

USO EFICIENTE DE LA ENERGIA ELECTRICA



USO EFICIENTE DE LA ENERGIA ELECTRICA

1. INTRODUCCION

El elevado crecimiento de la economía en los últimos años se ha traducido en una extraordinaria expansión del consumo de energía; en efecto, entre 1986 y 1996, la energía creció a una tasa promedio anual de 7,6 % y la electricidad lo hizo a un ritmo de 8,3 %, en el mismo período. De mantenerse la dinámica observada durante los últimos 15 años¹, los requerimientos energéticos que se desprendan de ella deberían acarrear una respuesta desde el lado de la oferta que si no tiene en consideración la protección del medio ambiente y de los recursos naturales nacionales, podría comprometer el crecimiento futuro del país.

En este contexto, el uso eficiente de la energía (UEE) constituye una de las más importantes opciones tecnológicas para enfrentar los problemas señalados. De hecho, esta constatación no es nueva; a principios de los setenta la gran mayoría de los países industrializados adoptaron agresivas políticas de racionalización de la energía para enfrentar los severos aumentos en los precios del crudo y los elevados grados de incertidumbre que se instalaban en los mercados de la energía². Lo que ha cambiado es el contexto en el cual debe darse la expansión del sistema energético y los desafíos que éste enfrenta, en los cuales aquellos ligados al medio ambiente, son cada vez mayores y más complejos.

Sin embargo, se afirma que el UEE no es una opción válida para los países en desarrollo, los que antes de pensar en «economías» de energía, deberían aumentar su consumo para mecanizar su actividad productiva y mejorar las condiciones de vida de la población. Esta argumentación contiene una falacia, ya que el uso eficiente de la energía no consiste en racionar o reducir los servicios que ésta presta sino en utilizarla mejor. Incluso existen evidencias de que los aumentos de productividad y la reducción de los consumos energéticos por unidad de producto constituyen facetas del mismo proceso.

El UEE, bajo esta óptica consiste en: (1) satisfacer los requerimientos energéticos de la sociedad al menor costo económico y energético posible, (2) energizar actividades de baja productividad o que requieren de energía para realizarse³, (3) sustituir fuentes energéticas en función de sus costos sociales relativos, y (4) concebir políticas de largo aliento en oposición a programas de emergencia y coyunturales.

En consecuencia, el problema no es la cantidad de energía empleada sino la forma más económica de asegurar la calidad térmica y ambiental de los hogares, iluminar adecuadamente las áreas productivas, de esparcimiento y domésticas, transportar personas y mercancías, proporcionar fuerza motriz a equipos y máquinas herramientas, etc.

La eficiencia energética sólo tiene sentido en la medida que permite reducir los costos globales de producción. Ello implica considerar, no sólo el costo total de los equipos nuevos, en los casos de reemplazo de equipos existentes en uso, o la inversión incremental al seleccionar equipos nuevos -los equipos eficientes cuestan, en general, más que los equipos estándares- sino que además los costos diferenciales de operación y mantenimiento de los equipos eficientes respecto de los estándares, las diferencias de productividad entre ambas opciones, etc.

En términos generales puede afirmarse que en la mayoría de las instalaciones eléctricas se derrocha del orden de un 10% o más de la electricidad que se adquiere a las empresas eléctricas debido a una selección y operación inadecuada de los equipos y sistemas de distribución de la electricidad.

[1] Interrumpida por la crisis asiática. No existen razones para afirmar que, una vez superada esta crisis, el país no vuelva a crecer a ritmos similares a los de estos últimos años o, menores, pero igualmente importantes.

[2] De acuerdo con una publicación de OLADE: Viera de Carvalho, Arnaldo, Manuel Poveda Almeida y Juan Zak. Diseño de Programas de Eficiencia Energética. La Experiencia de OLADE. Revista Energética. N° 3, Tema: Eficiencia Energética, septiembre-diciembre 1996, PP 6 y 7, el consumo mundial de energía habría sido un 25% mayor de no haber realizado los países industrializados agresivos programas de eficiencia energética.

[3] Específicamente, en las zonas aisladas los campesinos o los pequeños empresarios realizan sus actividades económicas con baja productividad al no disponer de energía en cantidad y/o calidad suficiente; incluso, no logran explotar algunos recursos locales por la misma razón.

Si bien la electricidad ha disminuido sus precios en este último tiempo, este insumo constituye un ítem de costo importante para los industriales, comerciantes y usuarios residenciales. A modo de ejemplo conviene señalar que una empresa industrial mediana que trabaja 4.000 horas/año, paga anualmente, por concepto de tarifa, del orden de 3 veces el precio de un motor estándar de 5 HP.

Las principales pérdidas eléctricas provienen del uso de motores, transformadores y líneas de distribución. Al respecto debe mencionarse que en los sectores industrial y minero del orden de un 70% del total de consumo eléctrico es realizado por los motores eléctricos, equipo que constituye uno de los objetivos principales de cualquier programa de eficiencia energética, no sólo en el caso de los proyectos nuevos sino que además en situaciones de reemplazo de equipos existentes.

En el Capítulo II se entregan algunos conceptos relativos a la eficiencia energética y una descripción de las tecnologías energéticamente eficientes más empleadas en instalaciones usuarias destinadas a los sectores industrial, minero, residencial, comercial y público.

En el Capítulo III se exponen los principales métodos utilizados para evaluar económicamente los proyectos de eficiencia energética, los que se ilustran mediante ejemplos didácticos extraídos de la experiencia práctica y de la literatura especializada.

Por último, en el capítulo IV, se presentan dos programas computacionales elaborados por PROCOBRE Chile por intermedio del Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), destinados a asistir a los proyectistas e ingenieros en la selección económica y energéticamente eficiente de conductores y cables eléctricos (EVALSEL 2.1) y de motores eléctricos (EVAMOTOR 1.0).

2. IDENTIFICACION DE OPCIONES TECNOLOGICAS TENDIENTES A AUMENTAR LA EFICIENCIA EN EL USO DE LA ELECTRICIDAD

Una estrategia de optimización de la eficiencia con que se utiliza la electricidad en los distintos sectores usuarios requiere focalizar los esfuerzos en los usos que concentran el consumo de este energético en cada uno de esos sectores. El cuadro siguiente resume la distribución del consumo eléctrico por usos finales y sectores.

Cuadro 1
Estructura del consumo eléctrico chileno, por sectores y usos para el año 1994 (en %)

Sectores	Fuerza Motriz	Iluminación	Electrólisis	Refrigeración	Climatización	Procesos térmicos	Distribución interna	Otros usos	Total
Gran minería	78	2	15	----	----	----	4	1	100
Gran industria	86	3	3	----	----	2	4	1	100
Pequeña y mediana empresa	67	6	----	----	----	20	3	4	100
Comercial y público	2	72	----	9	5	----	----	12	100
Alumbrado público	----	100	----	----	----	----	----	----	100
Residencial	----	38	----	32	----	----	----	30	100
Otros sectores ⁴	76	12	----	----	----	----	3	9	100
Total	56	19	5	5	1	4	3	7	100

Fuente: Elaboración propia en base a estudios del PRIEN^{5,6,7,8} y de la Oficina de Evaluación Tecnológica del congreso de los Estados Unidos⁹. Se estima que esta estructura no ha cambiado significativamente del año 1994 a esta parte.

[4] Se han agrupado como 'Otros' el sector transporte y los centros de transformación de la energía.

[5] PRIEN, 'Identificación de potencialidades de mejoramiento de la electricidad en las pequeñas y medianas industrias de la Región Metropolitana', Informe para Chilectra Metropolitana, Santiago, Chile, Enero 1992.

[6] PRIEN, 'Uso de la electricidad en el sector residencial y residencial artesanal de la Región Metropolitana', Informe para Colbún-Machicura SA., Santiago, Chile, mayo 1992.

[7] PRIEN, «Prestación de servicios de uso eficiente de la electricidad: una estrategia de diversificación de negocios para SAESA», Informe para SAESA, Santiago, Chile, Noviembre 1993.

[8] PRIEN, «Caracterización del consumo eléctrico de las principales empresas industriales y mineras del SIC», Informe preparado Colbún-Machicura S.A.Santiago, Chile, Julio 1993.

[9] Office of Technology Assessment, US Congress, Energy Efficiency: Challenges and Opportunities for Electric Utilities, Washington, DC., September 1993.

Por otra parte, el cuadro siguiente identifica: los principales sectores consumidores, los principales usos finales de electricidad y las tecnologías utilizadas así como aquellas opciones que permiten optimizar el uso de aquella.

Cuadro 2
Sectores, usos finales y opciones tecnológicas de eficiencia energética.

Sector consumidor	Uso final	Tecnologías/medidas
Industria/minería	Fuerza motriz	Motor estándar Motor eficiente ASD + motor Dimensionamiento de la carga
	Iluminación	Incandescente Fluorescente + ballast electromagnético Fluorescente + ballast electrónico Vapor de mercurio o sodio Canoas de alta reflexión Luz natural
Residencial	Iluminación	Incandescente Fluorescente + ballast electromagnético Fluorescente compacta Canoas de alta reflexión Luz natural
	Climatización	Ventiladores Aire acondicionado Ventilación natural
	Refrigeración	Refrigeración eficiente
Comercial	Iluminación	Incandescente Fluorescente + ballast electromagnético Fluorescente + ballast electrónico Vapor de mercurio o sodio Canoas de alta reflexión Luz natural Sensores de ocupación
Comercio	Climatización	Ventiladores Aire acondicionado Ventilación natural
	Refrigeración Agua caliente Calefacción	Refrigeración eficiente Bombas de calor Bombas de calor

En las páginas siguientes se resumen los aspectos más relevantes relativos a las principales tecnologías eficientes y las medidas para utilizar racionalmente la electricidad. Se ha considerado sólo las tecnologías más conocidas en el país y cuya rentabilidad para los usuarios ha sido suficientemente comprobada.

En el caso de un proyecto específico se sugiere considerar las sinergias de los sistemas usuarios de electricidad, ya que es ampliamente conocido que este enfoque permite economías significativas y muy superiores a la suma de aquellas que se obtienen al abordar independientemente cada uno de los componentes del sistema.

A modo de ejemplo, el optimizar el sistema red de alimentación, motor; acoplamiento, reductores, equipo usuario (bomba), tuberías, etc. permite alcanzar ahorros mucho mayores que los estimados por este estudio al considerar la mejora de algunos de los componentes del sistema, como se demostrará en un ejemplo gráfico presentado más adelante.

2.1 Tecnologías para aumentar la eficiencia en el uso de la electricidad a nivel de usuarios

Conjuntamente con considerar la incorporación de tecnologías energéticamente eficientes debe tomarse en cuenta, además, el que una opción de elevado efecto y bajo costo tiene que ver con la adopción de adecuadas prácticas de operación y mantención de los equipos, las que normalmente constituyen una de las primeras medidas que adoptan las empresas que abordan estrategias de mejoramiento de la eficiencia con que se usa la electricidad. A continuación se describen brevemente las opciones disponibles para el empresario o usuario, el proyectista y el instalador eléctrico, indicando cuando corresponda, los rendimientos habituales de los equipos estándares y eficientes.

En el capítulo III se describe conceptualmente la forma de evaluar económicamente distintos proyectos de eficiencia y se presentan ejemplos que permiten ilustrar la aplicación de la metodología propuesta. Por su parte, el Capítulo IV incorpora una descripción y forma de uso de los programas computacionales EVALSEL 2.1 y EVAMOTOR 1.0, herramientas destinadas a apoyar a los proyectistas en una adecuada selección de los cables de distribución y los motores eléctricos.

2.1.1 Los motores eficientes

Para una mejor comprensión de las características de los motores eficientes, en este punto, se introducen algunos elementos que relacionan el concepto de eficiencia y las fuentes de pérdidas, para luego describir los principales elementos relativos a motores eficientes^{10,11}.

a) La eficiencia de los motores eléctricos

La eficiencia o rendimiento se puede definir como el cociente entre la potencia mecánica de salida del motor y la potencia eléctrica entregada al mismo, siendo las pérdidas la diferencia entre la potencia eléctrica y la mecánica. En el cuadro siguiente se muestra la evolución de la eficiencia de los motores a lo largo del tiempo, lo que permite estimar el rendimiento de un motor instalado en una industria o faena minera, cuando la placa no lo indica pero se conoce aproximadamente el año de fabricación o instalación.

Cuadro 3
Evolución del rendimiento de los motores eléctricos (en %)

Potencia en HP	AÑOS				
	1944	1995	1965	1981	1991
7,5	84,5	87,0	84,0	91,0	91,7
15	87,0	89,5	88,0	92,4	93,0
25	89,5	90,5	89,0	93,6	94,1
50	90,5	91,0	91,5	94,1	94,5
75	91,0	90,5	91,5	95,0	95,4
100	91,5	92,0	92,0	95,0	96,2

Fuente: Andreas, J.C., «Energy Efficient Electric Motor». Editorial Marcel Decker, New York, 1992.

[10] S. Nadel y M. Shepard, Energy Efficient Motor Systems, ACEEE, 1991.

[11] Walter Johnston, Eficiencia y Economía de la Energía Eléctrica para Sistemas Motrices Industriales; North Carolina State University, EE.UU., 1991

Las distintas normas internacionales distinguen los motores eficientes de los estándar; en general, el rendimiento de los primeros, para distintos niveles de carga, es siempre superior al de los motores estándar¹². Sin embargo, no existe una definición única a nivel mundial y es posible apreciar; incluso, dentro de un mismo país, motores eficientes que presentan rendimientos distintos según el fabricante, respetando eso sí las normas nacionales¹³. Una característica importante de los motores de más de 100 HP resulta ser la similitud de las eficiencias a medida que aumenta el tamaño, llegando a ser prácticamente idénticas para los motores de mayor potencia.

Conviene señalar que no siempre los fabricantes que presentan las mejores eficiencias para un determinado tipo de motor (potencia, número de polos, tipo de carcasa, etc.) lideran necesariamente las eficiencias para otros tipos, por lo que se sugiere, para evaluar proyectos de eficiencia, disponer de la información acerca de las características eléctricas y de precios de los principales fabricantes internacionales.

Las tablas siguientes presentan las eficiencias nominales (para plena carga) de motores abiertos (ODP) de 1800 rpm, estándares y eficientes, manufacturados por distintos fabricantes.

Cuadro 4

Eficiencias de motores estándares (ODP) de 1800 rpm de distintos fabricantes estadounidenses (en %)

Fabricante	Potencias en HP										
	1	2	3	5	7,5	10	25	50	75	100	200
Baldor	77,0	78,5	81,5	80,0	84,0	84,0	89,5	93,0	93,0	91,7	-
GE	72,0	77,0	80,0	85,5	88,5	88,5	90,2	90,2	91,7	91,7	93,6
Lincoln	77,0	80,0	84,0	84,0	85,5	86,5	87,5	91,7	93,0	-	93,0
Marathon	77,0	81,6	81,5	85,5	84,0	86,5	88,5	90,2	91,7	93,0	94,5
Magne Tek	78,5	80,0	81,5	84,0	84,0	86,5	88,5	89,5	92,4	93,0	93,6
Reliance	77,0	77,0	80,0	82,5	85,5	86,5	87,5	90,2	90,2	90,2	92,4
Toshiba	77,0	80,0	82,5	82,5	86,5	87,5	90,2	91,0	92,4	92,4	93,6
US	78,5	85,5	80,0	81,5	84,0	84,0	89,5	91,0	91,0	91,0	94,1
Promedio	76,3	78,5	80,6	83,2	85,3	86,3	88,9	90,9	91,9	91,9	93,5

Fuente: American Council for an Energy-Efficient Economy, «Energy-Efficient motor Systems: a handbook on technology, program and policy opportunities»; 1991.

Cuadro 5

Rendimientos en % de motores eficientes (ODP) de 1800 rpm, distintos fabricantes estadounidenses

Fabricante	Potencias en HP										
	1	2	3	5	7,5	10	25	50	75	100	200
Baldor	82,5	84,0	86,5	87,5	88,5	89,5	92,4	94,1	94,1	94,1	--
GE	84,0	84,0	89,5	89,5	91,7	91,7	94,1	94,5	95,4	96,2	96,2
Lincoln	--	--	--	--	--	--	--	--	--	93,6	--
Marathon	82,5	84,0	86,5	86,5	88,5	89,5	92,4	93,0	94,1	94,1	95,0
Magne Tek	82,5	84,0	89,5	89,5	91,7	91,0	93,6	94,5	95,4	95,4	96,2
Reliance	82,5	84,0	87,5	88,5	89,5	90,2	93,0	94,1	95,0	95,4	95,8
Toshiba	85,5	86,5	88,5	87,5	90,2	91,0	92,4	93,6	94,5	94,5	95,0
Us	85,5	85,5	86,5	88,5	89,5	90,2	--	93,6	95,0	95,4	95,4
Promedio	83,6	84,6	87,8	88,2	89,9	90,4	93,0	93,9	94,8	94,8	95,6

Fuente: American council for en Energy-Efficient Economy, «Energy-Efficient motor Systems: a handbook on technology, program and policy opportunities» 1991.

[12] Al respecto cabe señalar que las normas NEMA para el año 1987 y 1997, especifican los motores estándar y eficientes con sus características eléctricas y mecánicas correspondientes. [13] Las que constituyen el límite inferior.

Un factor de suma importancia en el rendimiento con que se usan los motores es el factor de carga, debido a que el rendimiento de éstos varía con dicho factor. El cuadro siguiente presenta la variación de la eficiencia de un motor con la carga, independientemente de la potencia de los motores, según valores proporcionados en un catálogo de SIEMENS. Este cuadro tiene una validez aproximada que es generalizable, ya que se basa en una distribución porcentual de las pérdidas, la que no cambia mayormente ni por los tipos ni por los tamaños de los motores.

Cuadro 6
Rendimiento en función de la carga del motor (en %).

	$f_c = 0,25$	$f_c = 0,5$	$f_c = 0,75$	$f_c = 1,0$	$f_c = 1,25$
	93,0	96,0	97,0	97,0	96,5
	92,0	95,0	96,0	96,0	95,5
	90,0	93,5	95,0	95,0	94,5
	89,0	92,5	94,0	94,0	93,5
	88,0	91,5	93,0	93,0	92,5
	87,0	91,0	92,0	92,0	91,5
	86,0	90,0	91,0	91,0	90,0
	85,0	89,0	90,0	90,0	89,0
	84,0	88,0	89,0	89,0	88,0
	80,0	87,0	88,0	88,0	87,0
	79,0	86,0	87,0	87,0	86,0
	78,0	85,0	86,0	86,0	85,0
	76,0	84,0	85,0	85,0	83,5
	74,0	83,0	84,0	84,0	82,5
	72,0	82,0	83,0	83,0	81,5
	70,0	81,0	82,0	82,0	80,5
	68,0	80,0	81,0	81,0	79,5
	66,0	79,0	80,0	80,0	78,5
	64,0	77,0	79,5	79,0	77,5
	62,0	75,5	78,5	78,0	76,5
	60,0	74,0	77,5	77,0	75,0

Fuente: catálogo SIEMENS, 1995.

Notas: 1. Este cuadro permite conocer la eficiencia aproximada de un motor para un régimen de carga dado conocida su eficiencia para otro régimen de carga, independientemente de su potencia o de si se trata de motores eficientes o estándar 2. f_c factor de carga.

Otro aspecto relevante a considerar es el efecto que la mantención de los motores posee sobre la eficiencia de los mismos. En efecto, la lubricación, limpieza y rebobinado afectan el rendimiento del motor. Un rebobinado inadecuado puede producir una disminución de la eficiencia de alrededor de 2% a 4% en la vida útil del motor. En general puede afirmarse que las fallas mecánicas (fallas de rodamientos, torsión de ejes, mal montaje, etc.) constituyen entre un 50 a 60% de las fallas de los motores y del orden de un 30% son fallas eléctricas (principalmente cortocircuitos y, en menor medida, barras cortadas en las jaulas de ardilla).

Adicionalmente, un motor eficiente no sólo tiene un mejor rendimiento para los distintos niveles de carga, sino que además un mejor factor de potencia bajo distintas condiciones de carga. El cuadro siguiente resume los valores medios del factor de potencia para un motor estándar y uno eficiente de 30 kW operando ambos bajo cargas variables.

Cuadro 7
Eficiencia y factor de potencia para distintos factores de carga de un motor de 30 KW.

% de carga	Eficiencia %				Factor de potencia			
	100	75	50	25	100	75	50	25
Tipo de motor								
Motor eficiente	93,4	93,9	93,0	91,7	0,882	0,866	0,840	0,693
Motor estándar	90,9	90,8	89,6	84,4	0,876	0,838	0,766	0,584

Fuente: Copper Development Association, «Electrical Energy Efficiency», CDA Publication 116, december 1996.

La evaluación económica de motores alternativos no puede ignorar el valor del factor de potencia de éstos, ya que ello afecta al factor de potencia de la planta y por ende la inversión en condensadores para compensar la carga inductiva, lo que en el caso chileno pasa a ser muy importante actualmente debido a la exigencia de un factor de potencia global de 0,93.

Por último, un motor eficiente es normalmente más robusto y mejor construido que el motor estándar lo que se traduce en menores gastos de mantenimiento, lo que si bien es difícil de evaluar en general, constituye una ventaja económica que debe incorporarse en el análisis aunque no más sea en forma cualitativa.

2.1.2 Transmisiones para motores

Los sistemas de transmisión son subsistemas motrices que permiten transmitir torque a otros equipos (bombas, compresores, etc.) ya sea cambiando o no la velocidad que entrega el motor, lo que se logra mediante acoplamientos al eje, engranajes, poleas o cadenas.

a) Acoplamientos

En principio, los acoplamientos tienen pérdidas muy reducidas si es que están adecuadamente alineados, un desalineamiento no sólo aumenta las pérdidas sino que además acelera el desgaste de los rodamientos; el uso de esta opción está limitado tanto por razones de espacio como por el hecho que la velocidad de la carga no sea distinta a la del eje.

b) Engranajes

Los engranajes o reductores de velocidad son una de las opciones privilegiadas para cargas que giran a una velocidad inferior a los motores (normalmente bajo 1.200 rpm, aunque también se utilizan para cargas que giran a alta velocidad) y que requieren un alto torque. Los engranajes pueden ser helicoidales, cónicos, cilíndricos y tornillo sin fin. Los engranajes helicoidales y cónicos son usados muy frecuentemente y tienen una eficiencia de 98% por etapa, los engranajes cilíndricos tienen un uso parecido pero pérdidas mayores por lo que no se recomienda su utilización. Para potencias elevadas se justifica utilizar rodamientos de baja fricción y mejorar los lubricantes de manera de obtener eficiencias de 99% por etapa de reducción.

Los tornillos sin fin permiten reducciones elevadas (5:1 a 70:1), pero la eficiencia es significativamente inferior a los otros tipos de engranajes 55 a algo más de 90%, cayendo bruscamente la eficiencia a medida que aumenta la razón de reducción. En general, para potencias hasta 15 HP los tornillos sin fin valen más baratos que los helicoidales, por lo que se deben hacer cuidadosos análisis económicos para encontrar la solución ideal (incluso, un rendimiento bajo puede obligar al uso de un motor de mayor potencia).

Como en el caso de los motores, la eficiencia cae bruscamente cuando estas transmisiones trabajan bajo 50% de la carga nominal.

c) Correas

Aproximadamente un 30% de las transmisiones usan correas. Esta solución presenta una gran flexibilidad de uso y permite aumentar y reducir la velocidad, existiendo correas en V; en V dentadas, correas sincrónicas (la polea es dentada también) y correas planas.

Las correas en V son las más comunes y tienen una eficiencia de 90 a 96%, siendo sus pérdidas principales aquellas vinculadas al doblado y estirado al entrar y salir de la polea, al deslizamiento respecto de la polea y a la fricción.

Las correas dentadas mejoran el rendimiento, respecto de las estándares, en por lo menos 3%, debido a que se requiere menos esfuerzo para doblar y desdoblar la correa al entrar y salir de la polea, y debido a que tienen un menor deslizamiento. Además, las correas dentadas presentan una mayor vida útil, con lo que se asegura un reemplazo rentable y admiten su instalación en un sistema existente, ya que la polea no cambia. El precio de las correas dentadas suele ser 20 a 30% superior que aquél de las correas estándares.

Las más eficientes son las sincrónicas, que tienen rendimientos de 98% a 99%. En este caso el reacondicionamiento cuesta varias veces más, debido a que se requiere cambiar también la polea.

d) Cadenas

Las cadenas, como las correas sincrónicas, no tienen deslizamiento. Tradicionalmente las correas se usan para aplicaciones de alta velocidad y bajo torque. Las cadenas permiten transmitir elevadas cargas que llegan hasta los miles de HP la eficiencia puede alcanzar a 98%, pero el desgaste le hace perder un par de puntos porcentuales.

Un estudio realizado en Suecia da cuenta de un mayor costo de producción de 15% por concepto de un diseño más eficiente para los ventiladores, para un aumento de eficiencia de 10-20 puntos porcentuales.

2.1.5 Automatización y control de procesos

En este ámbito se acostumbra a distinguir dos áreas: automatización y poder.

En la primera ocupan un lugar predominante los Controladores Lógicos. En la segunda los dispositivos más representativos son los variadores (controladores electrónicos) de velocidad (Adjustable Electronic Speed Drives, ASD), que fueron tratados anteriormente.

Al igual que en otros casos considerados en este capítulo, cabe señalar que los mayores ahorros de energía no provienen de acciones directamente concebidas para tal efecto sino que de esfuerzos que persiguen otros objetivos, como mejorar la calidad del producto, disminuir costos de operación, etc.

Aquí se considerarán sólo a los controles computarizados de procesos y equipos asociados de monitoreo (sensores).

Se puede afirmar que la gran mayoría de los procesos Industriales son susceptibles de ser automatizados en el sentido indicado: combustión; transporte de materiales, chancado y molienda; piro- e hidro-metalurgia; generación, transmisión y distribución de energía, etc.

2.1.6 Electrotermia y recuperación de calor

Los sistemas de recuperación de calor desplazan a las fuentes convencionales de energía (en algunos casos dicho calor puede servir para generar electricidad) y se usan en procesos que requieren una fuente constante de calor.

La recuperación de calores de desecho en los procesos térmicos industriales puede significar; según la EPRI¹⁸, ahorros de electricidad entre 5 y 25 %, situando el promedio entre 10 y 15 %.

No es posible entregar datos económicos, ya que la tecnología de recuperación de calor, con impacto en el ahorro de electricidad, es eminentemente casuística.

2.1.7 Iluminación

La selección de un sistema de iluminación es extraordinariamente compleja, ya que influyen un conjunto de parámetros de muy distinta índole. En forma simplificada se puede afirmar que ellos se vinculan tapto a requerimientos funcionales: exigencias de las tareas que se realizan en el área a iluminar; las respuestas al color; exigencias estéticas y encandilamiento reducido o controlado como a requerimientos técnicos: densidad luminica, eficiencia (lúmenes/watt), sistemas de control, factor de potencia, vida útil y costo para el ciclo de vida.

Igualmente, los análisis son distintos si se trata de proyectos nuevos o de optimización de los existentes. En este último caso, debe evaluarse técnica y económicamente la posibilidad de conservar parte de los componentes instalados o reemplazarlos por incompatibilidad técnica con los que se incorporan.

Por otra parte, la selección de las opciones de iluminación depende del tipo de instalación y área de uso. En efecto, algunas de las alternativas disponibles son aplicables en forma preferencial en los galpones industriales (tubos fluorescentes), otras en el alumbrado público y exteriores de plantas industriales (lámparas de sodio de alta presión), en el sector comercio (halógenas, fluorescentes compactas y tubos fluorescentes) y en las residencias, según las áreas: incandescentes en zonas de baja ocupación y con exigencias estéticas, tubos fluorescentes en cocinas y baños, y fluorescentes compactas en áreas exteriores con uso diario prolongado.

a) Lámparas fluorescentes compactas

La alta eficiencia que presentan estas lámparas, su larga vida, su vasta variedad de tamaño, potencias y formas y una razonable respuesta al color; las hace recomendables como el adecuado reemplazo de lámparas incandescentes

[18] Energy Efficiency. US Congress, op. cit. September 1993.

comunes, especialmente debido a que su rosca las hace intercambiable con aquellas. Conviene indicar que no debe utilizarse esta lámpara en un circuito con reductor de luz (dimmer), debido a peligro de incendio.

La eficiencia lumínica de una lámpara fluorescente compacta es de alrededor de 44 Lum/Watt^{19,20} mientras que la de una incandescente presenta tan sólo 11 Lum/Watt. Una lámpara incandescente en condiciones normales alcanza una vida media de 1,000 hrs mientras que una fluorescente compacta en las mismas condiciones dura alrededor de 10,000 hrs. El mayor rendimiento y vida útil de este tipo de lámparas debe contrastarse con el menor precio de las ampollas incandescentes, al evaluar económicamente ambas alternativas.²¹

b) Lámparas de vapor de sodio de alta presión²²

La alta eficiencia que presentan estas lámparas de descarga, su tamaño y el satisfactorio color de la luz (no debe desconocerse que estas lámparas producen una luz ligeramente amarilla), las hace recomendables para reemplazar las lámparas comúnmente utilizadas en el alumbrado público: lámparas de vapor de mercurio (descarga), lámparas de luz mixta (descarga y filamento) y lámparas incandescentes (filamento)²³. Incluso, debido a su eficiencia, su costo de inversión puede ser menor que la lámpara de mercurio debido a que en ciertas condiciones se requieren menos lámparas.

La eficiencia lumínica de las lámparas de sodio en alta presión, en promedio, es de 100 Lum/Watt mientras que una de mercurio es de 52 Lum/Watt y una mixta 25 Lum/Watt. La duración media (en laboratorio) de estas lámparas es de 24,000 hrs siendo similar a las de mercurio.

La tasa de utilización de estas lámparas en el alumbrado público es de aproximadamente 4,100 horas/año lo que asegura, pese a sus mayores costos, un buen nivel de rentabilidad como alternativa de reemplazo frente a las comúnmente utilizadas.

c) Equipos fluorescentes eficientes²⁴

Los equipos fluorescentes para los espacios interiores y semi-interiores se componen de grupos de tubos fluorescentes pareados (2 tubos de 36 Watt ó 2 de 40 Watt²⁵) acompañados de un ballast magnético por tubo y un reflector (luminaria multitubo). En general, los reflectores utilizados actualmente ofrecen índices de reflexión bajísimos, lo que produce pérdidas lumínicas de importancia.

Durante los últimos años estos equipos han mejorado significativamente sus rendimientos, la fidelidad del color y la duración de la lámpara. En lo que respecta a la eficiencia global, se han introducido reflectores parabólicos de alta eficiencia. Estos permiten reflejar prácticamente toda la luz que da en el reflector y dirigirla hacia las superficies a iluminar. Este último reflector permite, en ciertos casos el reemplazo de dos tubos por uno²⁶, con un 10% de disminución del nivel de iluminación.

Otro equipo a considerar es el ballast electrónico⁷, el que tiene una vida útil del orden de 10 años, un consumo de 1 a 3 Watt por tubo de 40 Watt. Este tipo de ballast posee además un factor de potencia cercano a 1²⁸ y genera una frecuencia de alimentación para la descarga eléctrica en los tubos de varios kHz, con lo que aumenta por lo menos en un 25% la producción de luz del tubo y mejora la calidad de la luz (eliminando el parpadeo, zumbido y efecto estroboscópico). Se puede mencionar que un ballast magnético normal dura alrededor de 4 años y tiene un consumo de 8 Watt o más por cada tubo de 40 Watt.

[19] La medida iluminación utilizada por el sistema métrico corresponde a 1 lumen = llux/m², que mide la intensidad lumínica de una fuente sobre una superficie de 1 m².

[20] Incluso, las tecnologías más avanzadas alcanzan a 60 ó más Lum/Watt.

[21] En Chile, para los precios de las ampollas y las tarifas vigentes, la opción fluorescente compacta es rentable cuando se utiliza más de 1.500 horas al año.

[22] M. Shepard, Amory Lovins, The State of the Art: Appliances; Rocky Mountain Institute, August 1990.

[23] Si hay exigencias de fidelidad de color; problemas por efecto estroboscópico, necesidad de prendida rápida, esta opción no es aplicable. Por el contrario, las lámparas halógenas o fluorescentes pueden ser la solución.

[24] M. Shepard, Amory Lovins, op. cit. (1990).

[25] En el estudio se supuso que sólo hay instalados tubos de 36 Watt, lo que representa una hipótesis conservadora.

[26] O de 4 tubos por 3 ó 2 tubos.

[27] En el comercio de EEUU se están introduciendo ballast electrónicos que soportan hasta 4 tubos fluorescentes lo que disminuye sustantivamente los costos.

[28] El desarrollo tecnológico en esta área, ha dado adecuada respuesta a los problemas que estos equipos presentaban: bajo factor de potencia y generación de armónicas.

De acuerdo a lo expuesto resulta natural sugerir el reemplazo de dos tubos fluorescentes con reflector de baja eficiencia y ballast magnético normal por un tubo fluorescente, un reflector eficiente y un ballast electrónico, obteniéndose a lo menos el mismo nivel de iluminación.

2.1.8 Refrigeradores eficientes

Los refrigeradores, uno de los principales responsables del consumo eléctrico residencial y comercial, pueden mejorar significativamente su rendimiento, si se introducen algunas mejoras en su diseño. Pese a que dichos cambios en el diseño implican una mayor inversión para el usuario, ésta se amortiza plenamente debido al menor gasto de electricidad.

En un estudio realizado por Howard S. Geller; del American Council for an Energy-Efficient Economy de Estados Unidos²⁹, se señala que la eficiencia (medida en términos del volumen refrigerado por unidad de energía eléctrica consumida) en refrigeradores y freezers, ha mejorado un 70% en los Estados Unidos, entre los años 1972 y 1986. El costo de estas mejoras no ha sido tan elevado. Un refrigerador de alta eficiencia, en Estados Unidos, cuesta sólo un 5-10% más que uno de calidad y eficiencia medias.

De acuerdo con la experiencia internacional^{30,31} se puede obtener mejoras en el consumo de energía de 25 a 35%, a través de medidas cuyo costo representaría entre un 20 y 25% adicional de inversión.

El cuadro siguiente muestra el proceso de mejora de eficiencia de los refrigeradores en Estados Unidos.

Cuadro 8
Evolución de la eficiencia de los refrigeradores en USA

Modelo	kWh/año	KWh/pie ³ /año
Modelo medio vendido en USA en 1972 (18,1 pie ³)	1.726	95
Stock existente en USA en el año 1986	~1,500	n.a.
Modelo medio vendido en USA en 1978 (19,7 pie ³)	1,453	74
Modelo medio vendido en USA en 1987 (19,9 pie ³)	974	53
Mejor modelo producido en serie en USA en 1986 (20,0 pie ³)	744	37
Norma mínima federal en 1990 (21 pie ³)	965	46
Mejor modelo producido en serie en USA en 1990 (~21pie ³)	840	40
Norma mínima federal en 1993 (21 pie ³)	691	33
Prototipo danés desarrollado en California 1986 (21 pie ³)	520-555	25-26
Mejor modelo producido en pequeña escala en USA en 1990 (~18,5 pie ³)	204-240	11-13
Estimación en 1990 del NRDC/Sierra Club para mejor rendimiento alcanzable en 1993 (21 pie ³)	188	9

Notas: (1) La capacidad corresponde a volumen ajustado, en que el volumen del freezer se multiplica por 1,63 para poder sumarlo al volumen del refrigerador. (2) NRDC: National Resources Defence Council.

2.1.9 Refrigeración industrial y comercial

La refrigeración industrial representa un importante consumo de electricidad en las industrias de alimentos, el que puede disminuirse significativamente mediante la adopción de un conjunto de medidas. Igualmente, la refrigeración constituye un importante consumo en los supermercados, un 54% según la literatura especializada³². Dependiendo de sus usos, existe una gran variedad de equipos de refrigeración (diferentes niveles de temperatura, de sistemas de cierre, sistemas de refrigeración, etc.), lo que impide definir consumos medios de unidades estándar y eficientes. Por esta razón, se sugiere analizar en cada caso el uso específico y los consumos correspondientes.

[29] Howard S. Geller; Residential Equipment Efficiency: A State of the Art Review. May 1988, Washington DC.

[30] Howard S. Geller; Electricity conservation in Brazil: Status Report and Analysis, August 1990, Washington DC.

[31] B.Bastos, J cesario; Análise demanda da Potencial de conservação de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

[32] Rocky Mountain Institute, «Appliance», E Source ATLAS, colorado, USA, 1990

Los ciclos de refrigeración industrial y comercial constituyen sistemas complejos formados por múltiples componentes, cada uno de los cuales puede dar origen a un mejoramiento de eficiencia, tales como: motores eficientes, variadores de velocidad, compresores eficientes, ciclos avanzados de refrigeración, condensadores de enfriamiento evaporativo, bombas de calor eficientes, sistemas de aislación, etc. Para equipos utilizados en la refrigeración comercial se han evaluado medidas que permiten reducir los consumos entre 15 y 50%.

2.1.10 Computadores

Los computadores han mejorado su eficiencia de procesamiento de datos y de eficiencia eléctrica³³. Desde el punto de vista energético, no se puede dejar de lado la influencia de dichas mejoras sobre el consumo de electricidad de: procesadores más capaces y de mayor nivel de integración, controles más operacionales, circuitos de gran rapidez, y un funcionamiento optimizado del sistema computacional. Desde el punto de vista eléctrico, se han logrado importantes mejoras: pantallas de bajo consumo, fuentes de poder más compactas, controles de pantalla y standby, son todas mejoras que se traducen en importantes reducciones del consumo de electricidad por computador.

Desde el punto de vista del proyectista e instalador; si bien los consumos de los computadores presentan una importancia creciente, no parece ser un área de preocupación especial³⁴, salvo elegir computadores eficientes, los que están disponibles en el mercado en forma masiva.

2.1.11 Eficiencia en sistemas de distribución de electricidad de los usuarios industriales, comerciales y de servicios³⁵

Las pérdidas eléctricas en los sistemas de distribución interna de electricidad constituyen para el usuario un consumo importante, pero que no está destinado a satisfacer los requerimientos reales de sus instalaciones productivas o de servicios. La reducción de las pérdidas, producto de la selección de transformadores y conductores, en base a un criterio de eficiencia^{36, 37, 38 y 39}, y el manejo de reactivos, entre otras medidas, permitirá disponer de un sistema eficiente de distribución de electricidad.

Los métodos principales para reducir las pérdidas eléctricas son: (1) reemplazar los conductores definidos por las normas (capaces de soportar el calentamiento máximo asociado a la carga prevista y de asegurar una caída de voltaje inferior al límite establecido por las normas), por otros de mayor calibre (en la medida que el costo del conductor no supere el valor monetario de las pérdidas), (2) agregar alimentadores en paralelo, (3) incrementar el voltaje de distribución, (4) seleccionar para el proyecto transformadores en servicio por otros de mayor potencia y/o más eficientes, (5) agregar bancos de condensadores para mejorar el factor de potencia de las cargas y así mejorar la capacidad de transporte de las líneas, (6) equilibrar las fases del sistema para contar con un sistema balanceado.

A diferencia del caso de los motores y de otros equipos o artefactos eléctricos, en general no sería rentable reemplazar transformadores o líneas instaladas. La evaluación económica de las alternativas eficientes y estándar corresponde, en el caso de los transformadores y las líneas, más bien a proyectos nuevos.

a) Líneas de distribución

La función de los cables de distribución es transportar la corriente eléctrica desde la fuente de abastecimiento (normalmente de la subestación del usuario al punto de consumo. Desgraciadamente, debido a su resistencia eléctrica, el cable disipa en forma de calor parte de la energía eléctrica transportada. La energía perdida usando cables especificados sin considerar la minimización de los costos totales del sistema (costos de inversión y de operación a lo largo de la vida útil de la instalación) se traduce en mayores costos para el usuario.

[33] M. Shepard, Amorv Lovins, op. cit (1990).

[34] Esta afirmación implica que la selección de los computadores no demanda, como en el resto de los casos, una evaluación económica específica.

[35] Las consideraciones que se presentan bajo este subtítulo son igualmente válidas para los proyectos inmobiliarios de envergadura.

[36] Transmission & Distribution Efficiency Improvement Research & Development Survey Project, Bonneville Power Administration conservation Engineering, September 1986.

[37] Distribution System Efficiency Improvement Guidebook, Bonneville Power Adm. December 1981.

[38] Seminario «Tecnologías de Generación y Eficiencia Energética», Universidad Católica de Valparaíso, Octubre 1994.

[39] Assessment of Conservation Voltage reduction Applicable in the BPA Service Region, US Department of Energy, November 1987.

La selección del tipo de cable depende además de los factores anteriores, de: la temperatura ambiente, de la humedad, de los esfuerzos mecánicos a los que está sometido (impacto y vibraciones), la composición química del ambiente exterior, las sobrecargas y las corrientes de corto-circuito previstas, el robo y vandalismo, los riesgos de fuego y explosión, etc.

El incrementar el calibre de las líneas conduce a reducir las pérdidas eléctricas, opción que no debe adoptarse en forma mecánica ya que dicho incremento va acompañado de mayores costos de inversión. Los ejemplos que se presentan en el capítulo siguiente y en el capítulo destinado a ilustrar el uso de los programas computacionales EVALSEL y EVAMOTOR apuntan a explicitar el compromiso entre la reducción de los costos de operación y el aumento de los costos de inversión. En el caso del aumento del calibre de los conductores no sólo se debe considerar el mayor precio por metro del cable sino que además el de la instalación (que incluye mano de obra, torres de distribución y el resto de los componentes necesarios para la instalación de los cables y torres).

Como es posible apreciar en los ejemplos que se presentan más adelante, el conductor seleccionado en base a los parámetros económicos puede tener 1 a 2 calibres más que el dimensionado en base a los parámetros técnicos solamente. A su vez, un conductor que está siendo utilizado por sobre su condición de diseño, cuando se reemplaza por un conductor del calibre inmediatamente superior permite obtener una disminución en las pérdidas significativas.

En términos generales, la corrección del factor de potencia al nivel de los centros de consumo alivia la carga eléctrica de las líneas de distribución, lo que se traduce en una importante reducción de las pérdidas (dependiendo del factor de potencia inicial en la carga, se puede obtener desde un 10% hasta un 25% de reducción de las pérdidas).⁴⁰

En términos generales, el punto de equilibrio se determina en base al mínimo de los costos totales, lo que gráficamente se presenta en la Figura 1.

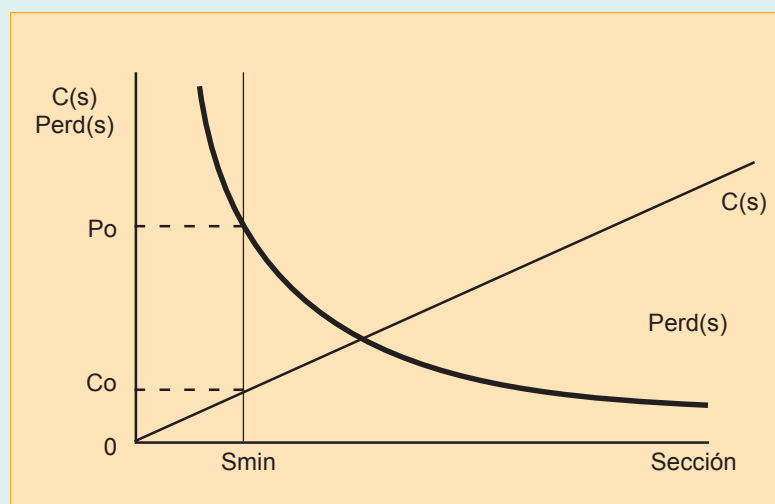


Figura 1
Determinación del conductor de calibre óptimo

La sección óptima se determina en base a maximizar el beneficio (B) expresado como la diferencia entre el ahorro de pérdidas (Ah) y el aumento de costos (AC):

$B(s)$	$= Ah(s) - \Delta C(s)$
$Ah(s)$	$= P_o - Perd(s)$
$\Delta C(s)$	$= C(s) - C_o$

[40] Los ahorros efectivos dependen del mayor o menor grado de concentración de las cargas, de los factores de potencia antes y después de la corrección, y del voltaje de distribución.

Si la pérdida se evalúa como sigue:

$$\text{Perd (s)} = \rho \times \left(\frac{P_{\max}}{V\sqrt{f}FP} \right)^2 \times \frac{12}{10^3} \times [F_{\text{Perd}} P_{\text{ener}} N_h + P_{\text{Pot}}] \times \frac{1}{s} \times \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t} \right]$$

con

$$F_{\text{Perd}} = 0,9 * FC^2 + 0,1 * FC$$

El ahorro será:

$$\text{Ah(s)} = \rho \times \left(\frac{P_{\max}}{V\sqrt{f}FP} \right)^2 \times \frac{12}{10^3} \times [F_{\text{Perd}} P_{\text{ener}} N_h + P_{\text{Pot}}] \times \left[\frac{1}{s_{\min}} - \frac{1}{s} \right] \times \left[\frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t} \right]$$

donde:

- Perd(s)** : Costo total por pérdidas [\$], en función de la sección
- Ah(s)** : Ahorro monetario debido al aumento de la sección, desde s_{\min} hasta s
- P_{ener}** : Tarifa eléctrica por unidad de energía [\$/kWh]
- P_{pot}** : Tarifa eléctrica por unidad de potencia [\$/kW/mes]
- P_{max}** : Potencia máxima esperada [kW]
- V** : Voltaje [kV]
- FP** : Factor de potencia
- FC** : Factor de carga
- F_{perd}** : Factor de pérdida
- N_h** : Número de horas mensuales trabajadas normalmente
- f** : Número de fases (1 ó 3)
- r** : Resistividad [ohm * mm²/m]
- s** : Sección [mm²]
- t** : Período de estudio [años]
- r** : Tasa de descuento
- s_{\min}** : Sección mínima

b) Transformadores de distribución

A pesar de que los transformadores de distribución tienen en términos relativos rendimientos elevados, el hecho que éstos estén normalmente conectados 24 horas al día y 365 días al año, determina que las pérdidas de estos equipos tengan incidencia en los costos de operación de los usuarios.

Dada la importancia de las pérdidas que no dependen de la carga (pérdidas en el núcleo), el diseño de las subestaciones debe permitir, en la medida de lo posible, que se pueda desconectar uno o más transformadores durante los períodos en que la carga es reducida o nula.

La selección de transformadores para un proyecto dado debe tomar en cuenta los costos de inversión de las distintas opciones, las pérdidas en el núcleo, el grado de carga de los transformadores, las pérdidas en el cobre o en carga y las tarifas pagadas por el usuario. El cuadro siguiente ilustra, a modo de ejemplo, los distintos rendimientos de un transformador de 25 kVA.

Cuadro 9
Transformadores estándar y eficientes de 25 kVA

Items	Estándar				Premium	
	Estándar	Alta eficiencia	Alta eficiencia	Alta eficiencia	Premium	Premium
Costo capital (US\$)	320	370	410	510	680	680
Pérdidas en el núcleo (W)	95	75	70	65	58	18
Pérdidas en el cobre (W)*	300	200	170	150	130	150
Eficiencia (%)	98,44	98,91	99,05	99,15	99,25	99,33
Material núcleo	Fe silicoso	Id	Id	Id	Id	Amorfo
Pérdidas kWh/año **	2.768	1.927	1.682	1.507	1.318	1.177

Fuente: Bill Howe, «Distribution Transformers: a growing energy savings opportunity» E-Source, Tech Update, December 1993. Notas: * Plena carga ** Factor de carga 0,8

Los análisis realizados parecieran indicar que, salvo casos muy especiales, no sería rentable reemplazar transformadores en operación y que las mayores economías se dan en los transformadores de potencias inferiores a 1 MVA. La estimación de los ahorros se determina a partir de una función como la siguiente.

$$\Delta E = \sum H_i * P_{est_i} \left(1 - \frac{\eta_{est_i}}{\eta_{ef}} \right)$$

en que

ΔE = Disminución del consumo de energía debido a la introducción de un transformador eficiente en vez de uno estándar (en kWh)

H_i = Número de horas que trabaja el transformador en cada rango de potencia i (en forma simplificada se puede considerar dos condiciones, en vacío y con una carga representativa de la condición media, y los tiempos estimados en cada caso)

P_{est_i} = Potencia media del transformador estándar en carga o potencia media para un número reducido de condiciones de carga (en kW)

$\frac{\eta_{est_i}}{\eta_{ef}}$ = Cuociente entre los rendimientos de los transformadores estándar y eficientes, para las condiciones de carga consideradas.

Debido al crecimiento exponencial de las pérdidas en carga, un transformador cargado a un 110% de su potencia nominal presenta pérdidas de por lo menos el doble que uno cargado al 80% de su capacidad nominal. Obviamente, esta situación no debe conducir a afirmar que lo ideal es utilizar el transformador al mínimo de carga, ya que en ese caso las pérdidas en el núcleo pasan a tener una gran relevancia y el rendimiento del transformador se deteriora significativamente. Por el contrario, 80 a 90% de carga, respecto de la capacidad nominal, parece corresponder a un dimensionamiento adecuado.

2.1.12 Adecuada mantención (Good Housekeeping)

Se trata básicamente de tecnologías y medidas misceláneas relacionadas con el diseño, la mantención y la gestión de energía de sistemas industriales y comerciales. Existe una gran variedad y cantidad de estas medidas y tecnologías.

En relación a la primera de las citadas, es bien sabido que buena parte de la ineficiencia energética proviene del sobre-dimensionamiento de los sistemas y equipos.

Típicamente se ha detectado un 30% de sobredimensionamiento por sobre aquél recomendable en los sistemas de bombeo y ventilación, lo que debe atribuirse a: i) las dificultades para predecir con exactitud los flujos y las pérdidas de carga asociadas, ii) al propósito de acomodar - sin reemplazo de equipos - aumentos de los flujos requeridos que no se previeron originalmente y iii) la disposición a aceptar, en beneficio de la confiabilidad del sistema, la penalización económica que representa el exceso de capacidad.

Otro caso típico se presenta en los sistemas de aire acondicionado y refrigeración, en que la falta de limpieza de los filtros produce grandes pérdidas de carga y por lo tanto, eleva la demanda de potencia en los ventiladores. Asimismo, si no se limpian periódicamente las superficies de los intercambiadores de calor; aumentarán en último término los consumos de electricidad. Por ejemplo, se cita un 3% anual de ahorro en el consumo de electricidad de los refrigeradores si los serpentines se limpian dos a tres veces por año.

Una medida que usualmente encabeza el listado del «good housekeeping» en los sistemas electrotérmicos⁴¹ es la aislación adecuada de los hornos para evitar las fugas (ganancias) de calor.

[41] D. Reay. Industrial Energy conservation. International Research & Development co. Ltd. England. 1979.

Respecto de la gestión del uso de la electricidad, las tecnologías y medidas dicen relación, fundamentalmente, con la operación (puesta en marcha y detención) de los equipos. Por ejemplo, si hay cambio de turno o períodos de producción bajo la capacidad normal de la planta, puede resultar económicamente conveniente detener total o selectivamente los equipos y luego reactivarlos.

En el proceso de diseñar una instalación eléctrica para un usuario industrial, minero o comercial se debe considerar el sistema en su conjunto en lugar de cada uno de los componentes individuales. Es así como en la figura que se presenta a continuación, es posible distinguir los siguientes componentes susceptibles de mejoramiento: la alimentación del motor, el motor; el sistema de transmisión, el equipo accionado y el ducto para el transporte del fluido. De acuerdo con datos empíricos frecuentes en sistemas como el indicado en la figura, el rendimiento medio de éste podría llegar a cifras del orden de 30% dependiendo del grado de estrangulamiento del flujo, de las pérdidas de carga en la tubería y del rendimiento de la bomba.

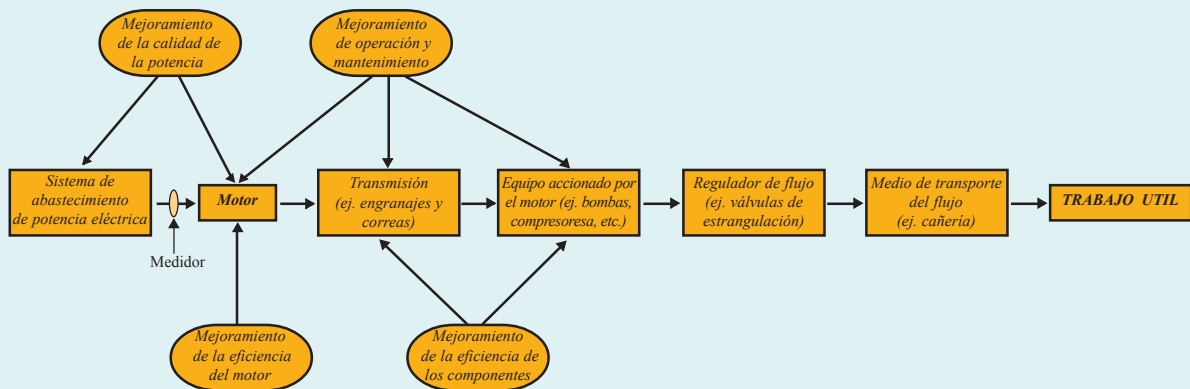


Figura 2
Mecanismo para mejorar la eficiencia de sistemas motrices

3. LA EVALUACION ECONOMICA DE LOS PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGETICA

3.1. Introducción

Es posible ahorrar energía o reducir la demanda máxima, cuando corresponda, mediante acciones que no requieren inversiones (ya sea mediante manejo de la carga o gestión de la operación de los equipos) o que, exigen inversiones. Cuando sean necesarias dichas inversiones, se deberá determinar si ellas son rentables, lo que es hasta cierto punto un concepto arbitrario, ya que depende de los criterios del inversor. El objeto de un análisis energético orientado en función de los usos finales de la energía es desarrollar una estrategia de abastecimiento energético al mínimo costo.

Un análisis como el anterior se puede hacer desde distintas perspectivas: el usuario, la sociedad y la empresa proveedora de energía. En el presente caso, la óptica adoptada es la del usuario.

La rentabilidad de las opciones eficientes energéticamente dependerá de la inversión diferencial, de la magnitud de la energía ahorrada, del costo unitario de la energía ahorrada, de la vida útil de la inversión y de la tasa de descuento. Este último parámetro reconoce el valor en el tiempo del capital.

3.2. Métodos generales para evaluar inversiones en eficiencia energética

Invertir en eficiencia energética supone un gasto de capital actual, para ahorrar costos de operación en el futuro. La tasa de descuento permite comparar cuantitativamente gastos y ahorros que ocurren en fechas diferentes. El problema consiste en definir cuál es la tasa de descuento «correcta» para una evaluación dada. Desgraciadamente no existe una respuesta teórica a esta pregunta. En general, esta es una decisión basada en políticas de la empresa que definen el umbral de rentabilidad a partir del cual están dispuestas a invertir.

La evaluación de los beneficios relativos de las inversiones en eficiencia energética requiere determinar los costos anuales de capital involucrados en las distintas alternativas en consideración, para ello es necesario calcular dichos costos a partir de un factor conocido como el factor de recuperación del capital.

Si la vida útil de una inversión (I) es n años y la tasa de descuento adoptada por la empresa es d, el costo anual (A) se determina de acuerdo con la función siguiente:

$I = \sum^n A / (1 + d)^n$, la que es una serie geométrica, cuya suma se puede calcular mediante la ecuación siguiente.

$$I = A * [(1 + d)^n - 1] / d * (1 + d)^n$$

El factor que multiplica A es conocido como el factor «valor presente uniforme» y su recíproco como el factor de recuperación del capital (FRC).

$$FRC = d (1 + d)^n / [(1 + d)^n - 1]$$

y $A = I * FRC$ (Costo anual del capital invertido)

La evaluación de las inversiones en eficiencia energética se realiza recurriendo a distintos enfoques dependiendo de los objetivos, condiciones y preferencias del analista. Los más conocidos son: periodo de recuperación simple (PRS), periodo de recuperación descontada (PRD), tasa interna de retorno (TIR), costo del ciclo de vida (CCV), costo del ciclo de vida anualizado (CCVA) y costo de ahorrar energía (CAE). A continuación se presentan brevemente aquellos más utilizados por los analistas y con algo de mayor detalle los que se refieren al ciclo de vida y costo de ahorrar energía, los que serán privilegiados en los ejemplos que se presentan más adelante.

3.2.1. Período de recuperación simple (PRS)

Este método es el más simple y probablemente el más usado, especialmente cuando la inversión se recupera en períodos muy cortos de tiempo. El PRS no tiene en cuenta ni la vida útil del equipo ni el valor del dinero en el tiempo y se calcula en base a la función siguiente:

En que:

$$PRS = \Delta I / PE (E_{est} - E_{efic})$$

PE = Precio unitario de la energía

E_{est} = Consumo de energía anual del equipo estándar

E_{efic} = Consumo de energía anual del equipo eficiente

Dependiendo del caso, ΔI puede corresponder a la diferencia entre los costos de capital de la opción eficiente y estándar; el costo de la opción eficiente y la reparación eventual de la opción estándar existente o simplemente el costo de capital de la primera, si el equipo estándar opera normalmente (sin necesidad de reparación en una perspectiva de corto plazo).

3.2.2. Período de recuperación descontada (PRD)

En este caso se consideran tanto la vida útil del equipo como el valor del dinero. El período de recuperación descontada (PRD) se determina mediante la función:

En que:

$$PRD = n * FRC(d, n) * \Delta I / PE (E_{est} - E_{efic})$$

n = vida útil del equipo

d = tasa de descuento

FRC (d, n) = factor de recuperación del capital

Las otras variables se definen igual que en el punto 3.2.1.

3.2.3. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno se define como la tasa de descuento para la cual dos alternativas de inversión tienen el mismo valor presente neto. Al evaluar las alternativas estándar y eficiente, la TIR es el valor (i) para el cual se cumple la igualdad siguiente:

$$I_{est} + PE * E_{est} * \sum_{l=1}^n [1/(1+i)^n] = I_{efic} + PE * E_{efic} * \sum_{l=1}^n [1/(1+i)^n]$$

En que:

I_{est} = Inversión en equipos estándar
 I_{efic} = Inversión en equipos eficientes

lo que equivale a igualar el valor presente de los ahorros de energía con el diferencial de la inversión requerida.

$$PE * (E_{est} - E_{efic}) * \sum [1/(1+i)^n] = (I_{efic} - I_{est})$$

3.2.4. Costo del ciclo de vida (CCV) y costo del ciclo de vida anualizado (CCVA)

El costo del ciclo de vida CCV es el valor presente de todos los costos (costo inicial de capital, costos de operación y costos de mantenimiento) asociados a la inversión durante toda su vida útil. Para comparar las dos alternativas -eficiente y estándar- se deberán comparar CCV_1 y CCV_2 respectivamente, los que se expresan mediante las ecuaciones siguientes:

$$CCV_1 = I_{est} + \sum_{l=1}^n E_{est} * PE * (1+d)^{-n} + \sum_{l=1}^n M_{est} * (1+d)^{-n}$$

y

$$CCV_2 = I_{efic} + \sum_{l=1}^n E_{efic} * PE * (1+d)^{-n} + \sum_{l=1}^n M_{efic} * (1+d)^{-n}$$

En que:

M_{est} = Costo de mantenimiento del equipo estándar
 M_{efic} = Costo de mantenimiento del equipo eficiente

A menudo la metodología adoptada apunta a comparar los costos anuales de las dos opciones -la eficiente y la estándar- para ello se recurre a los costos anualizados del ciclo de vida (CCVA) de los equipos, para lo cual se emplean las funciones siguientes:

$$CCVA_1 = I_{est} * FRC(d,n) + PE * E_{est} + M_{est}$$

$$CCVA_2 = I_{efic} * FRC(d,n) + PE * E_{efic} + M_{efic}$$

En el caso que la vida útil de los equipos estándar y eficiente sea distinta, las fórmulas base respectivas serán:

$$CCVA_1 = I_{est} * FRC(d,n_1) + PE * E_{est} + M_{est}$$

$$CCVA_2 = I_{efic} * FRC(d,n_2) + PE * E_{efic} + M_{efic}$$

3.2.5. Costo de ahorrar energía (CAE)

El costo de ahorrar energía (CAE), proporciona una medida para clasificar ordenadamente las opciones de ahorro o abastecimiento de energía sobre una base consistente y que es útil para identificar las inversiones más económicamente eficientes para una empresa o un país. Este indicador se calcula como el costo de capital diferencial anualizado -diferencia entre las inversiones requeridas para la opción eficiente y estándar- más el diferencial de los costos de mantenimiento, dividido por los ahorros anuales de energía.

$$CAE = [FRC(d,n) * (I_{efic} - I_{est}) + (M_{efic} - M_{est})] / (E_{est} - E_{efic})$$

En este caso el precio de la energía no necesita especificarse, lo que constituye la fortaleza del método, debido a las incertidumbres que normalmente rodean las estimaciones del precio de la energía en un horizonte de largo plazo. La evaluación de la ventaja relativa de la opción eficiente se lleva a cabo comparando el valor de CAE con los precios vigentes de la energía, en la medida que esta diferencia sea significativa, y que aún suponiendo una disminución sustancial de éstos -obviamente, dentro de lo que la lógica permite esperar- el CAE siga siendo inferior a dichos precios, es posible concluir que la opción eficiente es recomendable.

El ejemplo siguiente, extraído de la literatura especializada, resume una aplicación del método para distintas tecnologías y lo compara con el costo evitado de la generación termoeléctrica a carbón.

Cuadro 10
Costo de la energía eléctrica ahorrada (en US\$1990)

Medida Eficiente	ΔI /unidad US\$	FRC ¹	Mant. \$/año	Costo anual	Energía ahorrada kWh/año	CAE ² US\$/MWh
Motor	181	0,092	0	16,61	1,193	13,92
Lámpara Hg	52	0,123	1,19	7,60	394	19,30
Bomba	416	0,092	0	38,17	1,600	23,86
A. Acondicionado	62	0,123	0	7,65	258	29,64
Lámp. Fluorescente Compacta	11	0,165	0	1,81	60	30,12

Notas: 1) FRC: Factor de recuperación del capital. 2) CAE: costo de ahorrar electricidad

El costo evitado de la planta termoeléctrica considerada o la tarifa en el caso que no se trate de autoabastecimiento es de US\$ 62,78/MWh, en consecuencia la energía debería reducir sus costos en más de 50% para que las tecnologías eficientes evaluadas no sean rentables.

3.3 Aplicación de la metodología de evaluación de proyectos de eficiencia energética

Como una manera de ilustrar los métodos de evaluación de las alternativas energéticamente eficiente, se han seleccionado ejemplos correspondientes a los motores, conductores y cables y un sistema de iluminación. No se consideró necesario incluir ejemplos relativos a transformadores, a pesar de las indiscutidas ventajas de los transformadores eficientes debido a que la mecánica de cálculo no se diferencia a la que se utiliza para comparar la opción de introducir un motor eficiente y uno estándar en un proyecto nuevo o una ampliación de una planta existente.

3.3.1 Aplicación de la metodología de evaluación a los motores eléctricos

3.3.1.1 Elementos de base para la evaluación de las distintas opciones contempladas.

La evaluación se hará en base a ejemplos que sólo pretenden ser ilustrativos, basados en antecedentes cuantitativos provenientes de la literatura, debido a que los valores de los rendimientos, los precios de los motores estándar y eficientes, y los costos de rebobinado difieren según sea el fabricante, el cliente, el taller de reparaciones, etc. y deberán utilizarse aquellos que sean válidos para el proyecto o la empresa objeto de la evaluación.

Los parámetros de análisis que se utilizarán para evaluar los beneficios relativos de introducir un motor eficiente en relación con mantener un motor estándar existente o seleccionar un motor eficiente en el caso de un nuevo proyecto o de ampliación de la capacidad productiva son los siguientes:

a) Horas de uso del motor

Las horas anuales de uso del motor constituyen uno de los parámetros básicos para evaluar un proyecto de eficiencia energética, ya que los beneficios del proyecto varían en forma lineal con el tiempo de uso del equipo.

En principio, un motor que opera menos de 2.000 horas al año difícilmente podrá ser reemplazado por un motor eficiente, incluso cuando la alternativa es comprar un motor nuevo, estándar o eficiente.

b) Eficiencias relativas

En principio, la diferencia de eficiencias entre los motores estándar y eficiente disminuye a medida que aumenta la potencia -como se aprecia al comparar las tablas presentadas en el Capítulo II-, sin embargo, ello no debe conducir a la conclusión que sólo son atractivos los proyectos que involucran motores cuyas potencias se sitúan en el rango inferior de la tabla. En el caso de las potencias mayores, si bien las diferencias relativas son de 1 a 2%, las diferencias absolutas son importantes.

Conviene señalar que no siempre los fabricantes que presentan las mejores eficiencias para un determinado tipo de motor (potencia, número de polos, tipo de carcasa, etc.) lideran necesariamente las eficiencias para otros tipos, por lo que se sugiere, para evaluar proyectos de eficiencia, disponer de la información acerca de las características eléctricas y de precios de los principales fabricantes internacionales.

c) Precio de los motores y costo medio de rebobinado

Otro de los parámetros importantes para este tipo de evaluación lo constituyen los costos alternativos de las opciones consideradas, incluidos los costos de rebobinado y los precios de los motores nuevos, estándares y eficientes, del tipo abierto y cerrado. No se ha estimado conveniente incluir aquí precios referenciales para estos motores, ya que los precios de lista no guardan relación con los que obtienen efectivamente los compradores, debido a que la práctica normal es otorgar descuentos más o menos significativos, dependiendo de la importancia del comprador; respecto de los precios de lista.

d) Costos de operación y mantenimiento

Este parámetro debería incluir los cargos por potencia y energía, en el caso que se trate de proyectos nuevos y sólo energía para empresas que se supone tienen un contrato con la empresa eléctrica que especifica la demanda máxima. No se estima relevante cambiar el contrato por la introducción de algunos motores eficientes en reemplazo de los motores estándares existentes en planta.

Si bien los costos de mantenimiento se reducen en el caso de los motores eficientes, en los ejemplos que se presentan más adelante este factor ha sido despreciado, lo que no implica que si el evaluador dispone de información confiable acerca de la diferencia de costos de mantenimiento no los incorpore en su análisis, particularmente si ésta es relevante para las conclusiones de su evaluación.

3.3.1.2. Elementos de análisis para definir cuando hay que sustituir un motor en operación

a) Frecuencia de las fallas del motor

Desde el punto de vista económico, la frecuencia de falla constituye un factor importante en la definición del reemplazo de un motor estándar por uno eficiente, incluso sin necesidad de esperar que el motor falle de nuevo. Los costos derivados de las detenciones de la producción pueden llegar a ser tan elevados que el análisis económico no debería ignorarlos, sino que incorporarlos en la ecuación que se presentara en el punto 3.3.1.

b) Nivel de reparación a realizar

El costo del rebobinado es en muchos casos, para los motores de pequeña potencia, del orden del costo del motor y para los motores mayores, bastante significativo, lo que permite rentabilizar la introducción de los motores eficientes en la medida que el factor de uso no sea excesivamente reducido (a evaluar en cada caso). Por el contrario, una reparación menor puede no justificar el reemplazo.

c) Obsolescencia del motor existente

En el Cuadro 3 se presentaron los rendimientos medios de motores fabricados entre 1944 y 1991. Al respecto es posible afirmar que un motor con una utilización de por lo menos 4.000 horas⁴², fabricado antes de los años 70's es un candidato al cambio.

[42] Este factor de utilización es solo referencial, ya que motores con menos horas de uso podrán ser sustituidos dependiendo de las eficiencias relativas, del costo del motor eficiente y del precio de la energía.

3.3.1.3. Elementos de análisis para definir cuando hay que introducir un motor nuevo eficiente.

En los puntos anteriores se ha detallado cómo influyen los distintos parámetros de análisis involucrados en la decisión de seleccionar un motor eficiente, en el caso de un proyecto o de una ampliación de la capacidad de producción. En consecuencia, y con fines de recapitulación solamente, se enumeran a continuación los siguientes elementos a tener en cuenta en la selección de un motor eléctrico, eficiente o estándar:

- Costos relativos del motor estándar y eficiente
- Eficiencias relativas de ambos tipos de motores
- Horas de uso previstas para el motor
- Curva de carga del motor
- Precios de la potencia y de la energía
- Costos de mantenimiento de ambos tipos de motores
- Vida útil de los dos tipos de motores

3.3.1.4 Ilustración del proceso de evaluación de la introducción de un motor eficiente para distintas situaciones.

En los ejemplos que se presentan a continuación se han adoptado los siguientes supuestos:

- d = tasa de descuento = 12%
- n = vida útil del equipo; 20 años en el caso del motor nuevo y 10 años en el caso del motor rebobinado
- Costo de la energía = 4,0 US ¢/kWh
- O&M = costos de operación y mantención; por simplicidad sólo se consideran los cargos por energía; vale decir; no se consideran los menores cargos por demanda máxima ni los eventuales mayores costos de mantenimiento de los motores estándar.
- $I_1 - I_2$ = diferencial de inversiones entre la opción eficiente y la convencional; en que si el motor estándar está en funcionamiento, $I_2 = 0$

En los ejemplos que se presentan a continuación se han considerado motores de 50 HP, del tipo abierto y de 4 polos. Las eficiencias adoptadas corresponden a los valores medios indicados en los cuadros 2 y 3 del Capítulo II.

a) Opción motor nuevo estándar versus motor nuevo eficiente

1.	Rendimiento motor estándar	:	0,909	
2.	Rendimiento motor eficiente	:	0,939	
3.	Precio motor estándar	:	1688 US\$	
4.	Precio motor eficiente	:	2066 US\$	
5.	Factor de carga fc	:	0,8	
6.	Número de horas anuales de operación	:	6.000 y 4.000	
7a.	Cons. anual motor estándar ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,909$	= 197,0 MWh
7b.	Cons. anual motor estándar ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,909$	= 131,3 MWh
8a.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	= 190,7 MWh
8b.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	= 127,1 MWh
9.	Inversión diferencial	:	$2.066 - 1688$	= 378 US\$.
10.	Costo anual del capital ⁴⁴	:	$378 * 0,139$	= 52,54 US\$/año.
11a.	Costo energía ahorrada ⁴⁵ , 6000 hrs	:	$52,54/6,3\text{MWh}$	= 0,83 US\$¢/kWh.
11b.	Costo energía ahorrada, 4000 hrs	:	$52,54/4,2\text{MWh}$	= 1,25 US\$¢/kWh.

Vale decir; el costo de ahorrar energía es significativamente inferior al precio de la energía, sea para un motor que se utiliza 6.000 ó 4.000 horas al año.

[43] Consumo de energía anual = horas de operación * factor de carga * potencia nominal en HP * 0,746/rendimiento del motor

[44] Costo anual del capital = Inversión diferencial por el factor de recuperación del capital $FRC(r,n)$.

[45] Costo de la energía ahorrada = costo anual del capital/energía anual ahorrada debido a la solución eficiente.

b) Opción rebobinado versus motor nuevo eficiente

1.	Rendimiento motor rebobinado	:	0,889 (2% inferior al estándar nuevo)	
2.	Rendimiento motor eficiente	:	0,939	
3.	Valor del rebobinado	:	706 US\$	
4.	Precio motor eficiente	:	2,066 US\$	
5.	Factor de carga fc	:	0,8	
6.	Número de horas anuales de operación	:	6.000 y 4.000	
7a.	Cons. anual motor rebobinado ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,889$	=201,4 MWh
7b.	Cons. anual motor rebobinado ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,889$	=134,3 MWh
8a.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	=190,7 MWh
8b.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	=127,1 MWh
9.	Inversión diferencial	:	1.360 US\$.	
10.	Costo anual del capital ⁴⁴	:	$2.066 * 0,139 - 706 * 0,177$	=162,2 US\$/año.
11a.	Costo de energía ahorrada ⁴⁵ , 6,000 hrs	:	162,2/10,7MWh	=1,52US\$/kWh
11b.	Costo de energía ahorrada, 4,000 hrs	:	162,2/7,2 MWh	=2,25US\$/kWh

Como en el caso anterior; la introducción del motor eficiente es más económica que la opción convencional, en este caso el rebobinado del motor existente.

c) Opción motor obsoleto funcionando versus motor nuevo eficiente

1.	Rendimiento motor obsoleto	:	0,895 (2% inferior al estándar del año 1961).	
2.	Rendimiento motor eficiente	:	0,939	
3.	Precio motor eficiente	:	2,066 US\$	
4.	Factor de carga fc	:	0,8	
5.	Número de horas anuales de operación	:	6.000 y 4.000	
6a.	Cons. anual motor obsoleto ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,895$	= 200,0 MWh
6b.	Cons. anual motor obsoleto ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,895$	= 133,4 MWh
7a.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$6.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	= 190,7 MWh
7b.	Cons. anual motor eficiente ⁴³	:	$4.000 * 0,8 * 50 * 0,746/0,939$	= 127,1 MWh
9.	Inversión diferencial	:	2.066 US\$.	
10.	Costo anual del capital ⁴⁴	:	$2.066 * 0,139$	= 287,2 US\$/año.
11a.	Costo de energía ahorrada ⁴⁵ , 6,000 h	:	287,2/9,4 MWh	= 3,06 US\$/kWh
11b.	Costo de energía ahorrada, 4,000 h	:	287,2/6,3 MWh	= 4,46 US\$/kWh

En este caso, la rentabilidad del proyecto sería negativa para 4.000 horas de uso del motor; salvo que se considerara además el cargo por potencia, despreciado en el cálculo. La posibilidad de que el ahorro de potencia pueda ser considerado como un ahorro efectivo dependerá de la viabilidad de cambiar en el contrato el cargo por demanda máxima, lo que sería quizás atractivo si se trata de cambiar un número importante de motores. Por el contrario, si el motor trabaja 6,000 horas/año, el cambio sería rentable.

3.3.2 La eficiencia energética en el cálculo de conductores y cables eléctricos

Con el objeto de ilustrar la aplicación al diseño económico de conductores y cables eléctricos de las metodologías presentadas en la primera sección de este capítulo, se seleccionaron dos ejemplos prácticos, los que se desarrollan a continuación.

a) Alimentador para un Banco Comercial

Los datos básicos del proyecto son:

• Carga máxima:	100 kW	• Conductores por fase:	1
• Voltaje nominal:	380 V	• Largo del conductor:	35 m
• Factor de carga:	0,90	• Temperatura ambiente:	22°C
• Factor de potencia:	0,88	• Canalización:	ducto
• Caída de tensión máxima:	3%	• Precio de la energía:	\$ 39/kWh
• Horas mensuales de trabajo:	480 horas	• Número de conductores canalizados:	3
• Factor de pérdidas:	0,81	• Número de fases:	3
• Corriente máxima:	172 A		

Se seleccionó-en base a los requerimientos técnicos-un conductor 2 AWG THHN, cuya tensión de servicio es 600 V y la temperatura máxima de servicio 90°C (en lugares secos). Para la selección del conductor energéticamente eficiente se evaluaron distintos calibres 2/0, 3/0, 4/0, 250 y 350 AWG.

Para ilustrar la aplicación de la metodología de cálculo del costo de ahorrar electricidad (CAE), se comparó los calibres 2 y 3/0 (cuyos diámetros son: 33,6 y 85,0 mm², respectivamente).

De acuerdo con la sección 3.2.5, la fórmula para la evaluación del costo de ahorrar electricidad es:

$$CAE = [FRC(d,n) * (I_{efic} - I_{est}) + (M_{efic} - M_{est})] / (E_{est} - E_{efic})$$

El proyecto se evaluó para un horizonte de 15 años y una tasa de descuento de 12%, lo que se traduce en un valor de 0,1468 para el factor de recuperación del capital (FRC).

El costo por metro lineal de los cables en consideración era, al momento de la evaluación, de \$1,302 y \$3,245, respectivamente, no se consideran diferencias ni en los sistemas de postación ni en los costos de mantención.

La diferencia de consumo de energía entre la opción mínima y una más eficiente se determina por el monto de las pérdidas en ambos casos.

$$Pérd_2 = 3 * I^2R * H = 3 * (172 * 0,9)^2 * 0,0183 * (35/33,6) * 480 * 12/1,000 = 7.893 \text{ kWh/año}$$

$$Pérd_{3/0} = 3 * I^2R * H = 3 * (172 * 0,9)^2 * 0,0183 * (35/85,0) * 480 * 12/1,000 = 3.120 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Inversión diferencial} = 35 * 3(3.245 - 1.302) = \$ 204,015$$

$$CAE = \$ 0,1468 * 204,015 / (7.893 - 3.120) \text{ kWh/año} = \$ 6,27/\text{kWh}$$

En consecuencia, la selección de un conductor varios calibres mayores es rentable ya que es muy difícil que la tarifa, de \$39/kWh a la época, vaya a disminuir a \$6,3/kWh.

En el cuadro siguiente se presenta el resultado de acuerdo a los otros esquemas de evaluación para un conjunto de calibres.

Cuadro 11				
Evaluación de las distintas alternativas de calibres para el alimentador del Banco				
Calibre AWG	Sección (mm ²)	VAN (\$)	TIR (%)	Período de recuperación del capital (años)
4	21,2	-1,202,826	---	---
2	33,6	0,00	---	---
1	42,4	402,705	160,2	0,69
1/0	53,5	716,396	149,3	0,74
2/0	67,4	953,753	133,9	0,83
3/0	85,0	1,108,096	103,3	1,09
4/0	107,0	1,207,998	83,6	1,37

Como se puede apreciar; dependiendo de los criterios del inversionista, la solución óptima es distinta. En efecto, el máximo valor actualizado neto se obtiene con un calibre AWG 4/0 y la máxima tasa interna de retorno con AWG 1.

Este mismo ejemplo consideró la existencia de armónicas, problema frecuente en una instalación como la considerada, lo que desplazó tanto el calibre mínimo técnico del cable como el óptimo económico, siendo el calibre mínimo técnico 2/0 y el óptimo económico AWG 3/0.

b) Alimentador para un área de una planta de lixiviación

Los datos básicos del proyecto son:

· Carga máxima:	600 kW	· Conductores por fase:	1
· Voltaje nominal:	4,16 KV	· Largo del conductor:	800 m
· Factor de carga:	0,90	· Temperatura ambiente:	22°C
· Factor de potencia:	0,85	· Canalización:	ducto
· Caída de tensión máxima:	3%	· Precio de la energía:	\$ 39/kWh
· Horas mensuales de trabajo:	650 horas	· Número de conductores canalizados:	3
· Factor de pérdidas:	0,81	· Número de fases:	3
· Corriente máxima:	98 A		

Se seleccionó -en base a los requerimientos técnicos- un conductor 6 AWG tipo XT, cuya tensión de servicio es 5 KV la temperatura máxima de servicio 90°C (en lugares secos). Para la selección del conductor energética y económicamente eficiente se evaluaron distintos calibres 4, 2, 1, 1/0, 2/0, 3/0 y 4/0 AWG.

Para ilustrar la aplicación de la metodología de cálculo del costo de ahorrar electricidad (CAE), se comparó los calibres 6 (conductor que satisface los requerimientos técnicos) y 2/0 (cuyos diámetros son: 13,3 y 67,4 mm², respectivamente).

Como en el caso anterior; la fórmula para la evaluación del costo de ahorrar electricidad es:

$$CAE = [FRC(d,n) * (I_{efic} - I_{est}) + (M_{efic} - M_{est})] / (E_{est} - E_{efic})$$

El proyecto se evaluó para un horizonte de 15 años y una tasa de descuento de 12%, lo que se traduce en un valor de 0,1468 para el factor de recuperación del capital (FRC).

El costo por metro lineal de los cables en consideración era, al momento de la evaluación, de \$3.610 y \$6.931, respectivamente, no se consideran diferencias ni en los sistemas de postación ni en los costos de mantención.

La diferencia de consumo de energía entre la opción mínima y una más eficiente se determina por el monto de las pérdidas en ambos casos.

$$Pérd_6 = 3 * I^2R * H = 3 * (98 * 0,9)^2 * 0,0183 * (800/13,6) * 650 * 12/1.000 = 200.375 \text{ kWh/año}$$

$$Pérd_{3/0} = 3 * I^2R * H = 3 * (98 * 0,9)^2 * 0,0183 * (800/67,4) * 650 * 12/1.000 = 39.540 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Inversión diferencial} = 800 * 3(5.781 - 3.610) = \$ 5,210,400$$

$$CAE = \$ 0,1468 * 5.210.400 / (200.375 - 39.540) \text{ kWh/año} = \$ 4,76/\text{kWh}$$

En consecuencia, la selección de un conductor de un calibre sustancialmente mayor que el mínimo recomendado por las normas es rentable, ya que es muy difícil que la tarifa, de \$39/kWh a la época, vaya a disminuir a \$4,76/kWh.

En el cuadro siguiente se presenta el resultado de acuerdo a los otros esquemas de evaluación para un conjunto de calibres.

Cuadro 12
Evaluación de las distintas alternativas para la selección del calibre del alimentador de la planta de lixiviación

Calibre AWG	Seccion (mm ²)	VAN (\$)	TIR (%)	Período de recuperación del capital (años)
4	21,2	19.200.050	350	0,31
2	33,6	30.114.323	201	0,54
1	42,4	33.306.768	150	0,73
1/0	53,5	36.197.646	141	0,79
2/0	67,4	38.477.469	135	0,82
3/0	85,0	38.190.814	93	1,22
4/0	107,0	37.493.126	72	1,61

Como se puede apreciar; dependiendo de los criterios del inversionista, la solución óptima es distinta. En efecto, el máximo valor actualizado neto se obtiene con un calibre AWG 2/0 y la máxima tasa interna de retorno con AWG 4.

3.3.3 Optimización de un sistema de iluminación en una planta industrial

Una planta industrial de 900 m² (15 * 60 m), con una altura de 6 a 7 m y un buen nivel de reflexión de cielos, muros y piso, requiere para la adecuada iluminación de sus actividades de un nivel de iluminación de 1,000 lux sobre el piso⁴⁶. La planta trabaja 20 horas/día, 5 días/semana y 50 semanas/año. El costo medio de la energía eléctrica es de 5US\$¢/kWh.

Las opciones de luminarias a considerar son las siguientes: (1) Sodio de Alta Presión de 400 W, (2) Mercurio de Alta Presión de 1000 W, (3) 2 lámparas fluorescentes de 2,5 m de 215 W y (4) Incandescente de 1.500 W. Para evaluar las opciones se dispone de los datos que se detallan en el cuadro siguiente

Cuadro 13
Datos de base para el cálculo y resultado de la evaluación
del sistema de iluminación más económico.

Características	Na400	Hgl000	FL2*215	In.1500
1. Lúmenes/luminaria	50.000	63.000	29.000	34.400
2. Vida útil (horas)	20.000	24.000	9.000	1.000
3. Watts/lámpara	400	1.000	215	1.500
4. Watts/luminaria (incl. Ballast)	470	1.080	480	1.500
5. Coef. utilización (rend. Fixture)	0,76	0,70	0,70	0,70
6. Factor depreciación lámpara	0,90	0,66	0,70	0,66
7. Factor depreciación por suciedad	0,86	0,83	0,83	0,83
8. Lúmenes efectivos/luminaria (1 * 5 * 6 * 7)	29.412	24.158	11.794	13.191
9. Lux requeridos (lúmenes/m ²)	1,000	1,000	1,000	1,000
10. Lúmenes requeridos totales (9 * área)	900.000	900.000	900.000	900.000
11. Luminarias totales (10/8)	31	38	77	69
12. Potencia total (kW) (11 * 4)	14,4	40,2	36,6	102,3
13. Costo neto luminaria US\$	190	175	68	30
14. Costo cableado luminaria US\$	24	55	25	55
15. Instal. mano de obra US\$	14	14	17	14
16. Costo neto lamp/lum al por mayor	45	20	11	6
17. Costo capital total US\$(13+14+15+16) * 11	8.354	9.835	9.233	7.164
18. Número de lámp. a reempl./año (horas de uso * 11 * número de lámp)/2	8	8	85	341
19. Mano de Obra reempl. lámpara US\$/lámp	3,8	3,8	3,8	3,8
20. Costo reemplazo lámparas (18 * [16+19])	373	185	1.255	3.343
21. Costo anual capital (0,15 * 17)	1.253	1.475	1.385	1.075
22. Costo energía total (12 * horas de uso * 0,05)	3.595	10.059	9.157	25.586
23. Costo O&M anual (22+20)	3.969	10.244	10.412	28.929
24. Costo Total anual (23+21)	5.222	11.719	11.797	30.003

Nota: (1) Los datos en cursiva corresponden a la información que normalmente se dispone y en negrita aquellos resultantes de la evaluación.

(2) Los números entre parentesis corresponden a la línea que define el ítem que interviene en el cálculo, salvo en el caso de la cifra 1,000 utilizada para convertir watts- horas en kilo watts-horas y 0,05 US\$/kWh que corresponde a la tarifa supuesta para el ejemplo.

(3) Los costos utilizados en el ejemplo no corresponden necesariamente a los existentes en Chile y han sido elegidos como referencia para ilustrar el ejemplo.

[46] Se supone una planta en que el aporte de la iluminación natural es insignificante o inexistente.

A continuación se incluyen algunas definiciones de los términos usados en el ejemplo:

- Coeficiente de utilización: indica los lúmenes efectivos que proporciona la luminaria (considera la proporción de luz que ésta absorbe)
- Factor de depreciación: indica el nivel medio de iluminación que la luminaria durante su vida útil
- Factor de depreciación por suciedad: indica el deterioro de la iluminación que entrega la luminaria durante su vida útil, por concepto de adherencia de polvo.

El ejemplo presentado más arriba permite ilustrar la importancia de considerar el ciclo de vida de los equipos y no sólo el costo inicial. El caso extremo es el de las lámparas incandescentes las que tienen un costo de inversión claramente inferior a las otras opciones, sin embargo su costo anual total es casi 6 veces mayor que el de las lámparas de Na de alta presión. La desventaja de la lámpara incandescente proviene fundamentalmente de sus mayores consumos de energía para un igual nivel de iluminación y también de los mayores costos de reemplazo (mantenimiento) debido, en parte importante, a la mano de obra empleada en dicho reemplazo.

Incluso, las lámparas de mercurio y las fluorescentes que tienen los costos de capital más elevados, presentan un costo total significativamente inferior al de las lámparas incandescentes.

4. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA SELECCIONAR ENERGÉTICA Y ECONOMICAMENTE CONDUCTORES Y MOTORES ELÉCTRICOS

PROCOBRE Chile, con el respaldo técnico del PRIEN, elaboró las herramientas computacionales EVALSEL 2.1 y EVAMOTOR 1.0, destinadas a facilitar la tarea de los proyectistas en la selección de conductores, cables y motores eléctricos que, conjuntamente con mejorar la eficiencia eléctrica del sistema en que se instalan estos componentes, permitan optimizar los costos de operación.

Conviene reiterar que estos programas han sido concebidos como una ayuda para facilitar la selección de los cables o de los motores eléctricos desde una perspectiva de eficiencia energética; vale decir ellos no reemplazan al proyectista quien continúa siendo responsable de los criterios técnicos que determinan los tipos de alternativas considerar y en qué rangos es válida la evaluación de dichas alternativas. Los programas no discriminan respecto de los requerimientos a satisfacer, los fabricantes y modelos a incorporar en la evaluación, los niveles de voltaje de distribución, los niveles de aislación y tipo de canalización de los conductores y cables, etc.

4.1 Características principales del programa Evalsel 2.1

4.1.1 Descripción general

EVALSEL 2.1 es una herramienta computacional destinada a apoyar el dimensionamiento y selección de conductores eléctricos, incorporando explícitamente el criterio de eficiencia energética, la economía en la operación del sistema diseñado, la seguridad y la calidad de servicio.

De esta forma, se considera como variable física las pérdidas involucradas en la conducción eléctrica, es decir, aquellas derivadas de la resistencia óhmica del conductor al paso de la corriente. Así, es posible determinar un costo económico asociado a estas pérdidas, el que se hace efectivo en un mayor pago por consumo de energía eléctrica. Como la resistencia es menor mientras mayor es la sección del conductor, un aumento de dicha sección reduce las pérdidas calóricas, al tiempo que hace subir su precio.

De este modo, el enfoque utilizado incorpora la variable temporal en la elección de la sección de cables eléctricos, considerando el ahorro económico debido a la reducción de pérdidas energéticas involucrado en la elección de una mayor sección, confrontado en un horizonte de tiempo definido, con el costo que representa dicho aumento.

Este instrumento permite a ingenieros y técnicos proyectistas escoger adecuadamente la sección del conductor a utilizar en un proyecto de instalación determinado, según parámetros de evaluación técnico-económicos definidos por el propio usuario. Eso contribuye a reducir la factura eléctrica del usuario, así como disminuir los riesgos debido a un inadecuado dimensionamiento de las instalaciones.

4.1.2. Características del programa

Algunas características del software son las siguientes:

- Permite crear y mantener proyectos, los que son divididos en alimentadores. Cada proyecto guarda algunos datos como el nombre del proyectista, ubicación, etc. Cada alimentador contiene las condiciones de operación y de instalación, los datos del conductor seleccionado, etc.
- Permite crear y mantener bases de datos de conductores, las que son organizadas en archivos separados, de manera de representar por ejemplo, distintos fabricantes. Estos archivos pueden ser guardados o manipulados en cualquier unidad o directorio del computador.
- Permite evaluar uno o varios alimentadores de un mismo proyecto. Si sólo se escoge un alimentador; los datos son más detallados. Si se eligen varios alimentadores se evalúan todos ellos, y se realiza una evaluación global.
- Permite exportar los resultados a planillas electrónicas en formato DIF.
- Incluye, a manera de apoyo, la información contenida en catálogos de varios fabricantes latinoamericanos de conductores.
- El programa es válido en América Latina, ya que permite especificar la moneda a usar; la unidad de temperatura y la frecuencia de la red.

4.1.3 Bases matemáticas del programa

a) Criterio tradicional

Tradicionalmente se utiliza el criterio de minimizar el costo en la compra de los conductores eléctricos. Esto se logra escogiendo el conductor de menor sección que permite resistir las condiciones extremas esperadas, es decir; cuya corriente máxima admisible, I_{\max} , supera la corriente máxima del proyecto, I_p . También se considera como exigencia un máximo de caída de tensión en el extremo de la carga.

Ambos requerimientos determinan la existencia de una sección mínima, S_{\min} , impuesta por las condiciones de carga y de caída de tensión máximas y por las características del conductor y tipo de canalización.

b) Criterio de eficiencia energética

La sección del conductor incide directamente en las pérdidas de energía y en el costo del mismo. Es posible obtener una sección óptima la que, al aumentar los ahorros por pérdidas de energía, compensa los costos asociados al aumento de la sección. Para los fines de eficiencia energética, lo que se debe evaluar es la conveniencia de usar una sección mayor que S_{\min} y, si es así, cuántos valores estándares mayor que el mínimo.

c) Expresiones algebraicas

A continuación se reiteran algunos de los conceptos presentados en el Capítulo II y que tienen que ver con la formalización algebraica de la valoración económica de las pérdidas asociadas a la conducción eléctrica y del ahorro por aumento de sección del conductor; utilizadas en el programa. Básicamente, las pérdidas energéticas por unidad de longitud del conductor eléctrico pueden ser expresadas en la siguiente fórmula:

$$\text{Perd}_{\text{ener}} = R(s) \cdot I^2$$

en donde: $R(s)$: resistencia del conductor por unidad de longitud
 I : corriente media del circuito

Descomponiendo estas variables en otras más básicas, manejables o conocidas por el proyectista, e incorporando la valoración y actualización económica de la energía, se han desarrollado las expresiones necesarias. Hay que notar que tanto la expresión de las pérdidas como la del ahorro consideran la tasa de descuento, por lo que sus valores son actualizados.

La resistividad del conductor no ha sido incorporada en el software como una variable, pues se ha supuesto que el metal utilizado es cobre. También han sido omitidas, en la determinación de la resistencia del conductor en corriente alterna, otras variables de poca relevancia para los objetivos y resultados de este programa, tales como: el diámetro exterior y la separación de los centros de los conductores y la temperatura de operación.

Por otro lado, se obtiene que el costo del conductor es una función aproximadamente lineal de la sección,

$$C(s) = k \cdot S$$

d) Interpretación gráfica

La figura siguiente muestra simultáneamente las funciones de la sección del conductor descritas anteriormente: la valoración económica de las pérdidas resistivas $Perd(s)$ (inversamente proporcional a la sección del conductor) y el costo del conductor $C(s)$ (proporcional a la sección); y la sección mínima aceptable S_{min} .

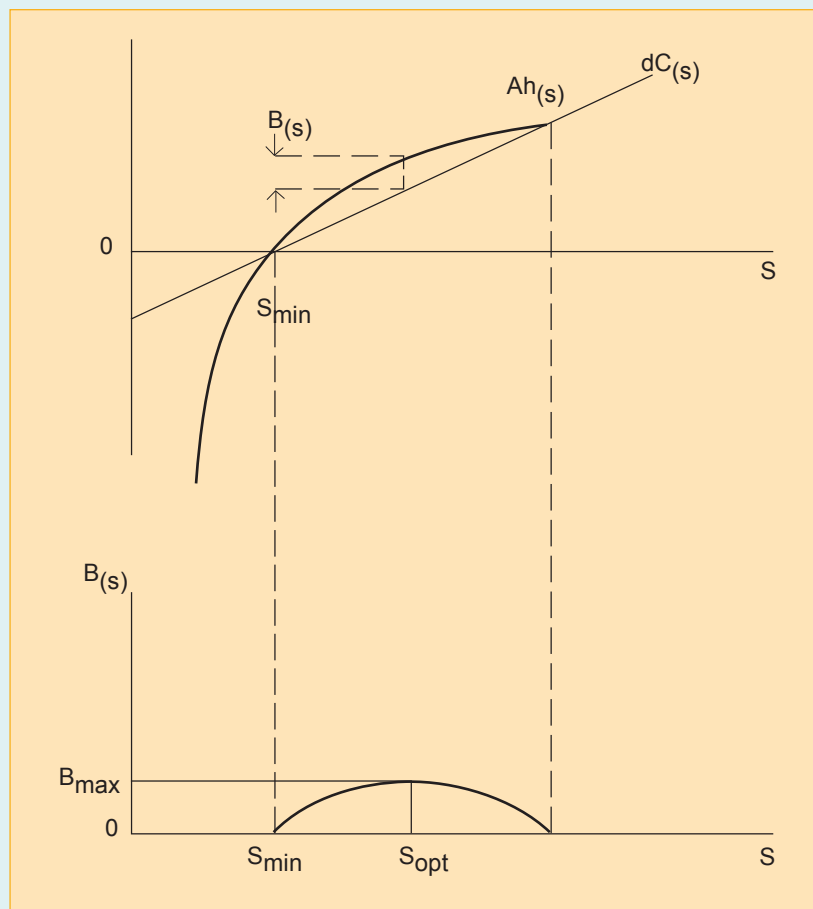


Figura 3
Representación gráfica del criterio utilizado

Se debe determinar para qué sección es mayor el beneficio (B) expresado como la diferencia entre el ahorro de pérdidas (Ah) y el aumento de costo (dC):

$$B(s) = Ah(s) - dC(s),$$

donde $Ah(s) = P_0 - Perd(s)$ y $dC(s) = C(s) - C_0$

Estas nuevas funciones se expresan gráficamente en la siguiente figura, en la que se observa que existe una sección óptima para el conductor (s_{opt}), superior a la sección mínima, que reporta un beneficio máximo al usuario.

e) Selección de la sección del conductor

El criterio de selección indica que, para una tasa de descuento y horizonte de estudio predeterminados, se debe escoger aquella sección, mayor o igual a la mínima, que maximiza el beneficio y, además, cuyos tiempos de recuperación de capital (TRC) y tasa interna de retorno (TIR) están dentro de rangos considerados aceptables por el usuario⁴⁷.

Para cada proyecto se especifica el tipo de conductor y el tipo de canalización, convirtiéndose en parámetros fijos para todos los cálculos relacionados con los proyectos asociados. Independientemente del número de proyectos a evaluar; se le debe calcular a cada uno de ellos los valores siguientes:

- Corriente máxima por cada conductor (I_p)
- Cálculo de las pérdidas Joule
- Cálculo de corrientes de armónicas
- Cálculo de la corriente total RMS
- Cálculo económico de las pérdidas

En términos generales el programa considera las siguientes condiciones técnicas para la selección óptima del conductor:

- La corriente económica óptima debe ser mayor que la mínima técnica de operación
- La caída de tensión calculada debe ser menor que la caída máxima de tensión admisible
- El voltaje nominal del consumo debe ser menor que la tensión de servicio del conductor

4.2 Características generales de Evamotor 1.0

4.2.1 Introducción

EVAMOTOR 1.0 es un software que está destinado a facilitar la gestión del parque de motores de una planta industrial (nueva o existente), y a seleccionar técnica y económicamente los motores requeridos en proyectos nuevos, en ampliaciones de instalaciones existentes y en la sustitución de motores antiguos, que en adelante se denominarán obsoletos, incorporando el criterio de eficiencia energética.

La aplicación está orientada a motores del tipo trifásicos, inducción «Jaula de Ardilla», baja y media tensión y de una velocidad.

EVAMOTOR 1.0 evalúa los beneficios económicos, en el corto y mediano plazo, vinculados a una adecuada elección o sustitución de un motor. Para este cálculo se toman en cuenta factores tales como los precios relativos de los motores comparados, las eficiencias relativas, el precio de la energía y potencia, y además, se consideran las condiciones de operación a las que se encuentran sometidos los motores como son su factor de carga, horas de uso mensual, calidad de la red (regulación y desbalances de voltajes y/o corrientes), condiciones ambientales (temperatura ambiente de operación, altitud de la faena) y la historia de reparaciones (en el caso de motores obsoletos).

Los antecedentes asociados a la operación del motor son necesarios para la determinación efectiva del rendimiento de dicho motor; de modo de realizar una correcta determinación de los beneficios económicos asociados a la selección o sustitución de motores.

Esta herramienta permite a ingenieros y técnicos proyectistas escoger adecuadamente el motor a utilizar en un proyecto determinado, según parámetros de evaluación técnica y económica definidos por el propio usuario. Este software es complementario al programa EVALSEL 2.1.

[47] El TRC y la TIR fueron definidos en el capítulo III.

En resumen, EVAMOTOR 1.0 permite:

- Analizar económicamente las diferentes opciones que enfrentan los usuarios al momento de elegir motores o sustituir motores obsoletos.
- Construir catastros de motores de plantas nuevas o existentes.
- Introducir catálogos de motores de proveedores.

4.2.2 Secuencia de operación de EVAMOTOR 1.0

El software EVAMOTOR 1.0 requiere para su operación dos elementos imprescindibles: un catastro de motores y una o más base de fabricantes de motores.

El software provee -a modo de ejemplo- tres bases de datos de fabricantes (WEG, SIEMENS Y RELIANCE); y posee la opción de ingresar otras bases por parte del usuario.

La operación del software se divide en dos partes:

- creación de catastros de motores
- evaluación económica

4.2.3 Fórmulas matemáticas de EVAMOTOR 1.0

El programa utiliza las siguientes fórmulas para la evaluación económica comparativa entre un motor patrón y los motores alternativos eficientes.

- VAN del análisis

Para la determinación del VAN de la comparación entre un motor patrón y uno alternativo, se considera que el ahorro producido por el menor consumo de energía del motor alternativo durante el primer año, es constante durante el horizonte de evaluación. Luego el VAN se calcula como sigue.

$$VAN = A_1 \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^N - 1}{\frac{r}{100} * \left(1 + \frac{r}{100}\right)^N} - \Delta I$$

Donde:

- A_1 : Corresponde al ahorro anual en el primer año.
- N : Corresponde al horizonte de evaluación. La variable corresponde al número de años del horizonte de evaluación.
- r : Corresponde a la tasa de descuento impuesta al proyecto
- ΔI : Corresponde a la inversión diferencial. En el caso de motores obsoletos, la inversión diferencial es la diferencia entre el precio del motor alternativo y el costo evitado de reparación del motor patrón. En el caso de comparar dos motores nuevos, la inversión diferencial corresponde a la diferencia de precio entre ambos motores (en este caso no existe costo evitado de reparación).

- Ahorro en el primer año (A_1):

Se refiere al ahorro que se logra en el primer año, por concepto de menor energía consumida, al sustituir el motor actual por uno nuevo de mayor rendimiento. Se puede evaluar como:

$$A_1 = 12 * 0,746 * \$_E * T * \frac{fc^1 * Pn^1}{\eta_a} - \frac{fc^2 * Pn^2}{\eta_a} + \$_P * \frac{Pn^1}{\eta_a} - \frac{Pn^2}{\eta_a}$$

donde:

- A_1 : Ahorro del primer año (\$).
- $\$P$: Costo de la potencia en el año presente (\$/kW).
- $\$E$: Costo de la energía en el año presente (\$/kWh).
- $fc^1 y fc^2$: Factor de carga del motor patrón y motor alternativo respectivamente (0/1).
- Pn^1, Pn^2 : Potencia nominal del motor patrón y alternativo (HP).
- 0,746 : Factor de conversión de unidades (HP – kW).
- T : Horas de uso del motor en el mes.
- η_a : Rendimiento del motor patrón (0/1). Corresponde al rendimiento de placa original del motor η_0 , modificado según las condiciones de operación y la historia de reparaciones del motor.
- η_{ef} : Rendimiento del motor alternativo (eficiente) (0/1). Corresponde al valor de placa $\eta_{ef,n}$, modificado según las condiciones de operación.

- Evaluación de rendimientos

Para determinar el «Ahorro en el primer año (A_1)» se debe conocer los valores de los rendimientos. Estos valores corresponden a los valores de eficiencia nominales (a 100% de carga) corregidos por las condiciones de operación de cada motor. Las correcciones, realizadas por el software, suponen que los efectos son independientes.

El rendimiento actual de un motor puede diferir de su rendimiento original nominal por diversas causas que se pueden agrupar como sigue:

- a) Condiciones electromecánicas de operación diferentes a las nominales
- b) Condiciones ambientales diferentes de las nominales
- c) Estado deficiente del motor (por reparaciones)

Así, el rendimiento actual del motor (sea éste el «motor patrón» o el (o los) «motor(es) alternativo(s)»), corresponde al rendimiento de placa sujeto a correcciones, las que quedan representadas en la siguiente expresión:

$$\eta I = K_v * K_f * K_d * K_c * K_t * K_a * K_r * \eta_0$$

Siendo:

ηI = Rendimiento del motor corregido.

η_0 = Rendimiento de placa del motor a 100% de carga.

La expresión anterior considera que la eficiencia original del motor se modifica debido a las circunstancias siguientes:

- trabajar con voltaje diferente al nominal (K_v y $K'v$)
- trabajar con frecuencia diferente a la nominal (K_f y $K'f$)
- trabajar con voltaje y/o corrientes desequilibradas (K_d y $K'd$).
- trabajar con carga diferente a la nominal (K_c y $K'c$)
- trabajar a distintas temperaturas ambiente (K_t y $K't$)
- trabajar en distintas alturas sobre el nivel del mar (K_a y $K'a$)
- reparaciones (rebobinados) en la vida del motor (K_r y $K'r$)

El Centro de Promoción de Usos del Cobre, **PROCOBRE**, es una organización de derecho privado sin fines de lucro. Es patrocinado por los productores y fabricantes de cobre y su misión es promover el uso del cobre y sus aleaciones, especialmente en Chile y en Latinoamérica, fomentando una disposición favorable hacia su utilización e impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

PROCOBRE colabora y trabaja en forma coordinada con las empresas, el gobierno y los organismos relacionados con el cobre para materializar una acción convergente, con visión de largo plazo a nivel mundial.

En el cumplimiento de sus fines, **PROCOBRE** colabora con la edición del presente texto como un apoyo para la correcta manipulación de los productos de cobre.

EL COBRE ES ETERNO



Colombia: E-mail: colombia@copper.org <http://www.procobrecolombia.org>
Venezuela: E-mail: venezuela@copper.org <http://www.procobrevenezuela.org>
Ecuador: E-mail: ecuador@copper.org <http://www.procobreecuador.org>
Bolivia: E-mail: bolivia@copper.org <http://www.procobrebolivia.org>
Coordinación Perú: E-mail: peru@copper.org <http://www.procobreperu.org>
Dirección: Francisco Graña N° 671, Magdalena del Mar, Lima 17 - Perú.
Teléfonos: (51-1) 460-1600, Anexo 229. 261-4067 / 261-5931 / 461-1826
Fax: (51-1) 460-1616