana de la interfaz de usuario.

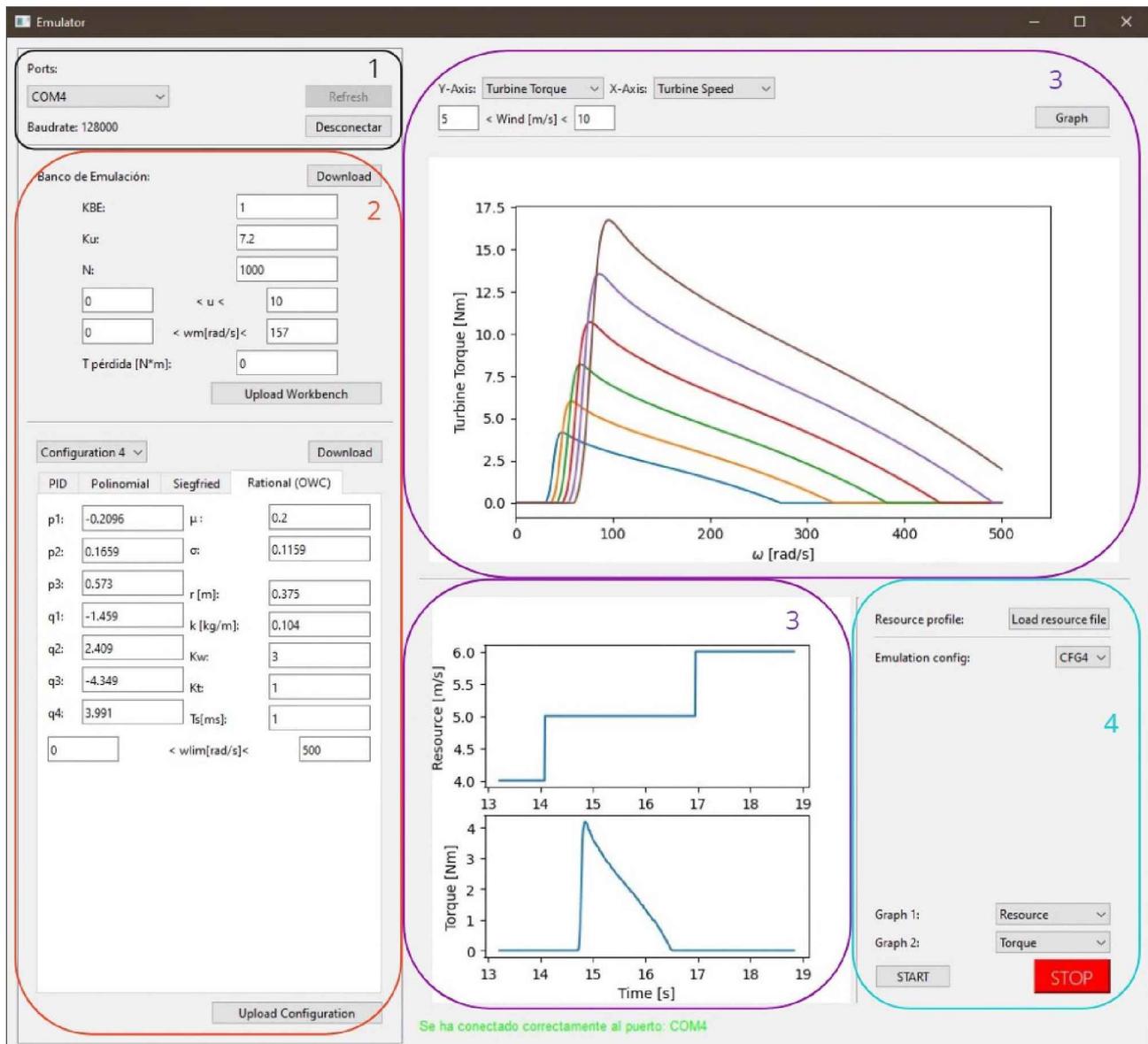


Figura 13: Captura de la interfaz de usuario. 1- Conexión con el microcontrolador, 2- Modificación de los parámetros de configuración y del banco de emulación junto con la carga y descarga de estos, 3- Generación de gráficas, 4- Lectura y guardado de datos, inicio y detención de la emulación.

5.1. Lectura del recurso y guardado de los datos de emulación

La lectura de los recursos se realiza desde la aplicación seleccionando un archivo de tipo CSV (Comma-Separated Values), el cual debe contener el tiempo [s] y el valor del recurso [m/s] (flujo del aire a través de la turbina). Este tipo de archivo se caracteriza por ser un documento de texto con los datos separados por comas ampliamente utilizado debido a su simplicidad y compatibilidad.

En caso de utilizar Matlab para crear los valores del recurso en función del tiempo, se puede emplear la función “writematrix()”, **almacenado el vector de tiempo en la primera columna y el vector del recurso en la segunda**. Es importante destacar que el vector de tiempo debe tener un paso mínimo de 10 ms, ya que es el valor más pequeño con el que el emulador es capaz de trabajar.

Adicionalmente, una vez completada la emulación, existe la opción de guardar los datos de tiempo, recurso, velocidad y torque en otro archivo CSV para su análisis posterior en Matlab, utilizando la función “readmatrix()”.

5.2. Función de la interfaz durante la emulación

Para iniciar la emulación, se requiere establecer la conexión con el microcontrolador, cargar el archivo del perfil de recurso y seleccionar la configuración de turbina deseada. Una vez realizados estos pasos, la emulación comienza cuando el usuario presiona el botón **START**, estableciendo la configuración seleccionada en el DSP y luego enviando la señal de inicio de emulación.

Posteriormente, la interfaz se encarga de enviar el recurso en el intervalo definido por el archivo CSV hasta que se agoten los datos o hasta que se presione el botón **STOP**. Durante este proceso, se grafican los datos en tiempo real en las gráficas inferiores, y se resalta el punto de operación con un punto rojo en la gráfica superior.

Los *hilos de ejecución* son necesarios en este caso para mantener la interfaz en funcionamiento mientras que se ejecuta la emulación y también para tener un buen manejo de los tiempos en el envío de datos. Se generan 2 hilos de ejecución, uno encargado de la comunicación de los recursos con el DSP, y el otro encargado de graficar.

6. Pruebas y resultados

Para probar la funcionalidad del emulador en su totalidad se realiza una prueba con una referencia de tipo sinusoidal rectificadas (imitando lo que se espera obtener como recurso). Se realiza manteniendo la velocidad de rotación constante controlada desde la máquina de carga (como si de alguna estrategia de control se tratase), y los datos son extraídos a través de la interfaz de usuario.

Hay que tener en cuenta una serie de pasos cruciales y necesarios para el correcto funcionamiento de ambos motores y del microcontrolador. Teniendo ambos variadores conectados mediante la red a la computadora se encienden estos, y se coloca la máquina de carga (que funciona como generador) en control de velocidad y la máquina impulsora controlando torque.

La referencia de velocidad es impuesta mediante el software de los variadores, y la referencia del torque de la máquina impulsora es tomada desde el DAC, perteneciente al módulo de control.

Los parámetros utilizados para la prueba llevada a cabo son:

Banco de emulación:

$$\begin{aligned}KBE &= 1 \\Ku &= 7,2 \\N &= 1000 \\u_{min} &= 0 \text{ V} \\u_{max} &= 10 \text{ V} \\w_{m \ min} &= 0 \text{ rad/s} \\w_{m \ max} &= 157 \text{ rad/s} \\T_p &= 0\end{aligned}$$

Configuración:

$$\begin{aligned}p_1 &= -0,2096 \\p_2 &= 0,1659 \\p_3 &= 0,573 \\q_1 &= -1,459 \\q_2 &= 2,409 \\q_3 &= -4,349 \\q_4 &= 3,991 \\\sigma &= 0,1159 \\\mu &= 0,2 \\r &= 0,375 \text{ m} \\k &= 0,104 \\Kw &= 3 \\Kt &= 2 \\Ts &= 1ms \\w_{lim \ min} &= 0 \text{ rad/s} \\w_{lim \ max} &= 500 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

El recurso que se utiliza para el ensayo una senoide rectificada con un paso de 10ms, que después de un intervalo de tiempo se aumenta su amplitud. El recurso ya se envía rectificado suponiendo que la turbina de Wells rectifica perfectamente el flujo de aire que atraviesa por ella.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la emulación.

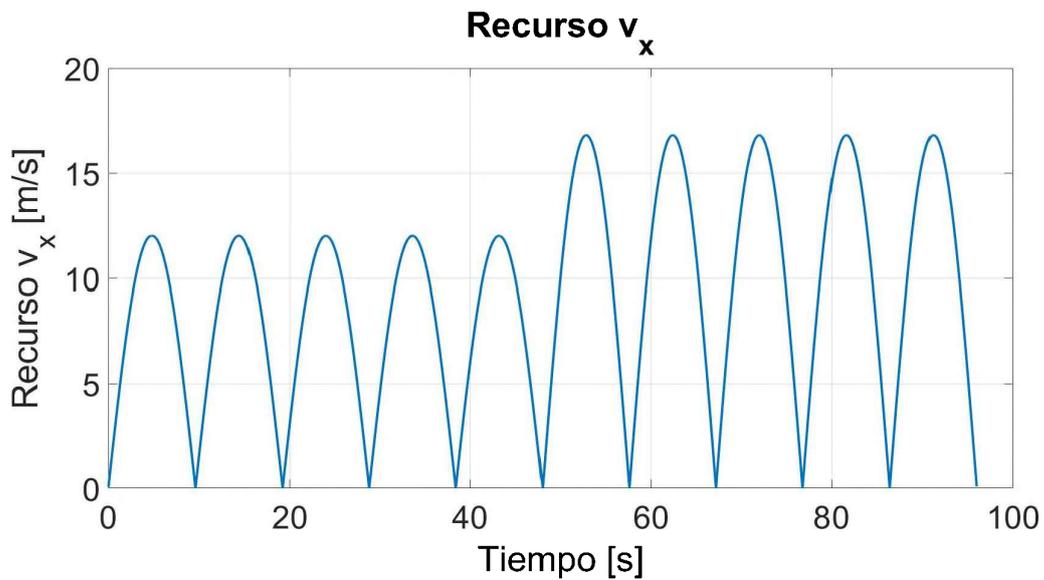


Figura 14: Recurso Sinusoidal.

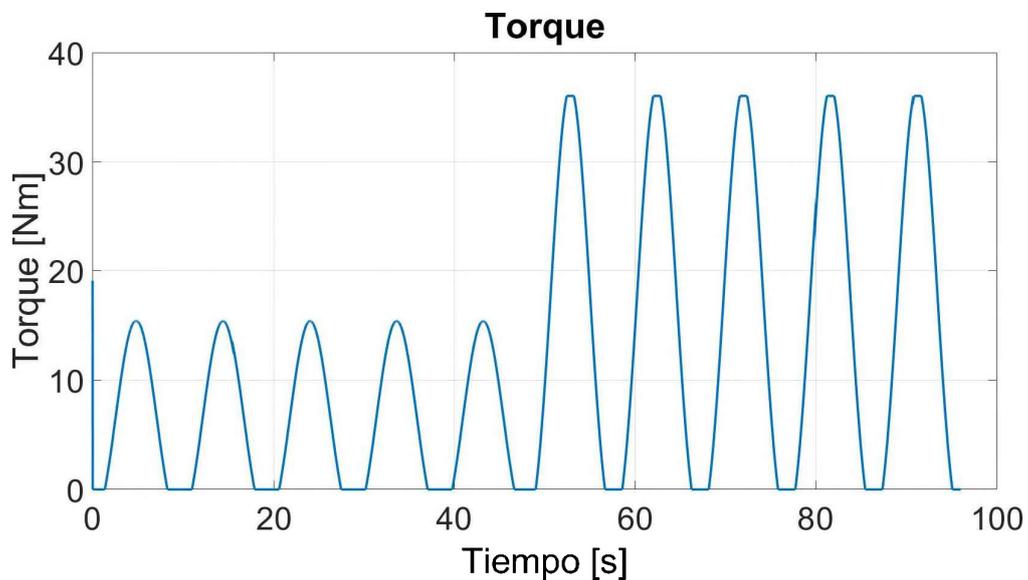


Figura 15: Torque calculado por el módulo de control a lo largo del tiempo.

Observando el recurso ingresado y los resultados obtenidos (Figuras 14, 15 y 16) se puede ver que el emulador funciona correctamente. Además, durante la emulación el punto que resalta el punto de operación en las curvas de torque-velocidad (Figura 16), muestra el valor esperado para la emulación.

Este dispositivo permite llevar a cabo ensayos de emulación tanto para turbinas de Wells en sistemas de columna de agua oscilante (OWC) como para turbinas eólicas.

Como conclusión se puede destacar que este emulador es muy útil para realizar pruebas de técnicas de control bajo parámetros de laboratorio. Estas técnicas de control se pueden diseñar con respecto a la turbina emulada para extraer la máxima cantidad de potencia, siguiendo el punto de máxima extracción de potencia.

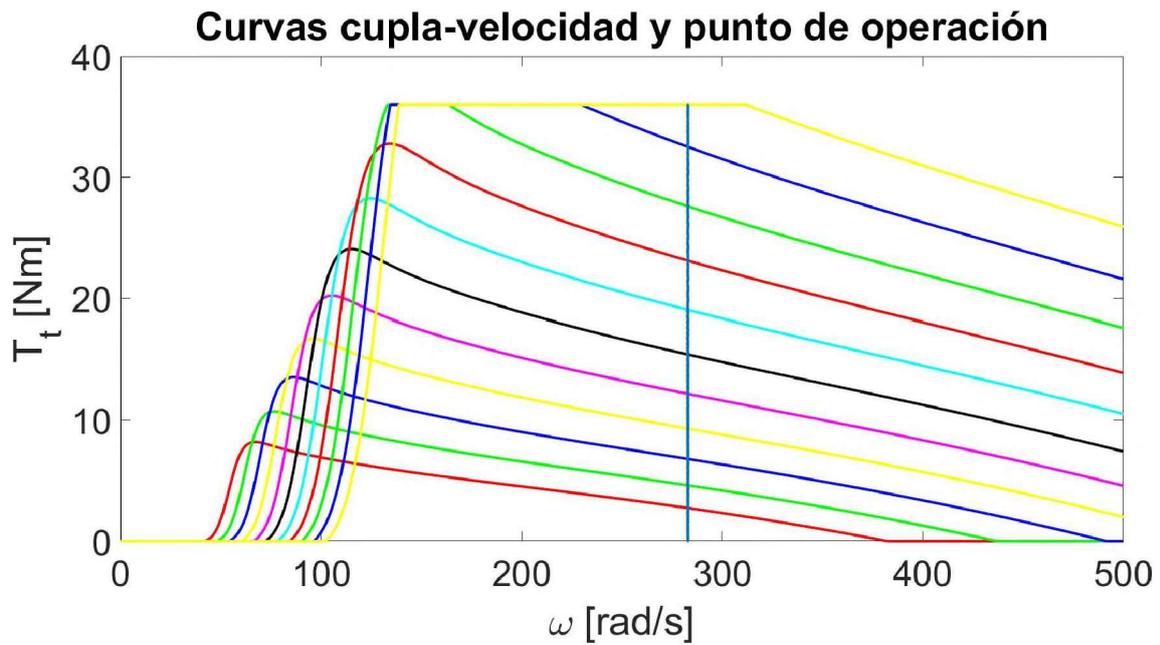


Figura 16: Puntos de operación utilizados por la máquina (línea vertical azul), y curvas cupla-velocidad de la máquina (curvas de colores).

7. Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Facultad de Ingeniería, UNLP, CONICET, y la Agencia I+D+i, de Argentina. Leonardo Barrios agradece especialmente a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) por su apoyo a través de una Beca de Entrenamiento, y al LEICI (Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales) por proporcionar las instalaciones y recursos necesarios para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Umesh A Korde y John Ringwood. *Hydrodynamic control of wave energy devices*. Cambridge University Press, 2016.
- [2] Facundo Mosquera et al. «Control Twisting con Adaptación Basada en Cruce por Cero para un Sistema de Columna de Agua Oscilante con Generador Sincrónico». En: nov. de 2020.
- [3] Santiago Andrés Verne et al. «Desarrollo e implementación de una estructura dual para emulación de sistemas de conversión basados en energías renovables». En: *VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 25 al 27 de abril de 2023)*. 2023.
- [4] Lenon A Cisco et al. «Numerical Analysis of the Available Power in an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to a Sea State of the Coastal Region of Tramandaí, Brazil». En: *Fluids* 7.11 (2022), pág. 359.
- [5] António FO Falcão y Joao CC Henriques. «Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review». En: *Renewable energy* 85 (2016), págs. 1391-1424.
- [6] Tiziano Ghisu, Pierpaolo Puddu y Francesco Cambuli. «A detailed analysis of the unsteady flow within a Wells turbine». En: *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part A: journal of power and energy* 231.3 (2017), págs. 197-214.
- [7] Itxaso Odériz, Edgar Mendoza y Rodolfo Silva. «Dispositivo WEC: OWC. Síntesis y posible implementación en el clima marino mexicano». En: nov. de 2012.
- [8] M. Alberdi et al. «Complementary Control of Oscillating Water Column-Based Wave Energy Conversion Plants to Improve the Instantaneous Power Output». En: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 26.4 (2011), págs. 1021-1032. DOI: 10.1109/TEC.2011.2167332.
- [9] FD Mosquera et al. «Optimal wave energy extraction for oscillating water columns using second-order sliding mode control». En: *IET Renewable Power Generation* 14.9 (2020), págs. 1512-1519.