

Economic Barriers to the Application of Energy-Efficient Motors in Industry

P. Donolo, *Member, IEEE*, E. Chiacchiera, M. Pezzani, *Member, IEEE*, A. Lifschitz, and C. De Angelo *Senior, IEEE*

Abstract— In this paper we present a technical, economic and financial feasibility analysis of the replacement a standard-efficiency induction motor (IE1) by a Premium-efficiency induction motor (IE3) in an industrial application. We consider a press used for the production of crude degummed soybean oil and soybean expeller, from an industry in the Province of Cordoba, Argentina. We use a model of the induction motor that drives the press to correctly estimate the load level and the performance of the induction motor currently used. With the data obtained from the model, we analyze the economic and financial feasibility of the induction motor replacement for the registered operating conditions, with the current energy prices and the associated subsidies. We calculate different indicators for the current scenario and future forecasts. The results show that, in the current context of high interest rates and high subsidies to electric power, economic barriers may exist to the replacement of induction motors by the higher efficiency class. However, the analysis with future scenarios of lower subsidies for electric power and / or lower interest rates on financial income can cause these barriers to be removed.

Index Terms— Asset management, Cost benefit analysis, Decision making, Economic indicators, Electric motors, Energy efficiency.

I. INTRODUCTION

Los sistemas accionados con motores eléctricos (ME) son los principales usuarios finales de la energía eléctrica. Según el reporte de la IEA del año 2018, aproximadamente el 68% de la demanda eléctrica del sector industrial y el 53% de la demanda global de electricidad corresponde a ME [1].

15 de Enero de 2020. Este trabajo fue posible gracias al aporte de la Universidad Nacional de Río Cuarto, el MinCyT-Córdoba, la ANPCyT y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

P. Donolo, GEA - FI Universidad Nacional de Río Cuarto – IITEMA-CONICET, Río Cuarto, X5804BYA, Córdoba, Argentina, (e-mail: pdonolo@ing.unrc.edu.ar).

E. Chiacchiera, FI Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, X5804BYA, Córdoba, Argentina, (e-mail: echiacchiera@ing.unrc.edu.ar).

M. Pezzani, GEA - FI Universidad Nacional de Río Cuarto – IITEMA-CONICET, Río Cuarto, X5804BYA, Córdoba, Argentina, (e-mail: mpezzani@ing.unrc.edu.ar).

A. Lifschitz, FI Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, X5804BYA, Córdoba, Argentina, (e-mail: alifschitz@ing.unrc.edu.ar).

C. De Angelo, GEA - FI Universidad Nacional de Río Cuarto – IITEMA-CONICET, Río Cuarto, X5804BYA, Córdoba, Argentina, (e-mail: cdeangelo@ing.unrc.edu.ar).

Si consideramos que más de dos tercios de la energía eléctrica mundial se produce mediante combustibles fósiles, las mejoras en el rendimiento de los sistemas accionados con ME pueden conducir no solo a la reducción en el consumo de energía primaria, sino también a una reducción en las emisiones de gases efecto invernadero (principalmente dióxido de Carbono, CO₂) y contribuir a conseguir las metas establecidas en el acuerdo de París [2][3].

Si bien el uso de ME de mayor eficiencia (Energy Efficient Motors - EEM) trae asociado un ahorro de la energía consumida [4], diversos trabajos resaltan y analizan algunas barreras que dificultan la instalación de EEM en aplicaciones industriales [5]-[8]. Entre las principales barreras encontradas se destacan las cuestiones económicas y de comercio internacional, la falta de regulaciones o programas orientados a la eficiencia en motores, el retraso en la homogenización y adopción de estándares internacionales en relación con EEM y conflictos de intereses al establecer la eficiencia mínima exigida a los productos comercializados, entre otras. En estos trabajos se destaca que para favorecer la adopción y difusión del uso de EEM se requiere de acciones conjuntas y la aplicación de paquetes de medidas tendientes a eliminar las barreras existentes [6][7].

En este sentido, diversos países comenzaron a trabajar en esta dirección. Países como Brasil, Estados Unidos y los pertenecientes a la Unión Europea actualmente tienen restricciones a la comercialización de ME de eficiencias menores a la clase Premium (IE3) [8]. Otros países como Colombia tienen restricciones a la comercialización de ME de eficiencias menores IE2 (Alta eficiencia) y se incrementará de manera escalonada a Premium en septiembre de 2020 [9]. Sin embargo, el uso de ME de eficiencia superior al mínimo obligatorio, o en casos de países como Argentina que no tienen restricciones a la comercialización de ME, sólo se efectúa cuando su aplicación trae aparejadas ventajas económicas para el adoptante.

Estudios previos muestran que, tomando un período de análisis de 15 años, el costo de un motor eléctrico de inducción (MI) representa aproximadamente el 2.3% del costo total de operación, mientras el costo de la energía consumida representa aproximadamente el 96% [10]. Por lo tanto, el costo de la energía es un factor determinante al momento de evaluar la viabilidad económica del uso de ME de mayor eficiencia [11].

Si bien los fabricantes de ME proporcionan herramientas simples para estimar el ahorro de energía producido por la utilización de ME de mayor eficiencia, su análisis se limita a las diferencias de rendimiento en condiciones nominales, considerando un precio medio de la energía eléctrica y haciendo énfasis en el tiempo de retorno de la inversión simple y la reducción en los gases de efecto invernadero [12][13]. Algunos fabricantes incluyen además la posibilidad de considerar las características de la carga, para casos típicos como bombas, ventiladores o compresores [14].

También se han documentado experiencias piloto a nivel industrial que muestran el potencial ahorro que es posible alcanzar con la utilización de MI de alta eficiencia (IE2) en reemplazo de uno de eficiencia estándar (IE1)[15][16][17]. En esos trabajos, también se estudia el tiempo de retorno de la inversión por el mayor costo inicial de adquisición de un motor IE2 respecto de un IE1 [15]. Este tipo de análisis, sin actualizar costos, sin considerar el valor actual del dinero, ni las tasas de interés de inversiones de riesgo similar, puede conducir a resultados demasiado optimistas, que luego no se verifican con estudios más detallados o posteriormente en su implementación [18].

Otro inconveniente se presenta si la tarifa que abona el usuario final no representa correctamente los costos de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica [19]. Este análisis presenta aún mayores desafíos en un contexto de tasas de interés elevadas. Condiciones como las mencionadas desalientan la adopción voluntaria de EEM debido a que la relación entre el ahorro obtenido y la inversión necesaria no resulta conveniente.

En este trabajo se realiza el análisis de factibilidad técnica, económica y financiera de reemplazar un motor de inducción de eficiencia estándar (IE1) por uno de eficiencia Premium (IE3) en una aplicación industrial. Para ello se seleccionó como caso de estudio el MI de una prensa utilizada para la producción de aceite crudo desgomado y expeler de soja, de una industria de la Provincia de Córdoba, Argentina. Dado que no se cuenta con datos completos del fabricante del motor, se realiza el modelado del MI que acciona la prensa para estimar correctamente el estado de carga y su rendimiento. A partir del análisis técnico se propone el reemplazo de este motor por uno de mayor eficiencia y se analiza la factibilidad económica y financiera del reemplazo considerando las condiciones de operación registradas, los precios de la energía vigentes del distribuidor y los subsidios asociados. Se calculan diferentes indicadores típicos para la evaluación de proyectos de inversión en el escenario actual y a partir de estimaciones futuras, entre ellos, valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), período de repago simple (PRS), relación VAN/Inversión inicial y recuperó de inversión inicial.

Los resultados obtenidos muestran que, en el contexto actual, las elevadas tasas de interés y los altos subsidios a la energía eléctrica, constituyen barreras económicas que desalientan el recambio de ME por otros de mayor eficiencia.

Sin embargo, el análisis con escenarios futuros de menores subsidios a la energía eléctrica y/o tasas de interés a la renta financiera más reducidas puede hacer que estas barreras se

eliminen.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Metodología General

De manera general, la metodología presentada en este trabajo contempla un primer análisis técnico, para seleccionar el motor adecuado para el reemplazo, y luego un análisis económico considerando los ahorros energéticos producidos por el reemplazo, y considerando los indicadores para evaluación de proyectos en las condiciones y contextos locales. Como se verá, este último aspecto puede resultar definitorio a la hora de decidir el reemplazo.

La metodología puede resumirse en los siguientes pasos:

- Obtener los datos característicos del motor (datos de placa, datos de catálogo). De no contar con ellos se pueden estimar a partir del modelo de régimen y mediciones realizadas sobre el motor en operación.
 - Analizar las condiciones de suministro y de operación del motor, en función del registro de corrientes y potencias durante un período representativo del ciclo de trabajo.
 - Evaluar si el dimensionamiento del motor es adecuado a su uso actual, considerando los efectos adversos del desequilibrio y los armónicos de tensión sobre el desempeño del motor. De ser necesario, redimensionar acorde a las condiciones de operación relevadas.
 - Analizar los datos de facturación de la industria, considerando contrato, tarifas, horas y modo de operación del motor.
 - Seleccionar un motor de mayor eficiencia, que cumpla con las características y necesidades de operación del equipo.
 - Determinar la diferencia de consumo (potencia) entre el motor actual y el reemplazo propuesto en las mismas condiciones de operación.
 - Determinar el ahorro en costos de energía y potencia, de acuerdo al cuadro tarifario correspondiente, considerando las horas de operación en cada franja tarifaria, de corresponder.
 - Realizar el flujo de fondos de tipo incremental considerando la inversión a realizar, el ahorro en costo de energía y potencia facturada, y variaciones en conceptos de impuestos que correspondan, producidos por el cambio de motor.
 - Para evaluar el recambio, analizar los indicadores típicos: VAN, TIR, PRS, relación VAN/Inversión y Recuperó de inversión.
 - Realizar un análisis de sensibilidad de los resultados para determinar el alcance y la sostenibilidad de los mismos.
- A continuación, se presenta un ejemplo concreto de la aplicación de esta metodología para evaluar el reemplazo de un MI de eficiencia IE1 dentro de una planta industrial en Argentina.

B. Descripción de la Planta y ME Seleccionado para el Análisis

El análisis de factibilidad se realizó sobre una industria dedicada al extrusado y prensado de granos para la producción de aceite y expeler de soja [20].

La planta es electro-intensiva, con una demanda promedio

superior a los 300 kW y con suministro en media tensión (13.2 kV). El cuadro tarifario con el que se factura la energía contempla costos por demanda (o potencia disponible) y por consumo de energía en tres bandas horarias.

La producción es continua en tres turnos y su salida de servicio se realiza solo para tareas de mantenimiento. De esta manera la disponibilidad de la planta supera el 90%, lo que garantiza más de 336 días de operación anual. Esta característica de funcionamiento hace que el tiempo de operación supere las 8000 horas/anuales. Por lo tanto, una reducción en la potencia demandada con incremento del rendimiento de los ME utilizados pueden representar reducciones importantes en la energía consumida anual y en los costos de energía asociados.

Para mejorar el rendimiento de la extracción de aceite, el grano se somete a dos etapas de prensado y es sobre la prensa de la segunda etapa donde se realizó el estudio. Esta prensa, que trabaja con el expeler húmedo que sale de la primera prensa, tiene un MI de 110kW, cuyos datos se pueden consultar en la Tabla A.I del anexo.

C. Consideraciones para el Análisis Técnico

El MI de la prensa trabaja a velocidad constante, sin embargo, posee un accionamiento de velocidad variable para el arranque y la toma de carga. El accionamiento sirve además para los casos en que hay cortes de energía, donde es necesario extraer el material de la prensa antes de que se solidifique, lo que se realiza con el auxilio de un grupo electrógeno propio. El grupo electrógeno para esta operación es de una fracción de la potencia necesaria para continuar la producción y tampoco tiene potencia suficiente para un arranque directo de un motor de este tamaño.

Durante el ciclo de trabajo normal, el MI de la prensa opera con un nivel de carga por debajo del nominal, lo cual se desprende del análisis del registro de corrientes eficaces (RMS) realizado sobre este motor durante más de un año.

La Fig. 1 muestra un recorte de cinco días del registro de las corrientes eficaces del motor actual en operación, donde se puede observar también el apagado y la toma de carga del equipo, y se aprecia que en ningún caso se supera la corriente eficaz nominal (206.1 A).

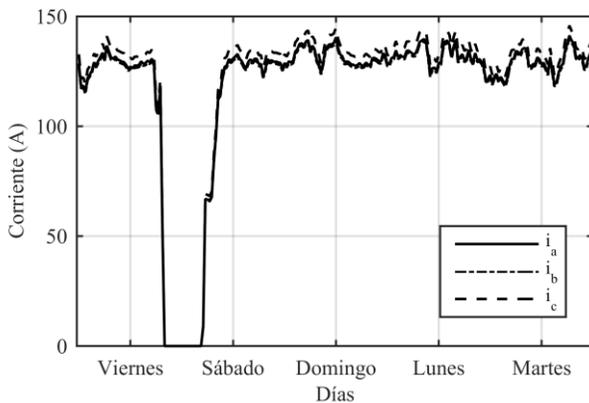


Fig. 1. Registro del valor de a las corrientes eficaces del MI de la prensa durante cinco días de operación.

En la Fig. 1 se ve también que la corriente promedio medida

en operación es de 131.57 (A).

Dado que la condición de carga es diferente a la condición nominal del MI, el rendimiento no será el indicado en la placa característica, por lo cual es necesario estimarlo a los fines de determinar correctamente la mejora de eficiencia con el MI propuesto. Existen diferentes enfoques para estimar el rendimiento, dependiendo de la información y las mediciones disponibles [21]. Los principales fabricantes de motores eléctricos proporcionan las curvas características de funcionamiento de sus motores incluyendo el rendimiento en función del estado de carga. Por lo tanto, si se dispone de dicha información y se conoce el estado de carga de los motores que se desea comparar, pueden utilizarse estas curvas para realizar una estimación del rendimiento. Sin embargo, es común en el ámbito industrial encontrar motores de los que no se posee la placa característica, más aún cuando se trata de motores que ya cumplieron la vida útil o que han sufrido intervenciones de mantenimiento (rebobinados, repintado, etc). En estos casos surge la necesidad de estimar el estado de carga y/o el rendimiento del motor que se encuentra actualmente en funcionamiento a partir de mediciones simples como pueden ser las corrientes de alimentación y la velocidad.

En estos casos, el modelo de régimen permanente del motor de inducción es una alternativa válida para este fin.

En este trabajo no se disponía de estas curvas de rendimiento respecto del estado de carga, por lo tanto, para estimar el rendimiento del motor en la condición de carga registrada, se propone utilizar el modelo del MI que se muestra en la Fig. 2. Los parámetros para este modelo se pueden obtener de datos del fabricante o de ensayos realizados a motor desacoplándolo de su carga. En este trabajo, los parámetros se obtienen del fabricante y se presentan en la Tabla A. II del anexo [22].

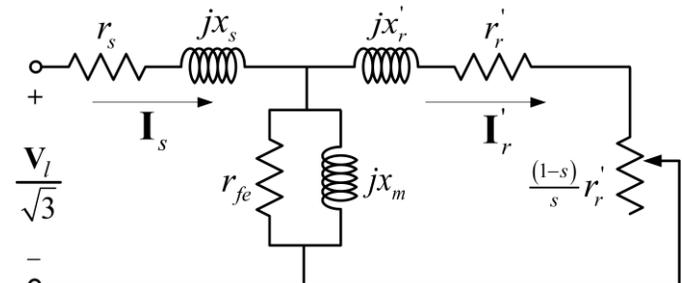


Fig. 2. Circuito equivalente del MI por fase referido al estátor.

Como primer paso se verifica que el modelo presente resultados similares a los datos indicados en la placa característica para la condición de plena carga. Para ello se calcula la corriente estimada por el modelo cuando la carga es la nominal y se la compara con la corriente de placa.

Posteriormente se calcula la condición de carga en la que el modelo estima corrientes similares a las registradas experimentalmente. A partir de estos resultados se estima la potencia y rendimiento utilizando las ecuaciones (1) a (6).

El rendimiento (η) está dado por

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_t}{P_{in}} \tag{1}$$

donde, P_{out} es la potencia en el eje, P_{in} es la potencia de entrada y p_t representa las pérdidas del ME.

La potencia a la entrada del MI está dada por

$$P_{in} = 3 \text{ abs}(\mathbf{I}_s)^2 \text{ Re}(\mathbf{Z}_m) \quad (2)$$

donde

$$\mathbf{Z}_m = (r_s + jx_s) + \frac{1}{\frac{1}{jx_m} + \frac{1}{r_{fe}} + \frac{1}{\frac{r_r}{s} + jx_r'}} \quad (3)$$

La potencia en el entrehierro, está dada por:

$$P_{out} = 3 \text{ abs}(\mathbf{I}_r)^2 \cdot \frac{1-s}{s} r_r' \quad (4)$$

donde las corrientes de estátor y rotor se obtienen de (5) y (6) respectivamente.

$$\mathbf{I}_s = \frac{\mathbf{V}_l}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{Z}_m} \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{\frac{\mathbf{V}_l}{\sqrt{3}} - \mathbf{I}_s (r_s + jx_s)}{\frac{r_r'}{s} + jx_r'} \quad (6)$$

Dado que los registros disponibles indican que el motor original esta sobredimensionado para la aplicación, dentro de las consideraciones realizadas para seleccionar el motor de reemplazo se incluyó la adecuación de la potencia nominal. A partir de la potencia estimada con el modelo se seleccionó un motor de menor potencia que el original y se verificó además que se cumplan los requerimientos de par de arranque y par máximo de la aplicación.

En cuanto al rendimiento, se consideraron alternativas de recambio que, para el punto de operación de la aplicación, presenten un rendimiento superior al del motor actual. En este sentido las alternativas contempladas son MI con clases de eficiencia IE1, IE2 e IE3. Los motores en las clases de eficiencia superiores (IE4, IE5) no se consideraron en el análisis debido a que actualmente no están disponibles en el mercado local. En particular, para el análisis presentado en este trabajo se escogió un MI de eficiencia Premium (IE3), ya que es la opción que presenta la mayor mejora en el rendimiento. Aunque las opciones IE1 e IE2 también proporcionan un incremento en rendimiento respecto a la situación actual, el menor ahorro logrado no hace viable el proyecto desde lo económico-financiero, como se verá más adelante.

A los fines del cómputo del ahorro de energía, en este trabajo no se diferenciarán las mejoras en el rendimiento debidas al cambio en la clase de eficiencia del motor y las ocasionadas por la modificación del punto de operación del motor. Dado que la propuesta considera el redimensionamiento (reducción de la potencia nominal) del motor, el motor nuevo operará con un valor de carga próximo al nominal y por lo tanto con un rendimiento prácticamente óptimo.

D. Consideraciones para el Análisis Económico - Financiero

Para realizar el análisis económico financiero se confecciona un flujo de fondos de tipo incremental, típico en la evaluación de proyectos de inversión de este tipo.

En el flujo de fondos se deben considerar el horizonte temporal, los ingresos (o ahorro de costos) y egresos en concepto de impuestos e inversión inicial. Asimismo, se debe considerar el valor rezago del equipamiento al final del proyecto.

Si bien este análisis se realiza en un contexto de inestabilidad macroeconómica, lo cual indicaría que el horizonte temporal debería definirse a corto plazo, las altas tasas de interés que representan alternativas de inversión equivalentes al proyecto en monto y riesgo (costo de oportunidad), nos llevan a trazar un horizonte temporal de mediano plazo de cinco años.

Considerando que el cambio de motor se realiza en una industria en marcha y que el análisis que se realiza es de tipo incremental, los ingresos vendrán representados por el ahorro de costos generado al disminuir el consumo de energía.

El margen de ahorro variará en función a la franja horaria en que se realice el consumo de acuerdo al cuadro de tarifas para usuarios finales de la empresa distribuidora de energía.

Para determinar el ahorro en costos se realiza la diferencia entre el consumo actual (MI IE1) menos el consumo que demandará el MI IE3 en las mismas condiciones de operación que las registradas en la industria. Identificados estos valores, deberán ser asignados a cada franja horaria en función de las horas que representa cada una de ellas en relación a las horas totales de operación en el día y el ahorro del costo total anual.

La Tabla I muestra el cuadro tarifario de la empresa provincial de energía, válido desde el primero de noviembre de 2019. Es importante destacar que este cuadro tarifario se confecciona a partir del precio estabilizado de la energía, precio al cual la empresa distribuidora adquiere la energía del sistema interconectado, y a los costos de distribución de la distribuidora [23]. En la Tabla I se indican los conceptos por lo cuáles se aplican cargos de acuerdo al tipo de contrato que posee la empresa, de los cuáles 2 cargos son por potencia máxima demandada en el horario punta (DP) de 18 a 23 hs y fuera de punta (DFP) de 23 a 18 hs, y 3 son cargos por energía consumida dependiendo de la franja horaria donde se consumió, esto es, valle de 23 a 5 hs (EV), resto (ER) de 5 a 18 hs y pico (EP) de 18 a 23 hs.

Sin embargo, de acuerdo con los datos disponibles de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico (CAMMESA), el precio estabilizado de la energía para los seis primeros meses de este 2019 representa sólo el 72% del valor promedio de costos monómicos, o valor real promedio de la energía [24]. La diferencia entre ambos costos es cubierta por el Estado, mediante subsidios, para garantizar el servicio [24].

TABLA I
COSTOS POR FRANJA HORARIA (AR\$)

Demanda Punta (DP)	Demanda Fuera Punta (DFP)	Energía Pico (EP)	Energía Valle (EV)	Energía Resto (ER)	Obr. Y Ser. Punta (DP)
18 a 23 hs	23 a 8 hs	18 a 23 hs	23 a 5 hs	5 a 18 hs	18 a 23 hs
418.6228	283.1264	3.41925	3.13732	3.27882	49.2036
\$/kW	\$/kW	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kW

El análisis integral de la propuesta requiere además considerar las variaciones en los impuestos asociados. En este

sentido, el ahorro introducido por el reemplazo del motor no implica modificaciones en el impuesto a los Ingresos Brutos e impuestos al Valor Agregado (IVA), sin embargo, si modifica lo que se deberá abonar en concepto de impuesto a las Ganancias.

Relacionado con el impuesto sobre los Ingresos Brutos, este concepto es excluido del análisis porque el recambio de motor no modifica los ingresos operacionales del negocio, con lo cual tampoco se verá alterado su valor a abonar.

De igual manera, no se considera el IVA por tratarse de una Sociedad Anónima, Responsable Inscripta en el impuesto. Es decir que lo que la empresa pague en concepto de IVA por la compra del motor y por el consumo de energía, podrá ser computado como crédito fiscal y de ese modo compensarlo con el débito fiscal generado en sus ventas mensuales. Al cabo del año las diferencias se neutralizan.

Por su parte, el incremento en concepto de impuesto a las ganancias está dado por el ahorro en los costos que el MI de mayor eficiencia genera. Esto produce una mayor utilidad neta para la empresa. Por lo tanto, el impacto positivo en el resultado económico deja como consecuencia un mayor impuesto a las Ganancias a pagar.

La inversión necesaria para el recambio del MI actual, por uno de eficiencia Premium (IE3) es de USD 7000 (ARS440510 - Tipo de cambio según BCRA -62.93 AR\$/USD al 29/11/2019).

Para estimar el valor de rezago se considera que la vida útil del MI es de diez años de acuerdo con la contabilidad. Por lo tanto, se optó por tomar el valor de rezago en función de su valor contable, es decir, el valor que el motor tendrá para la contabilidad al cabo del quinto año.

Finalmente es necesario destacar que el eventual reemplazo del MI no implica riesgo adicional, por lo que la tasa de un plazo fijo sería representativa del costo de oportunidad del capital. Por lo tanto, para calcular el Valor Actual Neto, se utiliza como tasa de descuento de los flujos la tasa promedio de los últimos cinco años de bancas públicas y privadas de depósitos a plazo fijo a 30 días para montos de entre AR\$100000 a AR\$499999 [25][26]. El valor promedio interanual es de 28.15% (Nov. 2014 – Oct. 2019), lo que representa una Tasa Efectiva Anual (TEA) del 32.1%. Si bien la tasa propuesta es baja en comparación con las tasas actuales, esto se debe al contexto de inestabilidad actual. Sin embargo, la tasa se considera representativa para el período de análisis. La tasa mínima en los últimos cinco años fue de 17.81% (Abril 2017) y la máxima fue de 57.95% (Septiembre 2019) [25][26].

Para el análisis de sensibilidad, es necesario considerar que el Estado está subsidiando la generación de energía eléctrica, donde los usuarios abonan 72% del costo de la misma [24].

Por lo tanto, se plantean tres escenarios donde los usuarios deban afrontar diferentes ascensos en el costo total de la energía: el primero donde las tarifas cubran el 80% de los costos (supone un aumento de la variable en 11% respecto a la situación original), el segundo, donde las tarifas cubran el 90% de los costos (supone un aumento de la variable en 25% respecto a la situación original) y el tercero, donde la

cobertura de costos llegue al 100% (lo cual supone un aumento de la variable en 39% respecto a la situación inicial).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis Técnico

En las condiciones de operación mostradas en la Fig. 1, y con el modelo propuesto, se obtienen los resultados de la Tabla II. Estos valores son el resultado de un proceso iterativo en el cual se modifica el estado de carga del modelo variando el deslizamiento, de manera de conseguir que la corriente del estátor calculada se ajuste con un mínimo error a la corriente media relevada (131.57 A).

TABLA II
RESULTADOS DEL MODELO DEL ME IE1

Parámetro	Estimación	Unidades
Corriente estimada	131.47	A
Velocidad de rotación	995.4	RPM
Potencia de entrada	76.783	kW
Potencia de salida	68	kW
Pérdidas	8.783	kW
η	88.56	%

El motor seleccionado para el reemplazo es un MI de eficiencia IE3 y 75kW de potencia nominal. Los datos del MI seleccionado se encuentran en la Tabla A.I del Anexo.

Los resultados del ahorro que se consiguen con el MI IE3 se resumen en la Tabla III.

El rendimiento del MI propuesto (95.2%) es mayor al rendimiento del MI actual (94.3%) en condiciones nominales. Sin embargo, la diferencia se incrementa considerando que el motor actual opera a aproximadamente el 60% de carga (con un rendimiento del 88.56%), mientras que el MI propuesto operaría a más del 90% de carga. Así, el rendimiento esperado del MI IE3 de 75kW en las condiciones de carga registradas en la prensa es del 95.1%, de acuerdo con los datos provistos por el fabricante.

Esto permite lograr una reducción de 5.28 kW en la operación de la prensa. Esta reducción en la potencia demandada representa 126.72 kWh/día en energía y, considerando que la planta opera 336 días al año, el ahorro de energía estimado anual es de 42577.92 kWh/año.

TABLA III
AHORRO ESTIMADO CON EL REEMPLAZO del MI

Parámetro	MI Actual 110kW	MI IE3 75kW	Diferencia	Unidades
Potencia de salida	68	68	-	kW
Estado de carga	61.8	90.7	-	%
Potencia de entrada	76.783	71.503	5.28	kW
η (en operación)	88.56	95.1	6.54	%
Energía Pico*	383.92	357.52	26.40	kWh
Energía Valle*	460.70	429.02	31.68	kWh
Energía Resto*	998.18	929.54	68.64	kWh
Energía activa total*	1842.70	1716.08	126.72	kWh

*Por día de operación

B. Análisis Económico – Financiero. Flujo de Fondos

La reducción en la potencia demandada y el ahorro de energía indicado en la Tabla III, se manifiestan en un ahorro de costos para la industria de acuerdo con el cuadro tarifario mostrado en la Tabla I de la sección anterior. El ahorro de

costos anuales relacionado con la demanda de potencia, obras y servicios y energía se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV
AHORRO ANUAL ESTIMADO CON POR REEMPLAZO DEL MI (AR\$)

Concepto	Cantidad	Precio Unitario	Ahorro mensual AR\$	Ahorro Anual AR\$	Ahorro Anual %
Ob. Y Ser.	5.28 (kW)	49.2036	259.80	3117.54	1.7
DP	5.28 (kW)	418.6228	2210.33	26523.94	14.2
DFP	5.28 (kW)	283.1264	1494.91	17938.89	9.6
EP	26.40 (kWh)	3.41925	2527.51	30330.12	16.2
EV	31.68 (kWh)	3.13732	2782.92	33395.14	17.9
ER	68.64 (kWh)	3.27882	6301.63	75619.56	40.4
TOTAL \$				186925.18	

La Tabla IV muestra que de los AR\$186925.18 que se ahorran con la propuesta de recambio del ME, el 74.5% es debido a la reducción en la facturación de energía (EP+EV+ER), el 23.8% es por la reducción en la facturación de demanda (DP + DFP) y el 1.7% por la reducción de obras y servicios.

El mayor ahorro anual en la facturación por concepto de demanda viene dado en el horario de punta (DP \$26523.94), donde el precio del kW es mayor que fuera de punta. El ahorro en la franja horaria de punta representa aproximadamente el 60% del ahorro total debido a conceptos por demanda.

El mayor ahorro de facturación de energía anual se produce en el período correspondiente a las horas de resto (\$75619.56).

Este ahorro representa aproximadamente el 54% de ahorro en costos de energía. Este hecho se explica por la cantidad de horas que opera el ME en el período de resto, pese a que el precio unitario de la energía es de un valor intermedio entre el precio del valle y pico.

A partir del ahorro mostrado en la Tabla IV es posible confeccionar el flujo de fondos para calcular los indicadores financieros y de riesgo.

El flujo de fondos comparativo entre la condición actual y la propuesta de inversión se puede ver en la Tabla A.III del anexo. A partir de la misma se pueden obtener los indicadores mostrados en la Tabla V.

TABLA V
HERRAMIENTAS FINANCIERAS

Parámetro	Valor
VAN	\$ -31653.38
TIR	28.65%
Período de repago simple (Años)	3.91
Período de repago descontado (Años)	-
Relación VAN/Inversión inicial	7.19%
Recupero de Inversión inicial (%)	92.81%

En este estudio el VAN da como resultado un valor negativo, lo que implica que la suma de los recursos generados por el reemplazo del ME no alcanza para cubrir la inversión inicial y tampoco lograr la rentabilidad mínima exigida (en este caso representada por una tasa de descuento determinada por el promedio de las tasas de los plazos fijos de los últimos 5 años). Para cumplir con estos objetivos a la propuesta de inversión le resta generar \$31653.38. Por lo tanto, el reemplazo del ME no es rentable y la alternativa de un plazo fijo resultaría una mejor inversión desde el punto de vista financiero.

El criterio de selección según la TIR indica también que el proyecto de inversión debe rechazarse, dado que no se alcanza la rentabilidad mínima que se le pide a la inversión. Es decir, la TIR del 28.65% obtenida con el cambio del ME muestra que no se alcanza la rentabilidad mínima de 32.1% establecida en la sección II.

Ambas herramientas contemplan el valor tiempo del dinero, lo que significa que los valores arrojados por estos indicadores son llevados a un mismo momento temporal.

El indicador obtenido de la relación entre el VAN y la inversión inicial muestra la participación del VAN sobre la inversión inicial en porcentaje. Este indicador representa lo que se gana por sobre la inversión inicial. En nuestro análisis, dado que el VAN es negativo, el resultado del 7.19% representa el porcentaje de dinero que falta para cubrir la inversión inicial.

El indicador de recupero de la inversión inicial es el porcentaje de la inversión inicial que se logró recuperar. En nuestro análisis el recupero de la inversión inicial es de 92.81%, lo que significa que no se logró cubrir el costo total con los recursos generados provenientes del reemplazo del ME.

Sin embargo, si en el análisis ignoramos el valor tiempo del dinero, podemos calcular el período de repago simple (PRS) que consiste en sumar los flujos de fondos hasta obtener el valor de la inversión inicial. El cálculo del PRS es un indicador de riesgo muy difundido por fabricantes de ME y autores de trabajos de la temática para justificar la inversión en ME más eficientes [12]-[14]. Sin embargo, la toma de decisiones solo en base al análisis del PRS puede conducir a conclusiones diferentes de las realizadas con un análisis integral de las herramientas financieras.

En nuestro análisis el PRS se logra al finalizar el tercer período (3.91 períodos que representa tres años y diez meses), lo que indica que antes de los cuatro años el nuevo ME estaría pagado. Sin embargo, como muestran los indicadores de rentabilidad no sería conveniente realizar la inversión en las condiciones actuales de subsidios a la energía eléctrica y altas tasas de interés de las inversiones financieras alternativas.

C. Análisis Económico – Financiero. Sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se consideró variable el ahorro de costos por menor consumo de energía, debido a un aumento de la tarifa de energía por la eliminación de los subsidios. En la Fig. 3 se muestra la variación del VAN y la TIR a medida que se incrementa el ahorro. En la Fig. 3 se pueden identificar cinco puntos de interés para analizar. La situación actual utilizada como punto de partida para sensibilizar; el segundo punto donde el incremento de tarifas se sitúa en el 9.64% que corresponde a VAN = 0 y TIR igual a la tasa de corte y los puntos de incrementos de tarifas del 11.11%, 25% y 38.89%, que corresponderían con la eliminación de subsidios de manera que la tarifa represente un 80%, 90% y 100% del costo de generación.

Los resultados obtenidos de este análisis indican que el proyecto de reemplazo del MI por uno de eficiencia IE3 se vuelve rentable a partir del segundo de los escenarios

planteados, es decir cuando las tarifas cubren el 80% de los costos de generación.

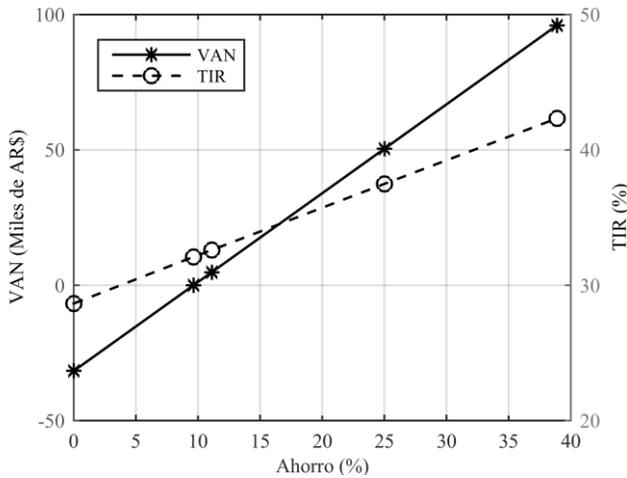


Fig. 3. Variación del VAN y la TIR a medida que se incrementa el ahorro.

IV. CONCLUSION

En este trabajo se realizó el análisis de factibilidad técnica, económica y financiera de reemplazar un MI de eficiencia estándar (IE1) por uno de eficiencia Premium (IE3). Para ello se tomó como caso de estudio el MI de una prensa utilizada para la producción de aceite crudo desgomado de soja y expeler de soja.

Dado que no se cuenta con los datos completos del motor actual, se realizó el modelado del motor que acciona la prensa para estimar correctamente el estado de carga y su rendimiento. A partir del mismo, se seleccionó un MI de eficiencia IE3 adecuado a los requerimientos y las condiciones de operación del motor actual. El uso del modelo del MI permite obtener una estimación adecuada del rendimiento de cada motor en la condición de operación real, lo cual conduce a resultados más precisos en cuanto al potencial ahorro que si se utilizara el rendimiento de placa, principalmente cuando el MI opera en una condición lejana a la nominal. En este caso, el análisis técnico permitió seleccionar un MI de menor potencia y mayor eficiencia que el actual, que operará en una condición tal que conduce a una mejora de más de seis puntos de rendimiento.

Con los precios de la energía vigentes se analizó la factibilidad económica y financiera del reemplazo del motor considerando las condiciones de operación registradas y modeladas. Las herramientas empleadas para este análisis contemplan el valor tiempo del dinero, y conducen a conclusiones diferentes a otras herramientas más simples utilizadas normalmente para justificar la inversión en ME más eficientes. En el caso considerado, herramientas como el período de repago simple indican que antes de los cuatro años el nuevo ME estaría pagado, mientras que los resultados del análisis integral indican que la suma de los recursos generados por el reemplazo del ME no alcanza para cubrir la inversión inicial, ni lograr la rentabilidad mínima exigida en un horizonte de cinco años.

Por otro lado, el análisis de escenarios futuros con menores subsidios a la energía eléctrica y/o tasas de interés a la renta

financiera más reducidas demostraron que el proyecto podría ser rentable para las condiciones planteadas. En este sentido, dado que el motor original operaba con un estado de carga alejado del nominal, el reemplazo por un motor de la potencia adecuada pero de eficiencia IE1 también implicaría una mejora en el rendimiento. Sin embargo, este estudio no fue incluido en el trabajo debido a que aun cuando el MI IE1 es menos costoso que el IE3, el análisis económico-financiero arroja resultados más desalentadores. Manteniendo todas las condiciones de análisis, pero reemplazando por un MI IE1 se obtiene un VAN negativo de 3.4 veces el que se obtiene para el motor IE3 y una TIR 10% menor que para el caso IE3. El análisis de sensibilidad muestra además que con el IE1, aún en el escenario más favorable donde el subsidio a la energía fuese nulo, el proyecto sigue sin ser rentable.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran que, en el contexto actual de elevadas tasas de interés y altos subsidios a la energía eléctrica, la baja, escasa o nula rentabilidad de este tipo de proyectos aparece como una barrera más que desalienta el recambio o la utilización de MI de mayor eficiencia. Esta barrera económica se suma a la poca reglamentación existente en Argentina en cuanto a la comercialización de motores eléctricos y a la escasa existencia de programas destinados a fomentar el uso racional y eficiente de la energía.

ANEXO

La Tabla A.I muestra los datos característicos del MI actual y del propuesto. Se observa que el MI propuesto tiene una potencia nominal menor a fin de evitar el sobredimensionamiento con el que opera actualmente. Asimismo, la corriente nominal y de arranque en conexión del MI seleccionado es menor.

En la Tabla A.I se observa que el MI seleccionado para el reemplazo posee carcasa más chica que el actual (280 en lugar de 315). Si bien existen MI de 75kW en carcasa 315, éstos no cumplen con los requerimientos de par de arranque y par máximo similares al motor actual. Sin embargo, la adaptación se puede realizar ya que tiene transmisión por correa. Asimismo, el costo de la adaptación se considera despreciable respecto al del MI de eficiencia Premium.

TABLA A.I
DATOS DE PLACA DE LOS MI

Parámetro	Actual	IE3 (propuesto)
Carcasa	315	280
Potencia (kW) / (HP)	110 / 150	75 / 100
Frecuencia (Hz)	50	50
Pares de polos	3	3
Tensión (V)	380 / 660	380 / 660
Corriente (A)	206.1	149
Factor de potencia	0.86	0.80
Velocidad nominal (RPM)	990	990
Ip/In	6.2*	8.0
Par nominal (Nm)	1062*	724
Par de arranque (%)	200*	300
Par máximo (%)	220*	350
Eficiencia (%)	94.3	95.2
Norma	JB/T 8680-2008	IEC 60034-1-2017

*Estimado en función de datos característicos de ME equivalentes.

TABLA A.II
PARÁMETROS DEL MODELO DEL MI ACTUAL (110kW) [22]

Parámetro	Ω	Parámetro	Ω
r_s	0.013	r_r	0.009
x_s	0.092	x_r	0.210
x_m	4.8	r_{je}	17.47

TABLA A.III
FLUJO DE FONDOS PROYECTADO (ARS)

Concepto/Período	0	1	2	3	4	5
Ahorro de Costos	-	186925.18	186925.18	186925.18	186925.18	186925.18
Depreciación Equipo	-	-44051.00	-	-	-	-
Venta ME IEI	-	-	44051.00	44051.00	44051.00	44051.00
Valor Residual ME IEI	-	-	-	-	-	-
Utilidad	-	142874.18	142874.18	142874.18	142874.18	142874.18
Impuesto a las Ganancias	-	-35718.55	-	-	-	-
Utilidad Neta	-	107155.64	107155.64	107155.64	107155.64	107155.64
Depreciación Equipo	-	44051.00	44051.00	44051.00	44051.00	44051.00
Inversión Inicial ME IE3	440510.00	-	-	-	-	-
Valor de Rezago	-	-	-	-	-	220255.00
Flujo Neto	440510.00	151206.64	151206.64	151206.64	151206.64	371461.64
Coef. Act	1.000	0.757	0.573	0.434	0.329	0.249
Flujo Neto Actualizado	-	114479.07	86672.50	65620.05	49681.16	92403.86

REFERENCES

- [1]. IEA International Energy Agency, "World Energy Outlook 2018", IEA, Paris 2018, 01/2020 [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- [2]. IEA, International Energy Agency. "Key World Energy Statistics 2015", Edited by OCDE/IEA, Paris, France, November 2015.
- [3]. M. A. Q. da Cunha, C. R. Schmidlin, A. H. Pereira and P. P. Reboucas Filho, "Energy efficient pumping system with flow control by speed variation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 9, pp. 2928-2934, Sept. 2015.
- [4]. E. Giraldo, C. Ruschetti, C. Verucchi, G. Bossio and J. Bossio, "Alternative Approach to Improving Efficiency Level in Small Induction Motors," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 8, pp. 2138-2144, Aug. 2018.
- [5]. Fleiter T. and Eichhammer W. Energy efficiency in electric motor systems: Technology, saving potentials and policy options for developing countries. Working Paper 11/2011. United Nations Industrial Development Organization UNIDO. Vienna, Austria 2012.
- [6]. K Kulterer, R. Werle, P. Lackner, C. U. Brunner and M. Ellis. "Policy Guidelines for Electric Motor Systems. Part 2: Toolkit for Policy Makers". *4E Electric Motor Systems EMSA, 4E Energy Efficient End-use Equipment, International Energy Agency*, October 2014.
- [7]. E. Quispe V. Santos, P. Donolo, J. Gómez Sarduy and P. Viego, "Barriers to the application of energy efficient motors in Latin America", in *10th EEMODS'2017*. Rome, Italy, September 6 to 8, 2017.
- [8]. C. Verucchi, C. Ruschetti and F. Bengler, "Efficiency Measurements in Induction Motors: Comparison of Standards," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 8, pp. 2602-2607, Aug. 2015.
- [9]. J. Rosero-García, E. C. Quispe, R. Castrillon-Mendoza, "Trends in standardization, technology development and applications of energy efficient motors", *Prospectiva*, vol 16, n° 1, 83-90, 2018.
- [10]. A. T. de Almeida, F. Ferreira and J. Fong, "Standards for Efficiency of Electric Motors", *IEEE Ind. App. Magazine*, vol. 17, pp. 12-19, 2011.
- [11]. A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and A. Quintino, "Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors," in *Proc. 48th I&CPS, IEEE/IAS*, 2012, pp. 1-13, 2012.
- [12]. Weg, "Single Motor Energy Calculator". 01/2020. [Online]. Available: http://ecatalog.weg.net/tec_cat/retornoinvestmotor_web.asp?cd_mercado=000U.
- [13]. SIEMENS, SinaSave "Energy Saving and Amortization" <https://www.sinasave.siemens.com/#/en/motor>
- [14]. ABB, "EnergySave Calculator", <https://new.abb.com/drives/energy-efficiency/energysave-calculator>
- [15]. C. Verucchi, R. Ruschetti and G. Kazlauskas, "High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 6, pp. 1325-1331, Dec. 2013.

- [16]. H. Magaldi, M. De Luca, C. Carpio, A. Baragatti, C. Burgos, H. Sierralta "Sustitución de motor de eficiencia convencional por motor de alta eficiencia en industria textil", *International Copper Association Latin America*, 2012.
- [17]. O. Dobzhanskyi y R. Gouws, "Study on energy losses in industrial sector caused by low actual efficiency of induction motors", in *ICUE-IEEE*, Cape Town, South Africa. 2014.
- [18]. L. A. Freitas, F. Santana Magnani and E. Monroe Hornsby, "Robustness of Electricity and Chilled Water Supply Systems Subject to Change Technical and Economic," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 908-915, May 2017
- [19]. L. J. Barrionuevo, R. Rubio- Barrios "Mercado eléctrico argentino: reformas y re-regulación" *IEEE - Argencon 2016*. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Bs. As., Argentina, 15 al 17 de Junio de 2016.
- [20]. C. Accoroni, "Guía de Buenas Prácticas de Manufactura para plantas de extrusado y prensado de soja Guía de aplicación para pequeñas y medianas empresas de extracción industrial de aceite de soja. *INTA AER Totoras. Ministerio de Agroindustria. Presidencia de la Nación*. 01/2020. [Online]. Available: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/Guia-Buenas-Practicas-Manufactura-Plantas-Extrusado-Prensado-Soja.pdf>
- [21]. A. G. Siraki, et al. "An Algorithm for Nonintrusive In Situ Efficiency Estimation of Induction Machines Operating With Unbalanced Supply Conditions", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 48, pp. 1890-1900, 2012
- [22]. Siemens Industry, Inc. "Low Voltage AC Motors Selection and Pricing Guide". *Catalog D81.2 - 2012 USA Edition*, N° NMPC-00600-0212. pp 174. 2012.
- [23]. EPEC, Tarifas para usuarios finales a aplicar por la EPEC desde el 01/11/2019" Resolución ERSEP N° 64. Tarifa N° 3 - Grandes Consumos 01/2020. [Online]. Available: https://www.epec.com.ar/docs/cuadro-tarifario/tarifa_n3c20191101.pdf.
- [24]. CAMMESA, Informe Mensual. Octubre 2019. 01/2020. [Online]. Available: [https://www.cammesa.com/archcount.nsf/LinkCounter?OpenAgent&X=InformeMensual*OCTUBRE*2019&L=/linfomen.nsf/WInforme+Mensual/EB5AA631CC25842F032584B80045EB9B/\\$File/Informe%20Mensual_2019-10.pdf](https://www.cammesa.com/archcount.nsf/LinkCounter?OpenAgent&X=InformeMensual*OCTUBRE*2019&L=/linfomen.nsf/WInforme+Mensual/EB5AA631CC25842F032584B80045EB9B/$File/Informe%20Mensual_2019-10.pdf)
- [25]. Gerencia de Estadísticas Monetarias, "Boletín Estadístico: Noviembre 2019. Tasas de interés por depósitos". Banco Central de la República Argentina. 2019. ISSN: 0005-4674. 01/2020. [Online]. Available: <https://www.bcr.gov.ar/Pdfs/PublicacionesEstadisticas/BoletinEstadistico/boldat201911.pdf>
- [26]. Gerencia de Estadísticas Monetarias, "Boletín Estadístico: Enero 2017. Tasas de interés por depósitos". Banco Central de la República Argentina. 2017. ISSN: 0005-4674. 01/2020. [Online]. Available: <https://www.bcr.gov.ar/Pdfs/PublicacionesEstadisticas/BoletinEstadistico/boldat201701.pdf>



Pablo Daniel Donolo (S'09 - M'15) recibió sus títulos Ingeniero Electricista (2006), Magister en Ciencias de la Ingeniería (2013) y Doctor en Ciencias de la Ingeniería (2014) en la Universidad Nacional de Río Cuarto. Es Investigador de CONICET desde 2015 y docente efectivo de la Facultad de Ingeniería desde 2017. Sus temas de interés científico son: el uso racional y eficiente de la energía eléctrica, el modelado de máquinas eléctricas, los análisis de los problemas de calidad de energía eléctrica y el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas.



Eliana Chiacchiera recibió su título de Contadora Pública en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 2005. Desde 2007, se encuentra trabajando en el Grupo de Optimización, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es Profesora Adjunta en la Universidad Nacional de Río Cuarto. Su tema de interés en investigación es “optimización de problemas de ingeniería, aspectos económicos”.



Carlos Martín Pezzani (M'15) recibió los títulos de Ingeniero Electricista y Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina en 2007 y 2013 respectivamente. Es Investigador de CONICET desde 2015 y docente efectivo de la Facultad de Ingeniería desde 2016. Sus temas de interés científico son: el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, el uso racional y eficiente de la energía eléctrica, el modelado de máquinas eléctricas.



Ayelen Susana Lifschitz recibió su título de Licenciada en Administración de Empresas en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 2010. Desde 2014, se encuentra trabajando en el Grupo de Optimización, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es docente efectiva en la Universidad Nacional de Río Cuarto. Su Tema de interés en investigación es “optimización de problemas de ingeniería, aspectos económicos”.



Cristian H. De Angelo (S'96 - M'05 - SM'10) recibió su título de Ingeniero Electricista en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina, en 1999, y el grado de Doctor en Ingeniería en la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, en 2004. Desde 1994, se encuentra trabajando en el Grupo de Electrónica Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Actualmente es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Río Cuarto e Investigador Principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina. Sus temas de interés en investigación incluyen diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, accionamientos eléctricos, vehículos eléctricos y energías renovables.