

ANÁLISIS DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS DE LAS PLANTAS DESALADORAS DE AGUA DE MAR MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA.

La O.I. es una técnica de separación por membranas ampliamente utilizada hoy en día y se emplea principalmente para la producción de agua desalada a partir de agua salobre o de mar.

Actualmente, uno de los objetivos más importantes para disminuir los gastos de explotación en las plantas desaladoras, es optimizar la demanda de energía requerida por el proceso de O.I.

En ese sentido, las últimas innovaciones tecnológicas aplicadas, como por ejemplo, los sistemas intercambiadores de presión y los sistemas de recuperación de energía con turbina, se han empleado tanto en las plantas desaladoras de agua salobre como de agua de mar con la finalidad exclusiva de mejorar el consumo de energía eléctrica y hacer un uso eficiente de la misma.

En el presente trabajo, se analiza el comportamiento del motor eléctrico asíncrono acoplado a una bomba de alta presión, que normalmente se utilizan en cualquiera de las plantas desaladoras de agua de mar (en adelante IDAM), buscando algunas relaciones con la optimización del consumo de energía demandado.

Los resultados obtenidos y las conclusiones se contrastan con un programa de simulación informático de motores asíncronos.

José Jaime Sadhwani
Alonso

Fabián Déniz Quintana

Reverse Osmosis (R.O.) is a separation technique for membranes broadly used nowadays. Their more extended application is the production of desalting water starting from brackish water or seawater.

To optimize the energy demand from R.O. plants for the production of drinking water from seawater, is currently one of the most important requirement to reduce the operating costs, and consequently, the prices of desalted water. Recent technological innovations such as pressure-exchange system (PE) and energy recovery turbine (ERT) are required on seawater and brackish water desalination plant to reduce and improve the energy consumption.

In this paper, we discuss electrical behaviour of the asynchronous motor coupled to high pressure systems in seawater reverse osmosis (SWRO) desalination plants, trying to get some relations with the energy consumption.

Results and discussion are showed with a software tool for the simulation of asynchronous machine.

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo se expone el análisis experimental realizado a los motores eléctricos, acoplados a las bombas de alta presión y empleados tradicionalmente en las plantas desaladoras de agua de mar mediante ósmosis inversa (en adelante O.I.). El consumo de energía eléctrica demandado por éstos es bastante considerable debido a las exigencias requeridas en este tipo de

proceso (tensiones elevadas y grandes potencias). Por ello, el resultado de cualquier actuación de mejora que se pudiera realizar en los motores eléctricos sería una reducción del consumo específico de energía, con una repercusión inmediata sobre el coste de explotación del metro cúbico de agua desalada.

INTRODUCCIÓN

Desde los años 70, en el proceso de desalación de agua de mar

El resultado de cualquier actuación de mejora que se pudiera realizar en los motores eléctricos sería una reducción del consumo específico de energía, con una repercusión inmediata sobre el coste de explotación del metro cúbico de agua desalada mediante ósmosis inversa.

por membranas de ósmosis inversa se ha prestado especial atención al coste de explotación del metro cúbico de agua desalada (Harris, 1999).

La optimización de la energía demandada por las plantas de ósmosis para la producción de agua potable a partir de agua de mar es una de las líneas de actuación donde se han realizado uno de los mayores esfuerzos para mejorar el rendimiento total en este tipo de plantas (Geisler, 1999). Uno de los primeros conceptos utilizados fue la conversión de la energía hidráulica proveniente de la corriente de salmuera en energía mecánica. En la mayoría de las plantas desaladoras de ósmosis inversa los sistemas de recuperación de energía están basados en turbinas tipo Francis (con funcionamiento inverso al de la bomba) o turbinas tipo Pelton (con descarga atmosférica). Nuevas técnicas han sido desarrolladas para reducir los requerimientos de energía de las unidades de ósmosis, como por ejemplo la aparición de los sistemas de intercambio de presión (PES) y los equipos integrales de bomba y turbina (turbocharger).

Se puede concluir que hasta ahora, todos los esfuerzos para reducir el costo del metro cúbico de agua desalada por las IDAMs se han centrado en:

- Mejorar el rendimiento de la membrana.
- Aumentar la eficiencia de los sistemas de bombeo.
- Incorporar nuevos diseños en los sistemas de recuperación de energía.

Por tanto, sería preciso realizar esfuerzos encaminados a conseguir mejoras tecnológicas en los motores eléctricos asíncronos de grandes potencias empleados en las IDAMs. Algunas de las acciones que se podrían plantear serían:

- Mejorar el rendimiento del motor mediante la incorporación de variadores de velocidad.

- Evitar el sobredimensionamiento excesivo del motor.

- Reducir las pérdidas de potencia en la red de distribución de la IDAM

- Analizar la calidad de la energía que se suministra a la IDAM.

Algunas de estas actuaciones se han aplicado en los motores eléctricos trifásicos de pequeña y mediana potencia como, por ejemplo, el control de la velocidad en las bombas de baja presión y mediana potencia. Es decir, la regulación de la velocidad se ha aplicado en motores eléctricos de pequeñas y medianas potencias y hasta la fecha no se han implantado en los motores eléctricos de grandes potencias.

Creemos que es importante actuar bajo alguna de las líneas propuestas, ya que el sector de la desalación de aguas tiene, tanto hoy día como en su futuro inmediato, un fuerte crecimiento.

En concreto, los últimos datos disponibles indican que la cifra total de producción de agua desalada en las Islas Canarias es del orden de 300.000 m³/día siendo el 65,76% de dicha producción realizada mediante el proceso de ósmosis inversa (Veza, 2001).

OBJETIVO

El principal objetivo del proyecto de investigación financiado por el programa INNOVA 2001, fue estudiar y analizar la influencia del comportamiento eléctrico de los motores asíncronos acoplados a bombas de alta presión en las instalaciones desaladoras de agua de mar que utilizan el proceso de membranas de ósmosis inversa, intentando buscar relaciones e incidencias con el consumo de energía de la planta.

Para analizar las principales variables eléctricas del sistema se optó por incorporar un analizador de redes, del fabricante Schneider Electric denominado Circuit Monitor (CM-4000), que es un dispositivo

digital de adquisición de datos capaz de reemplazar una variedad de medidores convencionales, tales como voltímetros, relés y otros componentes.

Algunas de las características más importantes son la captura de armónicos hasta el orden 255 y los huecos y puntas en la forma de ondas, de especial relevancia para el desarrollo del estudio.

DESARROLLO DEL PROYECTO

El desarrollo del proyecto se realizó en las siguientes fases:

- a) Selección de una instalación acorde a las características del proyecto.
- b) Gestión de pedidos.
- c) Instalación de equipos en la instalación.
- d) Puesta en marcha, seguimiento y control.
- e) Adquisición de datos.
- f) Estudio de datos y simulación del motor analizado.
- g) Resultados y Conclusiones.

La temporización de cada una de las fases desarrolladas viene reflejada en la siguiente tabla:

Fase	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
II	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
III												
IV												
V												
VI												

Tabla 1. Temporización del desarrollo del proyecto.

Los criterios que se adoptaron para la selección de la IDAM han sido:

- Motores eléctricos representativos en la mayoría de las IDAMs.
- Disponibilidad y regularidad en el funcionamiento de los motores.

- Fecha de construcción.
- Fácil acceso.
- Autorización de la empresa explotadora.

La IDAM seleccionada está situada en la zona de Salinetas (T.M. Telde), administrada por la empresa mixta “Aguas de Telde, Gestión Integral del Servicio, S.A.”

Las principales características de esta IDAM se indican en la Tabla 2.

Capacidad total	10.000 m ³ /día
Dureza del agua de mar	39.000 mg/l
Salinidad del agua producida	< 900 mg/l
Temperatura	19-21°C
Membranas	Aislamiento en espiral (DOWFILMTEC)
Unidades de producción	2
Capacidad de la unidad de producción	5.000 m ³ /día
Número de etapas	1
Presión de operación	< 68 bar
Factor de recuperación	42-43 %

Tabla 2. Características de la IDAM “Aguas de Telde, S.A.”

En la Figura 1 se muestra el diagrama general del proceso el cual



Figura 1. Diagrama de proceso.

está formado por un pretratamiento de tres filtros de arena, tres filtros de cartucho y dos unidades de ósmosis inversa.

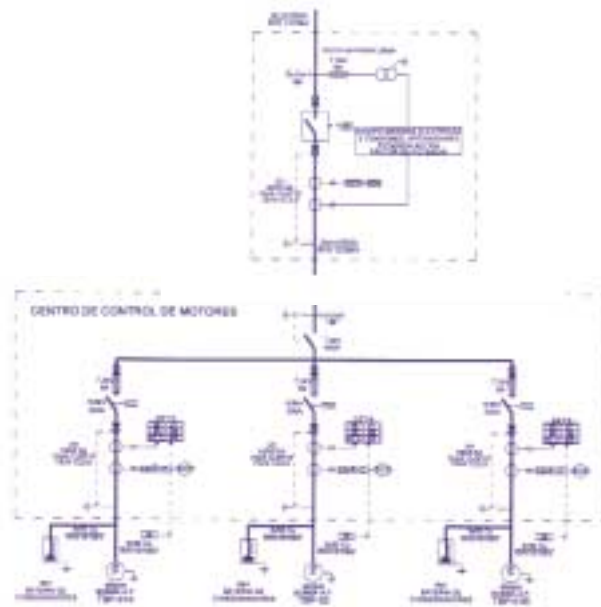


Figura 2. Esquema unifilar eléctrico de las bombas de alta presión (Cortesía de Ondeo Degremont).

A su vez, en la Figura 2 se recoge parcialmente el esquema unifilar de la alimentación eléctrica a los motores de media tensión, teniendo como punto de partida el Centro de Transformación de la IDAM.

La tensión de alimentación de los motores eléctricos es de 6,3 kV. La disposición empleada para la conexión eléctrica de los tres grupos bomba-motor-turbina (turbo-bomba) es mediante una configuración en paralelo.

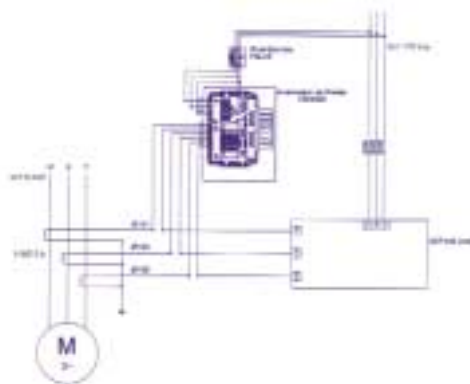


Figura 3. Instalación del CM-4000.

El analizador de redes CM-4000 se instaló siguiendo las instrucciones de la empresa que construyó la planta desaladora, tal como se muestra en la Figura 3. Además, cada motor de la turbobomba dispone de un relé de protección, del fabricante Schneider Electric, modelo SEPAM-2000, con el cual se contrastó la información obtenida por el analizador de redes. En la Tabla 3 se indican las características eléctricas del motor asíncrono trifásico estudiado.

Potencia	850 kW
Tensión nominal	6300 V
Intensidad	89,5 A
Frecuencia:	50 Hz
Velocidad	2982 rpm
Rendimiento	96,2%
cos φ:	0,91
Tipo de rotor:	Jaula de ardilla
Peso	5.000 kg
Resistencia de fase:	0,1830 ohm

Tabla 3. Placa de Características del motor eléctrico.

El clásico sistema de arranque de estos motores de gran potencia es el arranque directo, es decir, sin emplear ningún dispositivo adicional para limitar la corriente de arranque.

Como ya se comentó anteriormente, la IDAM dispone de tres bombas de alta presión y dos racks de membranas de ósmosis inversa. Existe una bomba de alta presión de reserva para llevar a cabo operaciones de mantenimiento en las dos unidades de producción denominadas rack-01A y rack-01B.

El analizador de redes CM-4000 se conectó a la turbobomba denominada TBP-01B tal como muestra la Figura 4.

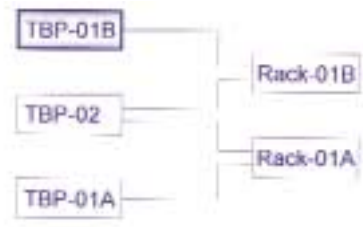


Figura 4. Esquema de las unidades de O.I.

Durante un periodo de seis meses, se realizaron diversas mediciones (tensiones, intensidades, frecuencias, potencias, energía, etc.) con el analizador de redes conectado al motor eléctrico de la TBP-01B.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayor parte de los datos experimentales obtenidos fueron tomados de la unidad de producción formada por la turbobomba TBP-01B con el rack-01B. Sin embargo, también se han recopilado datos experimentales correspondientes a la influencia del arranque de las otras dos turbobombas, la TBP-01A y la TBP-02, alineadas con el rack de producción 01A.

En resumen, los eventos eléctricos más significativos en la IDAM se pueden clasificar en dos tipos:

1- Arranque directo del la TBP-01B alineada al rack-01B.

En la Figura 5 se muestra un gráfico real de un arranque directo analizando el comportamiento de la intensidad.

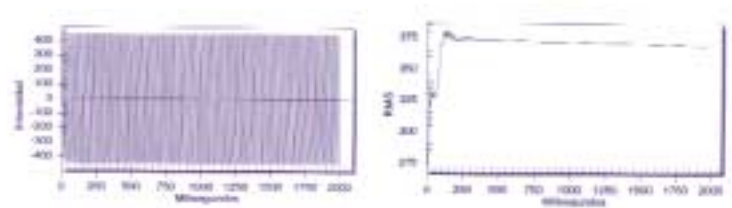


Figura 5. Intensidad de la fase R durante el arranque directo.

A la izquierda de dicha figura se muestra la intensidad instantánea y a la derecha la intensidad eficaz (RMS) correspondiente.

El máximo valor de la intensidad eficaz fue 380,92 A, es decir, del orden de unas cuatro veces la intensidad nominal del motor.

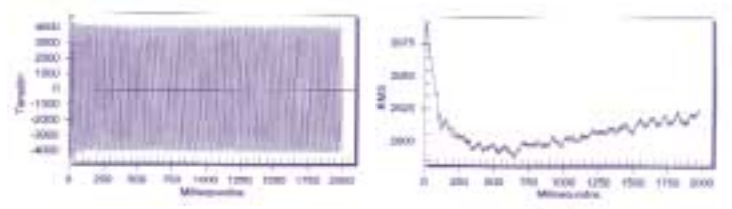


Figura 6. Tensión de fase RN durante el arranque directo.

En la figura 6 se observa el correspondiente comportamiento de la tensión. A la izquierda de dicha figura se muestra la tensión instantánea y a la derecha la tensión eficaz (RMS).

La máxima tensión eficaz fue de 2909 V, restableciéndose posteriormente el valor nominal .

2- Influencia eléctrica del arranque de la TBP-02 alineada al rack-01A estando en funcionamiento laTBP-01B.

Como muestran las Figuras 7 y 8, hay una destacable caída de tensión en el arranque y una variación de la intensidad consumida por el motor analizado. El paso siguiente fue comparar el comportamiento real con el teórico del motor, utilizando para ello un software específico del fabricante Asea Brown Boveri (ABB) denominado "Asynchronous motor transient simulation" release 1.0 (AMTS).

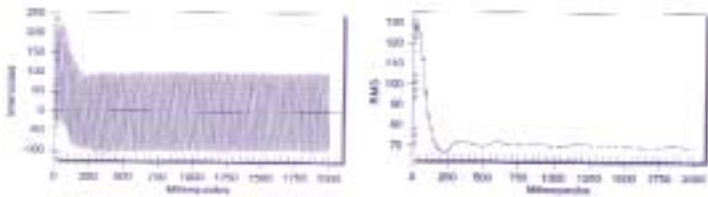


Figura 7. Influencia sobre la intensidad de la fase R de la TBP-01B debido al arranque directo de la TBP-02.

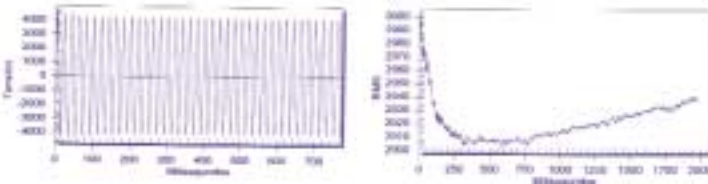


Figura 8. Influencia sobre la tensión de fase RN de la TBP-01B debido al arranque directo de la TBP-02.

Potencia nominal (kW)
Tensión nominal de alimentación (V)
Intensidad nominal (A)
Frecuencia nominal (Hz)
Número de pares de polos
Reactancia del estátor en ohm/fase o p.u.
Reactancia mutua entre el estátor y el rotor en ohm/fase o p.u.
Reactancia del rotor referida al estátor en ohm/fase o p.u.
Resistencia estatórica en ohm/fase o p.u.
Resistencia rotórica referida al estátor en ohm/fase or p.u.
Constante de inercia en segundos

Tabla 4. Parámetros del Circuito Equivalente de una máquina asíncrona.

Este programa utiliza el modelo clásico de circuito equivalente del motor asíncrono el cual se modela con los parámetros de la Tabla 4.

Los datos empleados en la simulación fueron:

Ph (kW)	Un(V)	In(A)	fn(Hz)	np	Xsa	Xm	Xra	Rr	HM(s)
850	6300	86,5	50	1	0,144	2,547	0,108	0,010	0,757

Tabla 5. Datos del circuito equivalente.

También se utilizó la curva par-velocidad suministrada por el fabricante de la bomba de alta presión para determinar la carga en eje del motor. La Figura 9 muestra dos comportamientos simulados por el programa, en el primer tramo, de cada gráfica, el interruptor de alimentación del motor está abierto y en el segundo de cada gráfica, el interruptor se cierra en el instante $t=1$ segundo, arrancando inmediatamente el motor. En ambos casos, el motor eléctrico se encuentra acoplado a la bomba de alta presión. No se pudo simular los fenómenos de interacción entre los motores conectados en paralelo tal como se sucede realmente en la IDAM.

CONCLUSIONES

Inicialmente, el objetivo específico del proyecto de investigación era estudiar de forma aislada uno de los motores eléctricos asíncronos trifásicos de gran potencia de la IDAM, pero desde los primeros datos obtenidos, se observó que la puesta en marcha de alguno de los motores que no estaban conectados al analizador, influía notablemente en el motor eléctrico en estudio, por lo que hubo que ampliar el campo de estudio, debido a la interacción producida entre las máquinas eléctricas conectadas con una configuración eléctrica en paralelo. Las variables eléctricas analizadas en el comportamiento real y en la simulación del arranque del motor asíncrono trifásico no pre-

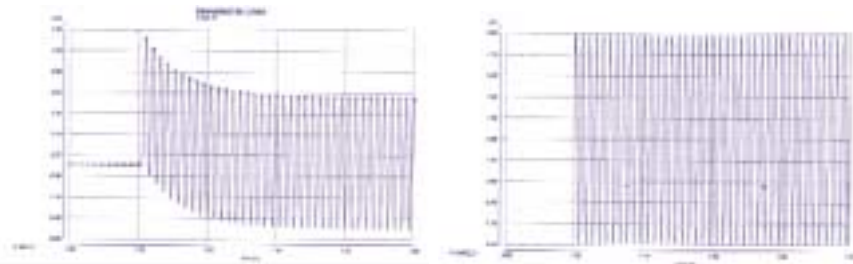


Figura 9. Simulación de un arranque del motor asíncrono.

sentan grandes diferencias dignas de mencionar.

Las gráficas obtenidas con el software utilizado parten de un modelo matemático ideal, no reflejando estrictamente el comportamiento real del arranque del motor asíncrono.

Por otro lado, el consumo específico de la planta expresado como kWh de energía consumida por cada metro cúbico de agua desalada, no se ve afectado de forma notable por los arranques de los motores, ya que éstos se llevan a cabo durante pequeños intervalos de tiempo. El trabajo desarrollado hasta la fecha no se debe dar por concluido, ya que en nuestra opinión aparecen unas posibles líneas futuras de investigación encaminadas a:

- mejorar los sistemas de arranque de los motores de gran potencia y media tensión.
- considerar la utilización de motores de mayor tensión nominal (> 6,3 kV).
- y finalmente, analizar el flujo de potencias de todo el conjunto de elementos eléctricos que intervienen en el sistema de potencias de la instalación desaladora.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación forma parte del Proyecto Innova AC-13. Los autores queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al patrocinador, la empresa UNELCO, así como a las empresas

“Aguas de Telde, S.A.”, “Ondeo Degrémont” y Canaragua sin cuya ayuda desinteresada no hubiese sido posible la realización del mismo.

BIOGRAFÍA

JOSÉ JAIME SADHWANI ALONSO

Es Profesor Titular de Escuela Universitaria y Secretario del Dpto. de Ingeniería Eléctrica de la ULPGC, habiéndose doctorado con la Tesis “Estudio de sistemas de limpieza en membranas de ósmosis inversa”. Desde el año 1990 ha impartido docencia en la Escuela de Ingenieros Industriales simultaneando la actividad docente con la actividad profesional en el sector de tratamientos de aguas. Desde dicha fecha ha estado especializándose en dicho sector de aguas, habiendo publicado diversos artículos en revistas especializadas.

Ha ocupado el cargo de Director Técnico de la empresa Proyectos e Instalaciones de Desalación (PRIDESA) desarrollando tareas de ejecución, montaje y puesta en marcha y gestión de las plantas desaladoras adjudicadas en Canarias.

Durante el período 1989 a 1997, participó en la construcción de las plantas desaladoras mediante el proceso de ósmosis inversa, siguientes:

- Las Palmas III-IV de 36.000 m3/día (1987-1989)

Por otro lado, el consumo específico de la planta expresado como kWh de energía consumida por cada metro cúbico de agua desalada, no se ve afectado de forma notable por los arranques de los motores, ya que éstos se llevan a cabo durante pequeños intervalos de tiempo.

- Sureste de 10.000 m³/día (1992-1993)
- Arucas-Moya de 4.000 m³/día (1993-1994)

En la actualidad sigue trabajando en la línea de investigación de Tratamientos de Aguas mediante convenios de colaboración con las Administraciones Públicas.

FABIÁN DÉNIZ QUINTANA

Ingeniero industrial, es profesor del Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Subdirector de Ordenación Académica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la ULPGC, impartiendo docencia en las asignaturas de Máquinas Eléctricas y Electrotecnia. Actualmente está realizando su Tesis Doctoral en el estudio: análisis y modelado de las máquinas eléctricas empleadas en las plantas desaladoras de agua de mar por ósmosis inversa en Canarias. Con anterioridad a la actividad docente universitaria, desarrolló su actividad profesional en estudios y despachos profesionales de ingeniería y arquitectura. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria Campus de Tafira Baja, CP 35017, Las Palmas de Gran Canaria, ESPAÑA
Tel: +34 928 45 1963,
Fax: + 34 928 451874
Email: jsadhvani@die.ulpgc.es
fdeniz@die.ulpgc.es

BIBLIOGRAFÍA

Arrillaga, J., (1994): Armónicos en sistemas de potencia, Univ. de Cantabria

Bonal, J. (1999), Accionamientos eléctricos a velocidad variable, Schneider Electric

Cortés Cherta, M. (1990) “Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas Tomo III”, Editores Técnicos Asociados

El-Hawary, M. (1984): Electrical Power Systems, Design and Analysis, Reston

Fraile Mora, J. (1995): Máquinas Eléctricas, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Geisler, P. et all (1999): Optimization of the energy demand of reverse osmosis with a pressure-exchange system”, Desalination, núm.125, págs. 167-172

Harris, C. (1999): “Energy Recovery for membrane desalination”, Desalination, núm. 125, págs. 173-180

Kingsley, Kusko y Fitzgerald, (1984): Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. Editorial Hispano Europea

Merino Azcárraga, J. (1999): Arranque industrial de motores asíncronos. Mc Graw-Hill

Stroud, K. A. (1984): Fourier series and harmonic analysis, Stanley Thornes

Veza, J.M. (2001): “Desalination in Canary Islands: an update” Desalination, núm. 133 págs. 259-270.

Zamora, Macho (1997): Distorsión armónica producida por convertidores estáticos, Iberdrola

Patrocinador de esta investigación:

UNIÓN ELÉCTRICA DE CANARIAS, S.A.
(UNELCO)