

Energía undimotriz en Argentina: potencial, desarrollo y perspectivas

M. Judewicz, E. Gelos, A. Olarce, R. García Retegui
y Marcos Funes

Universidad Nacional de Mar del Plata
mfunes@fimdp.edu.ar

Introducción: la energía en las olas del mar

La energía undimotriz, o energía de las olas, es la energía renovable contenida en el movimiento de las olas del océano, producto de la acción del viento sobre la superficie del mar. Las olas transportan energía cinética y potencial que puede ser aprovechada mediante dispositivos llamados convertidores de energía de olas (WEC, por sus siglas en inglés). Se estima que el recurso energético del oleaje a nivel global es enorme (del orden de terawatts) y se encuentra distribuido principalmente en las costas de latitudes medias. Si bien existen prototipos para capturar energía de las olas desde hace más de un siglo, esta tecnología aún no alcanza la madurez comercial debido, en parte, a la gran diversidad de principios de funcionamiento y diseños de WEC que se han propuesto. Esta diversidad ha ralentizado la convergencia tecnológica y la curva de aprendizaje en comparación con otras renovables consolidadas (eólica, solar), pero la energía undimotriz sigue siendo una frontera prometedora en la búsqueda de fuentes limpias para la transición energética.

La energía undimotriz sigue siendo una frontera prometedora en la búsqueda de fuentes limpias para la transición energética

Tecnologías undimotrices: convertidores de energía de olas

Existen múltiples enfoques para convertir la energía del oleaje en electricidad. En general, los WEC se clasifican según su ubicación (costa, mar adentro), su principio de operación y su forma de interactuar con las olas, como se muestra en la figura 1. Una clasificación común distingue tres tipos principales:

Acerca de Marcos Funes

Marcos Funes es director del Laboratorio de Instrumentación y Control del Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (IICyTE) y vicedirector del Departamento de Ingeniería Electrónica y Computación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP).

URL estable: <https://www.editores.com.ar/node/8429>

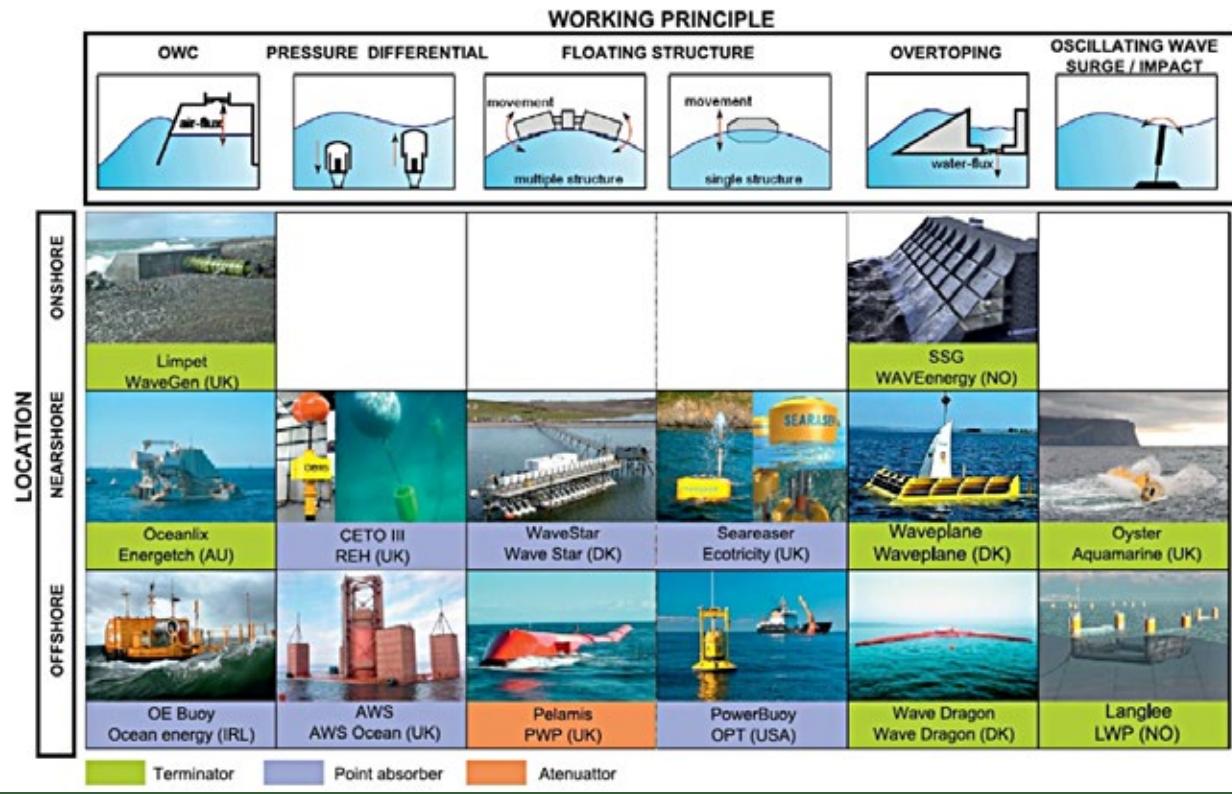


Figura 1: Topologías de WEC

Fuente: López et al., 2013

- » Columnas de agua oscilantes (OWC): son cámaras parcialmente sumergidas que atrapan aire en su interior. El movimiento de las olas comprime y descomprime el aire, haciéndolo pasar por una turbina para generar electricidad. Ejemplos destacados incluyen la planta de Pico (Azores) o el dispositivo litoral LIMPET, en Escocia, ambos fijos, y sistemas flotantes como la boya de Masuda o el *spar bouy OWC*.
- » Dispositivos de sobreceso (o de rebalse): capturan agua de las olas en un depósito elevado. El agua retenida retorna al mar pasando por turbinas hidráulicas de baja caída. Emplean principalmente la energía potencial de la ola. Ejemplos son prototipos fijos como el canal tapón (TAPCHAN) noruego, el rompeolas OBREC, o el *wave dragon*, una estructura

- flotante con rampas que acumula agua para turbinas.
- » Cuerpos activados por olas: engloban una variedad de artefactos que oscilan con el oleaje para accionar directamente un sistema mecánico o hidráulico. Pueden aprovechar la energía potencial y cinética de las olas. Se subdividen según sus movimientos: por ejemplo, absorbedores puntuales (boyas de pequeña dimensión respecto a la longitud de onda, que se desplazan típicamente en *heave* o *cabeceo*), atenuadores (estructuras alargadas, articuladas en secciones y alineadas paralelas a la dirección de las olas, como el célebre Pelamis, donde la flexión en las juntas acciona el sistema PTO), y terminadores (dispositivos orientados perpendicularmente a la dirección de propagación, como los clásicos patos de Salter o los convertidores de oleaje de

impacto frontal). Un ejemplo de terminador moderno es el Oyster, una aleta oscilante instalada en el lecho marino que acciona bombas hidráulicas. Otro diseño innovador es el ISWEC, un convertidor flotante que emplea un giroscopio interno como PTO para extraer energía del cabeceo de las olas.

Se han logrado pruebas a escala relevante en mar abierto de varios prototipos representativos de cada categoría

Cada tipo de WEC presenta desafíos técnicos particulares (captura eficiente en distintas condiciones de mar, anclajes, supervivencia a tormentas, etc.) y se halla en diferentes etapas de desarrollo. No obstante, en las últimas décadas se han logrado pruebas a escala relevante en mar abierto de varios prototipos representativos de cada categoría. Este esfuerzo global de I+D ha permitido demostrar la viabilidad técnica de la conversión de oleaje, aunque queda camino por recorrer para mejorar la confiabilidad y reducir costos.

El recurso undimotriz: espectro de oleaje y métricas energéticas

El oleaje oceánico es un fenómeno aleatorio compuesto por olas de diversas alturas, períodos y direcciones. Para cuantificar su contenido energético, se emplea el concepto de espectro de oleaje, que describe cómo la densidad de energía de las olas se distribuye en frecuencias. Modelos espectrales clásicos, como los espectros Pierson-Moskowitz (mar completamente desarrollado) o JONSWAP (que incorpora picos por tormentas), permiten representar estadísticamente un estado de mar a partir de datos meteorológicos o mediciones. Integrando el espectro de oleaje se obtienen parámetros significativos como la altura significativa de ola 'Hs' (altura promedio del tercio más alto de olas) y el periodo de energía 'Te', que caracterizan la energía promedio del oleaje.

Una métrica clave para energía undimotriz es la potencia de oleaje por unidad de frente de ola, típicamente expresada en kilowatts por metro (kW/m). Este valor representa el flujo de energía promedio que transportan las olas a través de una sección vertical de un metro de ancho, perpendicular a la dirección de propagación. En aguas profundas, la potencia por metro de ola puede calcularse como sigue:

$$P \cong (\rho g^2 / 64\pi) Hs^2 Te$$

donde ρ es la densidad del agua (1.025 kg/m^3 , aproximadamente) y g la aceleración gravitatoria ($9,81 \text{ m/s}^2$). Por ejemplo, un oleaje con Hs de dos metros y Te de 8 s conlleva unos 20 kW/m de frente de ola. En términos de densidad de energía, el oleaje es notablemente más concentrado que otras renovables: aproximadamente cinco veces más denso que el viento y hasta quince veces más que la radiación solar. Justo bajo la superficie del mar, la intensidad media de flujo de energía de olas alcanza 2 a 3 kW/m^2 , comparada con $0,5 \text{ kW/m}^2$ aproximado típica del viento a diez metros de altura. Esta alta densidad energética del medio marino explica el gran potencial teórico de la energía undimotriz, aunque también implica que los dispositivos deben resistir fuerzas significativas.

Comparada con el viento o el sol, la energía de las olas ofrece mayor predictibilidad y podría contribuir a suavizar la intermitencia cuando se integra con otras fuentes en la red

A diferencia de la generación eólica o solar, el régimen de olas tiene ciertas ventajas desde el punto de vista de la gestión de energía. Las olas presentan variaciones más lentas y predecibles: la altura significativa de ola puede pronosticarse con buena precisión con uno o dos días de anticipación, dado que depende de patrones meteorológicos oceánicos relativamente conocidos. Es-

tudios indican que, comparada con el viento o el sol, la energía de las olas ofrece mayor predictibilidad y podría contribuir a suavizar la intermitencia cuando se integra con otras fuentes en la red. No obstante, el recurso undimotriz también exhibe variabilidad en múltiples escalas temporales: intradiaria (estado de mar instantáneo), estacional (oleaje más intenso en invierno que en verano) e interanual (influenciada por ciclos climáticos como El Niño u Oscilación del Sur). Esta variabilidad de mediano y largo plazo debe considerarse al estimar la producción a fin de diseñar convertidores robustos, especialmente por la ocurrencia de eventos extremos (tormentas) que imponen requerimientos de supervivencia mecánica. Indicadores estadísticos como el coeficiente de variación (CoV) del recurso, o índices de

variación mensual o estacional, se utilizan para cuantificar cómo cambia la energía undimotriz con el tiempo y así identificar sitios óptimos que combinen alto potencial y baja variabilidad.

Potencial undimotriz argentino y campañas de medición en Mar del Plata

El litoral marítimo argentino, bañado por el Atlántico Sur, posee un potencial considerable de energías marinas. En latitudes australes (sur del 40° S), el oleaje generado por vientos del hemisferio sur produce niveles de potencia undimotriz elevados, comparables a los de las costas de Chile o Europa del Norte. Estudios numéricos internacionales estiman que el potencial teórico offshore (mar adentro) del Mar Argentino varía aproxima-

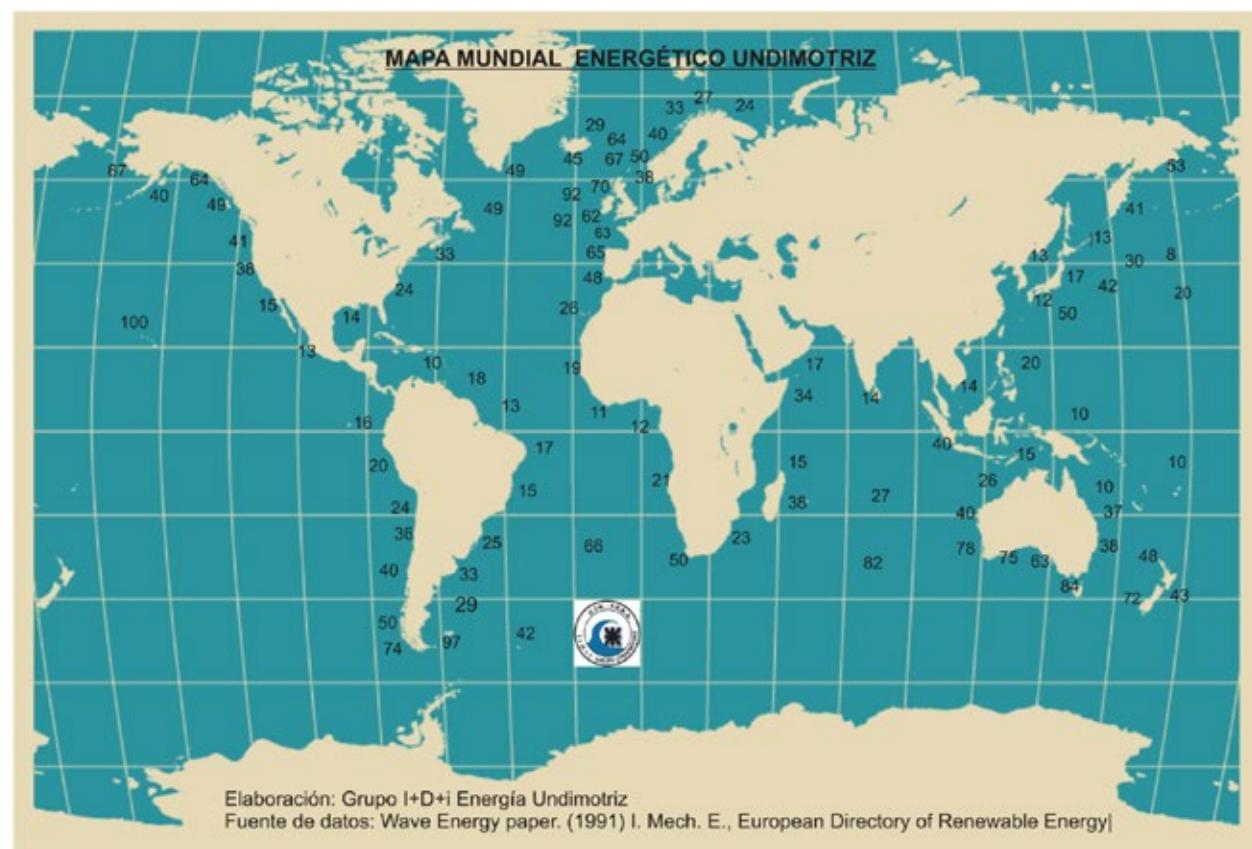


Figura 2: Mapa mundial con valores de potencia undimotriz en kilowatts por metro de frente de ola indicados por región.

Fuente: Pelissero et al., 2011

damente entre 30 y 100 kW/m de frente de ola, como se muestra en la figura 2. Hacia Tierra del Fuego, por ejemplo, se calculan potencias superiores a 60 kW/m mar adentro, disminuyendo a ~20 a 30 kW/m cerca de la costa. Estas cifras sitúan al recurso de oleaje argentino entre los más prometedores del Atlántico sur. Sin embargo, el potencial aprovechable efectivo en zonas cercanas a centros urbanos (por ejemplo, costa bonaerense) es bastante menor debido a la disipación del oleaje en la plataforma continental.

En la costa de la provincia de Buenos Aires, la potencia media anual del oleaje típico oscila en el rango de 4 a 8 kW/m según la ubicación. Mediciones históricas y simulaciones indican, por ejemplo, valores medios ~4-5 kW/m en Mar del Plata y hasta ~7-8 kW/m en Quequén (Necochea), con oleajes extremos puntuales que pueden alcanzar 30-60 kW/m durante tormentas severas. Un estudio clásico de Lanfredi et al. (1992) reportó potencias medias ~4 kW/m en Mar del Plata y Pinamar, ~5.5 kW/m en Punta Médanos y ~7.5 kW/m en Quequén, reflejando el aumento del recurso hacia el sur de la provincia. Más recientemente, trabajos de simulación con modelos de oleaje (SWAN) han refinado estas estimaciones, obteniendo en Mar del Plata ~8 kW/m a 80 m de profundidad (aguas intermedias) y evidenciando variaciones estacionales significativas (en invierno el recurso aumenta alrededor de un 30% respecto al verano). En síntesis, si bien el Mar Argentino en alta mar ofrece un recurso abundante comparable a los mejores sitios globales, cerca de la costa bonaerense, donde sería más factible aprovecharlo, el potencial es moderado, similar al de costas de España o Mediterráneo occidental, pero con la ventaja de relativamente menor variabilidad intraanual.

Para caracterizar empíricamente este recurso, se han llevado a cabo campañas de medición en sitios específicos. En Mar del Plata, el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) junto con el Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) del Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica (ICYTE) y otras instituciones imple-

mentaron un estudio detallado del clima de olas local. Aprovechando las observaciones del oleaje disponibles en la Estación de Observaciones Costeras (EOC MdP), un mareógrafo ubicado en el puerto que registra visualmente altura, periodo y dirección de olas desde 2012, se analizó el régimen de olas entre 2013 y 2018. A partir de esos datos en aguas intermedias (~20 m de profundidad), se extrapoló el espectro de oleaje a aguas profundas y luego se propagó numéricamente hasta dos zonas costeras de interés:

- » inmediaciones de la Escollera Norte del puerto de Mar del Plata y
- » la zona del emisario submarino (sur de la ciudad).

El oleaje en la costa marplatense es relativamente moderado pero constante, apto para ensayos de tecnología undimotriz a escala piloto sin enfrentar condiciones extremas frecuentes

Los resultados indicaron que la altura de ola media (H_m) es inferior a un metro en ambos sitios, con las olas más frecuentes rondando 0,5 a un metro de altura significativa. Las alturas máximas observadas ($H_{máx}$) alcanzan valores algo mayores en la zona de la escollera que en el emisario, coherente con su diferente grado de exposición al oleaje abierto. No obstante, se determinó que $H_{máx}$ es muy sensible a cambios estadísticos y su valor extremo puntual tiene poca significancia para promedios de largo plazo. Por ello, para evaluar el potencial energético, se construyeron distribuciones bidimensionales de ocurrencia de altura vs. periodo, lo que permitió derivar matrices de potencia de olas para ambos sitios. Dichas matrices sirven para estimar cuánta energía podría capturar un WEC dado el espectro local. En Mar del Plata, la mayor parte de la energía undimotriz proviene de olas de periodo medio (~6-8 s) y alturas moderadas (0,5-1,5 m). En la EOC (aguas intermedias) se observó que el ~55% de

las olas son iguales o más altas que un metro, mientras que cerca del emisario predominan olas de 0,5 a un metro y, en la escollera, olas menores a 0,5 m constituyen la clase más común. Estos datos confirman que el oleaje en la costa marplatense es relativamente moderado pero constante, apto para ensayos de tecnología undimotriz a escala piloto sin enfrentar condiciones extremas frecuentes. De hecho, con alturas promedio de un metro, Mar del Plata ofrece un ambiente controlado y predecible para prototipos, en contraste con las mucho más energéticas (y riesgosas) olas del sur patagónico. Por tal motivo, se ha elegido esta zona para las primeras experiencias de campo en Argentina. Cabe mencionar que recientemente se han implementado boyas oceanográficas para complementar estas mediciones costeras (por ejemplo, una boyas Wavescan del Servicio de Hidrografía Naval realizó en 2021 registros de oleaje en el talud continental frente a Mar del Plata, aportando datos valiosos de oleaje en mar abierto) aunque estos resultados están en proceso de análisis para publicaciones futuras. En resumen, los estudios realizados y en curso brindan una base de conocimiento local indispensable para diseñar y dimensionar convertidores undimotrices adecuados a nuestras costas.

Desarrollo tecnológico nacional

El objetivo de este consorcio es la construcción de un WEC tipo absorbedor puntual (boyas flotante) de desarrollo íntegramente nacional

En Argentina, la investigación en energía undimotriz ha cobrado impulso en años recientes, gracias al interés académico, el apoyo de redes colaborativas y la financiación estatal estratégica. Un hito importante fue la conformación en 2021 de la Red de Energías Marinas Argentina (REMA), que reúne grupos de I+D, instituciones y empresas para coordinar esfuerzos en el desa-

rrollo de energías del mar. Bajo el paraguas de REMA se han organizado encuentros nacionales (por ejemplo, ENAEM 2022) y talleres internacionales que visibilizan los avances locales. Paralelamente, la Agencia Nacional de I+D+i a través del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC) ha financiado proyectos específicos para impulsar tecnologías undimotrices. En particular, en 2022 se adjudicó un proyecto estratégico de transición energética destinado a desarrollar e instalar el primer convertidor de olas a escala real en la costa de Mar del Plata. Este proyecto fue ejecutado por un consorcio público-privado integrado por QM Equipment SA y el CONICET, a través de equipos de investigación de la Universidad de Buenos Aires (CSC, INTECIN, IFIBA), la Universidad Nacional de Mar del Plata (ICYTE, INTEMA) y la Universidad Nacional de Quilmes (UNQ). El objetivo de este consorcio es la construcción de un WEC tipo absorbedor puntual (boyas flotante) de desarrollo íntegramente nacional, instalarlo en la escollera de Mar del Plata y validar su funcionamiento en un ambiente relevante (marino) con miras a futura escalabilidad comercial. Este es un paso inicial fundamental hacia la incorporación de la energía de olas en la matriz energética argentina, que actualmente carece de aporte marino.

En el LIC desde hace varios años se viene trabajando en prototipos de convertidores de olas de pequeña escala

Como núcleo local, de la ciudad de Mar del Plata, el Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) del ICYTE (CONICET-UNMDP) cumple un rol central en este desarrollo. En el LIC desde hace varios años se viene trabajando en prototipos de convertidores de olas de pequeña escala, acumulando experiencia en sistemas mecánicos de extracción de energía. Fruto de esas investigaciones, el diseño adoptado para el prototipo de Mar del Plata incorpora un sistema de PTO mecánico innovador, que incluye una transmisión por engranajes y un rectificador mecánico de

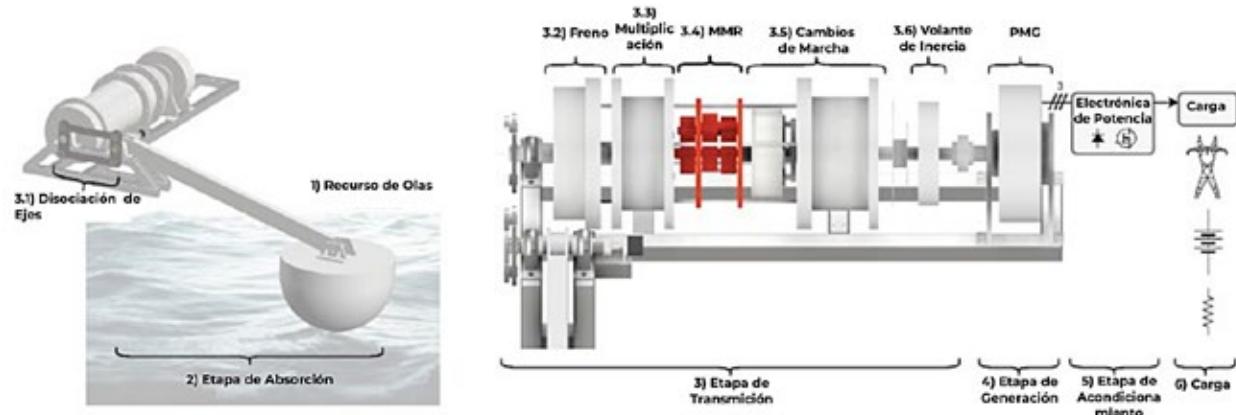


Figura 3.1. Banco de pruebas para ensayar PTO mecánico basado en MMR desarrollado en el LIC

movimiento oscilatorio (MMR, por sus siglas en inglés). En esencia, la boya captadora mueve un eje alternativo (vaivén) que se convierte mediante un mecanismo de trinquete o embragues de un sentido en un giro unidireccional continuo, el cual acciona un generador eléctrico. Este concepto de rectificación mecánica del movimiento de las olas ha sido explorado internacionalmente por su capacidad de incrementar la eficiencia de conversión: por ejemplo, prototipos MMR en su PTO lograron rendimientos mecánicos superiores al 60% en ensayos controlados. En nuestro país, el equipo del LIC ha construido un banco de pruebas para ensayar estos sistemas PTO bajo

cargas simuladas de oleaje, como se muestra en la figura 3. Los ensayos de laboratorio demostraron la factibilidad de la conversión mecánica y permitieron optimizar componentes como embragues unidireccionales y el tren de engranajes multiplicadores. El siguiente paso es validar el desempeño del convertidor en un entorno relevante de campo (el mar). Para ello, se busca construir el prototipo a escala real (en torno a 5-10 kW de potencia estimada). Este prototipo se proyecta instalar inicialmente en una estructura fija en la escollera norte de Mar del Plata, donde podría operarse de forma experimental recolectando datos de potencia generada, esfuerzos estructu-

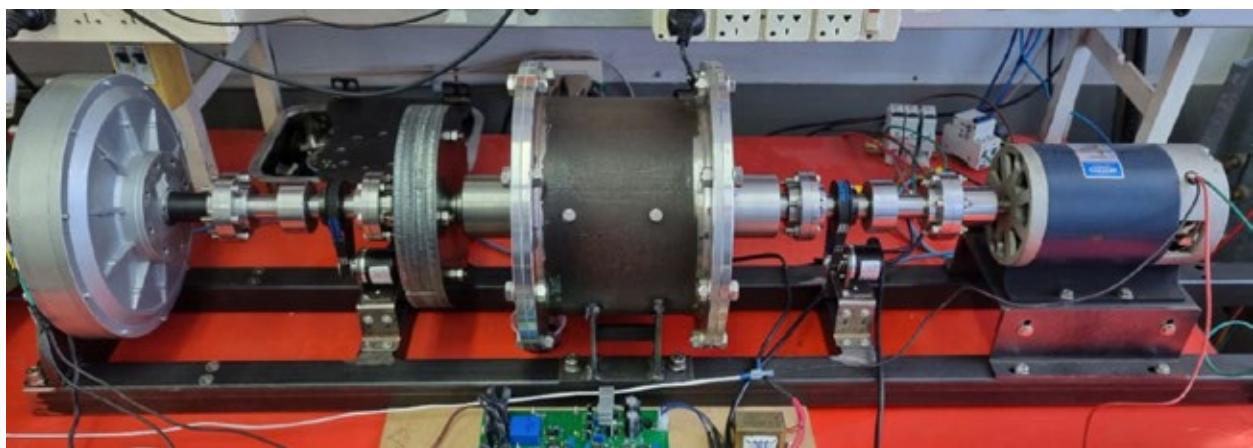


Figura 3.1. Banco de pruebas para ensayar PTO mecánico basado en MMR desarrollado en el LIC

rales, comportamiento en diferentes estados de mar y eficiencia del PTO en condiciones reales. La elección de la escollera (un entorno semiprotegido) busca facilitar el acceso para montaje, mantenimiento y seguridad, al mismo tiempo que expone al dispositivo a oleaje representativo moderado. De validarse con éxito, es posible escalar gradualmente el sistema y evaluar su desempeño en ubicaciones más expuestas y con mayor energía (por ejemplo, mar adentro con anclaje flotante).

En nuestro país, el equipo del LIC ha construido un banco de pruebas para ensayar estos sistemas PTO bajo cargas simuladas de oleaje

Además del proyecto marplatense, en Argentina existe al menos otro desarrollo undimotriz destacado: el grupo de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN FRBA) ha trabajado por más de una década en un convertidor de olas propio. Desde 2009, el proyecto UTN (dirigido por A. Haim y M. Pelissero, entre otros) diseñó un dispositivo tipo absorbedor puntual patentado y construyó varios prototipos a escala. Lograron ensayar un modelo a escala 1:10 en un canal de olas del Instituto Nacional del Agua, validando la idea fundamental. Recientemente, ese equipo recibió también apoyo (FONARSEC y otros) para avanzar hacia un farm modular de convertidores en las costas de la provincia de Buenos Aires. Si bien el enfoque técnico difiere entre la UTN y el ICYTE, ambos esfuerzos son complementarios y demuestran el creciente interés nacional en esta tecnología.

Infraestructura de ensayo y colaboración nacional

El desarrollo de energías marinas requiere no solo de financiamiento y saber-hacer, sino también de infraestructuras adecuadas para probar las tecnologías en condiciones realistas. Argentina ha comenzado a consolidar capacidades en este sentido. Por ejemplo, el Instituto Nacional del Agua (INA) dispone de un canal de olas de escala de laboratorio, donde ya se han realizado ensayos de modelos (como el de UTN a escala 1:10). Asimismo, el país cuenta con el Canal de Experiencias en Arquitectura Naval (CEAN), un tanque de olas utilizado históricamente para pruebas hidrodinámicas, que está siendo instrumentado para ensayos de convertidores marinos en colaboración con el CONICET y la empresa QM Equipment, integrando esfuerzos públicos y privados. En paralelo, se busca construir una plataforma de ensayos costera en Mar del Plata, lo cual permitirá probar prototipos a escala real en ambiente marino con relativa seguridad (similar a los sitios de prueba que existen en Europa, como EMEC en Escocia, pero a menor escala). Adicionalmente, la mencionada red REMA actúa como facilitadora para compartir recursos y datos entre instituciones del país. A través de REMA se coordinan campañas de medición (como la del clima de olas en Mar del Plata), se impulsan estándares comunes y se promueve la formación de especialistas en energía oceánica. Esta integración de capacidades nacionales (laboratorios, tanques de prueba, estaciones costeras de medición, plataformas de ensayo y redes de conocimiento) es crucial para reducir la brecha tecnológica y acelerar el aprendizaje en energía undimotriz, replicando en cierta medida el ecosistema que permitió a las energías eólica y solar despegar años atrás.

Red REMA actúa como facilitadora para compartir recursos y datos entre instituciones del país

Desafíos, ventajas y perspectivas

Aunque la energía undimotriz ofrece ventajas inherentes (alta densidad energética, predictibilidad superior, vasto recurso sin explotar), enfrenta todavía desafíos significativos antes de su despliegue comercial. En términos de competitividad económica, el costo por kilowatt·hora de la energía de las olas sigue siendo elevado en comparación con fuentes renovables convencionales. Evaluaciones recientes destacan que incluso los proyectos precomerciales más avanzados entregan electricidad a un costo mayor que la solar fotovoltaica o la eólica terrestre. Esto se debe a la combinación de dispositivos aún en etapa de prototipo (no optimizados en costo de fabricación), la necesidad de materiales resistentes al ambiente marino (corrosión, fatiga) y la falta de economías de escala en la industria. Se espera, sin embargo, que, con la maduración de la tecnología y la producción en serie, los costos disminuyan siguiendo una curva de aprendizaje similar a la de otras energías renovables. Otro desafío son las incógnitas ambientales: si bien la energía de olas es limpia en cuanto a emisiones, su impacto en ecosistemas marinos (ruido submarino, colonización de estructuras, cambios en dinámicas costeras) requiere estudio. A la fecha no se han documentado efectos adversos significativos para los prototipos probados, pero la aceptación social y ambiental de parques undimotrices a gran escala aún debe consolidarse.

A la fecha no se han documentado efectos adversos significativos para los prototipos probados, pero la aceptación social y ambiental de parques undimotrices a gran escala aún debe consolidarse

Desde la perspectiva técnica, los índices de disponibilidad y capacidad de los convertidores son áreas de mejora. La naturaleza variable del oleaje implica que un WEC operará muchas veces fue-

ra de su punto de óptimo diseño, de modo que lograr altos factores de capacidad anuales es difícil (actualmente, la mayoría de los dispositivos presenta factor de capacidad inferior al 30%, por debajo de eólicos terrestres típicos). La implementación de estrategias de control avanzadas puede mitigar esto, adaptando dinámicamente el PTO para maximizar la absorción de energía en cada estado de mar. Grupos argentinos (LEICI de UNLP, COER de UNQ, etc.) están contribuyendo en este aspecto con el desarrollo de controladores robustos y sistemas de *latching* o sincronización que mejoran la captura energética y la supervivencia del WEC frente a oleaje irregular.

Un punto favorable para la energía undimotriz es su posible complementariedad con otras fuentes renovables. Dado que las olas persisten después de que los vientos que las generaron cesan, existe un desfasaje temporal que puede aprovecharse: parques híbridos eólico-undimotrices podrían entregar potencia más estable que los parques sólo eólicos. Investigaciones internacionales y locales señalan que la correlación entre viento y oleaje es baja en muchos casos, por lo que combinar ambas tecnologías en un mismo punto de conexión ayudaría a nivelar la producción y reducir la necesidad de almacenamiento o respaldo fósil. En la Argentina, con extensas costas ventosas y oleaje aprovechable, esta sinergia podría explorarse en el futuro (por ejemplo, un parque eólico-marino frente a la costa patagónica con boyas undimotrices integradas).

La correlación entre viento y oleaje es baja en muchos casos, por lo que combinar ambas tecnologías en un mismo punto de conexión ayudaría a nivelar la producción y reducir la necesidad de almacenamiento o respaldo fósil

Palabras finales

En conclusión, la energía undimotriz en Argentina se encuentra en una etapa tecnológica emergente, pero con un horizonte promisorio. Los estudios realizados confirman la existencia de un recurso utilizable y relativamente predecible en nuestras costas. El apoyo de programas de financiamiento, sumado al talento de equipos locales (LIC ICYTE, UTN, UNLP, CONICET, entre otros) y la articulación a través de REMA, han sentado las bases para que el país desarrolle su propia tecnología undimotriz. Si los prototipos actuales logran demostrar un desempeño adecuado y confiabilidad en el mar, se habrá dado el primer gran paso para que las olas del Atlántico sur se sumen al portafolio de energías renovables nacionales. A mediano plazo, con inversión sostenida e innovación, la energía de las olas podría aportar una fracción significativa de la electricidad en regiones costeras, diversificando la matriz, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a los objetivos de descarbonización. Argentina, con su extenso litoral y capacidad técnica, tiene la oportunidad de ser protagonista regional en el aprovechamiento de esta fuente renovable inagotable. El vaivén de cada ola es un recordatorio del enorme poder que aguarda ser capturado. Convertir ese movimiento eterno en energía útil es un desafío que estamos comenzando a resolver. ■

Bibliografía con comentarios

- [1] Carreras, G. A., Haim, A. P., Pelissero, M. A., & Lifschitz, A. J. (2022). "El potencial energético renovable del Mar Argentino". *Ciencia e Investigación*, 72(1), 12–21. (Resumen del estado de las energías marinas en Argentina, incluye potencial undimotriz y proyectos nacionales).
- [2] Lanfredi, N. W., Pousa, J. L., Mazio, C. A., & Dragani, W. C. (1992). "Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina". *Energy*, 17(11), 997-1006. (Estudio clásico que mide el potencial undimotriz en la provincia de Buenos Aires).
- [3] Falcão, A. F. D. O. (2010). "Wave energy utilization: A review of the technologies". *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918. (Revisión clásica de tecnologías undimotrices, clasificación de WEC y principios de funcionamiento).
- [4] Falnes, J. (2007). "A review of wave-energy extraction". *Marine structures*, 20(4), 185-201. (Revisión técnico-científica sobre la física del oleaje y la extracción de energía, incluye densidad de potencia de olas).
- [5] García-Violini, D., Peña-Sánchez, Y., Otero, A., Sosa, R., Penalba, M., & Ringwood, J. V. (2023, November). "Control-aware co-design of a wave energy converter for the Argentine sea conditions". In *2023 XX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-6). IEEE. (Artículo que destaca el interés creciente en Argentina por la energía undimotriz, menciona REMA, ENAEM 2022 y proyectos FONARSEC para Mar del Plata).
- [6] Guo, B., & Ringwood, J. V. (2021). "A review of wave energy technology from a research and commercial perspective". *IET Renewable Power Generation*, 15(14), 3065-3090. (Completa revisión actualizada del estado del arte en tecnología undimotriz, recursos, control y perspectivas comerciales a 2021).
- [7] Gutman, V., & Gutman, A. (2022). "Energía marina: revisión de experiencias internacionales y potencialidades para la Argentina". Documento de trabajo, Universidad de Buenos Aires - Fundación Torcuato Di Tella. (Análisis en español sobre la potencial contribución de las energías marinas en Argentina; discute costos, barreras y situación nacional.)
- [8] Liang, C., Ai, J., & Zuo, L. (2017). "Design, fabrication, simulation and testing of an ocean wave energy converter with mechanical motion rectifier". *Ocean Engineering*, 136, 190-200. (Estudio pionero sobre PTO con rectificador mecánico; demuestra eficiencia mecánica ~65% en prototipo con oleaje regular.)
- [9] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., De Alegría, I. M., & Kortabarria, I. (2013). "Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment". *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 413-434.

- [10] Pelissero, M.A., Haim, P.A., Oliveto, G., Galía, F. y Tula, R. (2011). "Aprovechamiento de la energía Undimotriz". *Proyecciones*, 9 (2), 53-65. (Estimación inicial del potencial undimotriz teórico en Mar Argentino, base de los rangos 30–100 kW/m citados.)
- [11] Prario, B. E., & Dragani, W. C. (2022). "Clima de olas: análisis del recurso en sitios costeros de Mar del Plata, Argentina". En *Actas del Encuentro Argentino de Energías Marinas* (ENAEM 2022), Buenos Aires, 1–6. (Estudio colaborativo SHN–CONICET–UNMDP–UTN sobre el régimen de oleaje en Mar del Plata; provee estadísticas de altura, período y potencia de oleaje locales.).
- [12] REMA (Red de Energías Marinas Argentina) – Sitio web oficial: redenergiasmarinas.ar. (Información sobre iniciativas y eventos nacionales de energía marina, incluyendo ENAEM 2022 y la articulación interinstitucional.).
- [13] Servicio de Hidrografía Naval (2018). "Oleaje e impacto costero: estudios de caso en Mar del Plata (2012–2018)". Contribución al *Congremet XVIII*, Mar del Plata. (Análisis estadístico de series de oleaje medidas en la estación costera de Mar del Plata; documento técnico breve con datos de alturas extremas y tormentas relevantes.).
- [14] UTN Buenos Aires (2020). *Proyecto Undimotriz UTN.BA – Resultados de ensayos a escala e impacto ambiental. Informe técnico interno*. (Reporte del equipo de UTN-FRBA detallando las pruebas en canal de olas (escala 1:10) de su convertidor undimotriz y consideraciones ambientales de su instalación.). <https://www.redenergiasmarinas.ar/res%C3%BAmenes>.

Glosario de siglas

- » CEAN: Canal de Experiencias en Arquitectura Naval
- » CONICET: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
- » CoV: coeficiente de variación
- » CSC: Centro de Simulación Computacional, CONICET
- » EMEC: European Marine Energy Centre, 'Centro Europeo de Energía Marina'
- » ENAEM: Encuentro Argentino de Energías Marinas
- » EOC: Estación de Observaciones Costeras, de Mar del Plata
- » FONARSEC: Fondo Argentino Sectorial
- » FRBA: Facultad Regional Buenos Aires, de la UTN
- » ICYTE: Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas en Electrónica
- » I+D: investigación y desarrollo
- » I+D+i: I+D e innovación
- » IFIBA: Instituto de Física de Buenos Aires
- » INA: Instituto Nacional de Agua
- » INTECIN: Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long"
- » INTEMA: Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales
- » ISWEC: *Inertial Sea Wave Energy Converter*, 'convertidor de energía de olas marinas inercial'
- » JONSWAP: *Joint North Sea Wave Project*, 'Proyecto del Oleaje Conjunto del Mar del Norte'
- » LEICI: Laboratorio de Electrónica Industrial Control e Instrumentación, de UNLP
- » LIC: Laboratorio de Instrumentación y Control, Universidad de Mar del Plata
- » LIMPET: *Land Installed Marine Powered Energy Transmitter*, 'transmisor de energía marina instalado en tierra'
- » MdP: Mar del Plata
- » MMR: *Mechanical Motion Rectifier*, 'rectificador mecánico de movimiento'
- » OBREC: *Overtopping Breakwater for the Energy Conversion*, 'rompeolas de desbordamiento para la conversión de energía'
- » OWC: *Oscillating Water Column*, 'columna de agua oscilante'
- » PTO: *Power Take-Off*, 'toma de fuerza'
- » REMA: Red de Energías Marinas de Argentina
- » SHN: Servicio de Hidrografía Naval
- » SWAN: *Simulating WAves Nearshore*, 'simulación de oleaje costero'
- » TAPCHAN: *Tapered Channel Wave Power System*, 'sistema de energía undimotriz de canal cónico'
- » UBA: Universidad de Buenos Aires
- » UNLP: Universidad Nacional de La Plata
- » UNMdP: Universidad Nacional de Mar del Plata
- » UNQ: Universidad Nacional de Quilmes
- » UTN: Universidad Tecnológica Nacional
- » WEC: *Wave Energy Converters*, 'convertidores de la energía de las olas'