APLICAÇÃO DO MÉTODO PROMETHEE NA SELEÇÃO DE MOTORES INDUSTRIAIS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Antonio Vanderley Herrero Sola
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Av. Monteiro Lobato, Km 04, Ponta Grossa, Paraná
sola@utfpr.edu.br

Caroline Maria de Miranda Mota
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Cx. postal 7462, CEP 50-630-970, Recife, Pernambuco
carolmm@ufpe.br

RESUMO

Os métodos multicritérios têm sido utilizados em diversas áreas, mas ainda existe um grande potencial para aplicação no setor industrial, principalmente em sistemas motrizes. Este artigo apresenta uma análise multicritério com o objetivo de apoio à decisão para a seleção de motores elétricos com alto impacto na produção e também com potencial para melhoria da eficiência energética. Após a identificação dos critérios de decisão e da coleta dos dados pelos setores da empresa, o método PROMETHEE II é usado para priorizar os motores de acordo com o potencial de substituição, considerando fatores tais como características dos motores, operação, manutenção, produção e financeiro. O estudo mostra que a priorização recomendada é diretamente proporcional à economia de energia. O artigo apresenta uma análise dos resultados ao final.

PALAVARAS CHAVE: Análise multicritério. Apoio à decisão. Eficiência energética.

Outras aplicações – Engenharia e Manufatura

ABSTRACT

The multicriteria methods have been applied in many areas, but still there is a huge potential for application in industrial sector, mainly in motor systems. This paper presents a multicriteria analysis aiming at the decision aiding for selection of electric motors with high impact on production and also with potential for improving the energy efficiency. After the identification of decision criteria and the collecting data by the firm's sectors, the PROMETHEE II method is used for prioritizing motors according to potential of replacement, considering factors such as characteristics of motors, operation, maintenance, production and finance. The study shows that the recommended prioritization is directly proportional to energy saving. The paper presents an analysis of the results at the end.

KEYWORDS: Multicriteria analysis. Decision aiding. Energy efficiency.

Other applications – Engineering and Manufacturing

RED-M

1. Introdução

Em áreas complexas como energia e sustentabilidade, com múltiplos critérios, alguns deles conflitantes entre si, os métodos multicritérios são ferramentas importantes que fornecem as informações necessárias para a tomada de decisão (LOKEN, 2007; POHEKAR e RAMACHANDRAN, 2004; WANG JJ *et al*, 2009). Apesar da ampla aplicação em diversas áreas, os métodos multicritérios de apoio à decisão têm um grande potencial de exploração no setor industrial, principalmente em sistemas motrizes.

Nas indústrias os motores elétricos são utilizados em diversas aplicações do processo produtivo, como acionamento de ventiladores, esteiras, bombas e outros processos (MCKANE *et al*, 2007). Em virtude da diversidade de processos, uma indústria pode ter dezenas ou centenas de motores elétricos, de diversas potências, idades e modos de usos diferentes, cada um com impacto diferente na produção e com potencial distinto de melhoria de eficiência energética. O problema de decisão de ordenação das tecnologias a serem substituídas envolve múltiplos critérios, tanto técnicos como financeiros (LUNG *et al*, 2005; MCCOY e DOUGLASS, 2000; MARQUES *et al*, 2006).

O artigo aplica um modelo multicritério utilizando o método PROMETHEE (BRANS e MARESCHAL, 2005) para fazer uma análise das tecnologias a serem substituídas com objetivo de melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais. Os métodos da família PROMETHEE têm sido utilizados em diversas áreas, tais como social, energia, meio ambiente, hidrologia, financeira, química, manufatura, logística e transporte (BEHZADIAN *et tal,* 2010). Especificamente na área energética, os seguintes trabalhos têm sido publicados em periódicos indexados:

- Pohekar e Ramachandran (2004) destacam o uso do método PROMETHEE II em projetos e análise de impactos de energias alternativas.
- Com o objetivo de fazer uma ordenação dos cenários para expansão do sistema elétrico na Grécia, Diakoulaki e Karangelis (2007) utilizam o método PROMETHEE II. Os autores escolheram o método pela simplicidade e capacidade de aproximar o modo de expressar da mente humana para sintetizar as preferências, diante das múltiplas e contraditórias perspectivas de decisão. A robustez dos resultados é verificada pela análise de sensibilidade.
- Visando à priorização de tecnologias sustentáveis para geração de eletricidade na Grécia, o método PROMETHEE II também foi escolhido pela simplicidade do uso e baixa complexidade (DOUKAS *et al*, 2006). As incertezas são tratadas pela definição de cenários pessimista, otimista e instável para o planejamento energético.
- O método PROMETHEE II é utilizado por Haralambopoulos e Polatidis (2003) para fazer um ranking de alternativas de projetos de energia renováveis na Grécia, utilizando análise de sensibilidade para medir divergências entre as preferências dos *stakeholders.*
- Em um estudo de caso para avaliação de cenários de energias renováveis, Hyde (2003) ilustra a incorporação de incertezas no método PROMETHEE. As incertezas são tratadas utilizando distribuição de probabilidades e uma análise da robustez da solução é disponibilizada ao decisor.
- Uma avaliação de alternativas para novos sistemas de energia na Tailândia é feita a partir da aplicação do método PROMETHEE, onde Tzeng *et al* (1992) abordam aspectos tecnológicos, impactos ambientais, fatores econômicos e direções estratégicas.

Para cumprir o objetivo proposto, este artigo é apresentado em cinco seções, incluindo a introdução. Na seção 2 é feita uma breve explanação sobre os sistemas motrizes industriais. Na seção 3 é apresentada a modelagem do problema de decisão. Na seção 4 são apresentados os resultados da aplicação na indústria, com as análises pertinentes. Por último, na seção 5, são feitas as considerações finais.

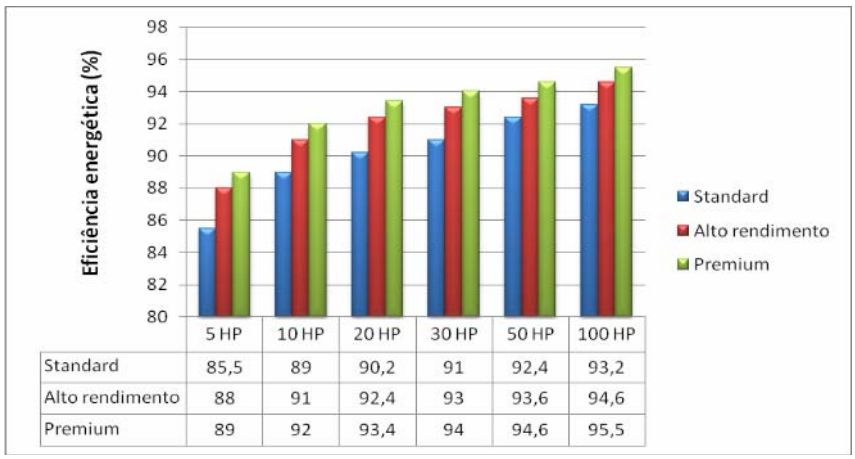
2. Sistemas motrizes industriais

A energia no setor produtivo é demandada pelos diversos usos finais: força motriz; calor de processo; aquecimento direto; refrigeração e ar condicionado; iluminação; eletroquímica (MME, 2005). Nas indústrias, que consomem boa parte da energia disponibilizada, a força motriz é responsável pelo consumo da maior parte da energia elétrica e apresenta grande potencial de melhoria da eficiência energética (ANDERSON e NEWELL, 2004; MCKANE *et al*, 2007; MECROW e JACK, 2008; YANTI e MAHLIA, 2009).

Um dos fatores de perda de energia é a tecnologia obsoleta. A substituição de motores antigos por motores de alta eficiência pode resultar em rápido retorno de investimento e isso pode tornar-se um atrativo para as empresas, mas projetos nesse sentido precisam de um diagnóstico consistente (SAIDEL *et al*, 2010). No setor industrial brasileiro, o potencial de economia de energia elétrica está fortemente concentrado em sistemas motrizes (CNI, 2009).

O conceito de eficiência energética encontrado na literatura (MCKANE et al, 2007; OIKONOMOU *et al*, 2009; SOLA e XAVIER, 2007) é relativo, uma vez que só é possível dizer que um produto ou processo é energeticamente eficiente comparando-o com uma norma ou referência. A eficiência dos sistemas motrizes que operam nas indústrias pode ser comparada com a eficiência das tecnologias disponíveis no mercado, que estão em constante evolução e seguem a legislação e as normas técnicas vigentes.

No Brasil, a fabricação e comercialização de motores tipo *standard* com potência igual ou superior a 1 CV (ou HP) está proibida desde 2010. Atualmente o mercado brasileiro oferece motores *standard* (classe IE1) com potência menor que 1 CV, motores de alta eficiência ou alto rendimento (classe IE2) para atender à Portaria nº 553 da Lei de eficiência energética nº 10.295 e à norma ABNT NBR 17094 e também disponibilizam uma linha chamada *Premium* (classe IE3) com maior nível de eficiência (WEG, 2011). A melhoria nos níveis de eficiência dos motores se deve aos materiais e técnicas construtivas empregadas na fabricação (SAIDEL *et al*, 2010). Uma nova classe de motores (IE4), denominada de *Super Premium Efficiency* está sendo cogitada e trará níveis de eficiência energética maiores, mas ainda depende de estudos e de uma norma específica (ALMEIDA *et al*, 2009). Pela Figura 2, que mostra as eficiências de alguns motores dos tipos *Standard*, *Alto rendimento* e *Premium*, é possível perceber um aumento significativo da eficiência energética dos motores tipo *Standard* para o *Premium*, principalmente em potências menores.



	5 HP	10 HP	20 HP	30 HP	50 HP	100 HP
Standard	85,5	89	90,2	91	92,4	93,2
Alto rendimento	88	91	92,4	93	93,6	94,6
Premium	89	92	93,4	94	94,6	95,5

Figura 1 – Eficiências de motores de indução, 4 pólos
Fonte: Dados disponíveis em www.weg.net

3. O modelo de decisão

O modelo de decisão adotado para seleção de motores a serem substituídos, conforme descrito a seguir, é desenvolvido de acordo com as fases: modelagem, levantamento dos dados, ordenação, recomendação ao decisor.

3.2 Modelagem

A modelagem do problema de decisão é um processo construtivo, auxiliado por um analista (ROY, 1996) com interação entre os setores da empresa, para a definição, por meio de consenso, dos critérios, dos pesos, da função preferência e dos *threshold*.

3.1 Levantamentos dos dados

São levantados na planta industrial os dados de acordo com os critérios definidos. Especificamente com relação aos dados técnicos do sistema motriz, os seguintes passos são seguidos para cada motor a ser avaliado:

- Identificação dos dados nominais e do tempo anual de operação em horas;
- Medição da Potência trifásica e da corrente média entre as fases;
- Determinação do carregamento e da eficiência energética (ou rendimento).

Para se determinar a eficiência do motor em operação, bem como a quantidade e o valor economizado de energia, é necessário antes estimar o carregamento, que pode ser feito por um dos métodos indicados na literatura (GARCIA, 2003; MCCOY e DOUGLASS, 2000). A eficiência real do motor em operação (η_R) é definida como a relação entre a potência de saída e a potência de entrada (KOSOW, 1986) e é determinada considerando a potência nominal do motor em *Horse-Power* (P_{HP}), com 1HP=746 *Watts*, a potência real medida em *Watt* (P_R) e o carregamento percentual estimado (γ), conforme a Equação 1. A eficiência em função do carregamento também pode ser determinada a partir da curva de performance do motor fornecida pelo fabricante.

$$\eta_R = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{746 \cdot P_{HP} \cdot \gamma}{P_R} \quad [\%] \tag{1}$$

Considerando o tempo de operação do motor (t) em horas por ano, a eficiência real do motor em operação (η_R) e o novo motor com alta eficiência (η_A), a Quantidade Economizada de Energia (*QEE*) é dada pela Equação 2 e o Valor Economizado de Energia (*VEE*), para uma tarifa (T) em valor monetário por quilowatt-hora, dado pela Equação 3.

$$QEE = 0{,}746 \cdot P_{HP} \cdot \gamma \cdot t \cdot \left(\frac{1}{\eta_R} - \frac{1}{\eta_A} \right) \quad [kWh/ano] \tag{2}$$

$$VEE = QEE \cdot T \quad [R\$/ano] \tag{3}$$

3.3 Ordenação

Para a ordenação completa é utilizado o método PROMETHEE II (BRANS e MARESCHAL, 2005). Considerando $g_j(a)$ o valor da ação a e $g_j(b)$ o valor da ação b para o critério j, o desvio d é a diferença entre os valores das duas ações, dado por: $d(a,b) = g_j(a) - g_j(b)$. A função preferência é definida como uma função do desvio e, conforme proposição dos autores do método, pode ser: Usual, U-Shape, V-Shape, V-Shape com indiferença, Nível e Gaussiana. O limite de indiferença q é o maior valor do desvio $d(a,b)$ abaixo do qual há uma indiferença do decisor. O limite de preferência p é o menor valor para $d(a,b)$ acima do qual há uma preferência estrita do decisor.

Sejam a e b duas ações pertencentes a um conjunto de ações A; P a função preferência; w o peso para cada critério j. O índice de agregação de preferência é dado pela Equação 4.

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^{k} P_j(a,b) \cdot w_j \tag{4}$$

Considerando n ações, o fluxo de sobreclassificação positivo indica quanto a ação a sobreclassifica todas as outras ações x e é expressa pela Equação 5. O fluxo de sobreclassificação negativo indica quanto a ação a é sobreclassificada por todas as outras e é expressa pela Equação 6.

$$\phi^{+}(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \in A} \pi(a,x) \tag{5}$$

$$\phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \in A} \pi(x,a) \tag{6}$$

O plano GAIA é uma ferramenta proposta pelos autores do método e é utilizada para verificar o nível de preferência entre os critérios e a qualidade das alternativas. Também é feita uma análise de sensibilidade para verificação da estabilidade da ordenação, a partir da variação dos pesos dos critérios.

3.4 Recomendação ao decisor

A recomendação final deve traduzir a linguagem formal da decisão para a linguagem corrente do decisor visando à tomada de decisão. O modelo do processo de decisão também pode incluir uma etapa de revisão, na qual podem ser verificados possíveis conflitos com as preferências do decisor (TSOUKIÀS, 2007).

4. Resultados e discussões

4.1 Características da indústria

A indústria estudada está localizada na cidade de Ponta Grossa, Paraná, é do ramo químico e é alimentada com tensão de 380 volts. A potência média consumida pelo sistema motriz é de 150 kW, que representa aproximadamente 80% da demanda total consumida. O desbalanceamento de tensão, que indica a diferença entre as tensões nas três fases da rede, apresenta uma variação em torno de 2%, bem abaixo do máximo recomendado (10%) para evitar perdas elétricas e outros problemas operacionais (NEMA, 2002). Análise de harmônicos na rede, outra possível causa de perda de energia, não está contemplada neste estudo.

4.2 A modelagem

O analista se reuniu com os setores da empresa – engenharia, manutenção, produção e financeiro – para definição, de forma consensual, dos critérios, dos pesos e dos *threshold* (Tabela 1). A equipe entendeu que o critério 'potência do motor' é o mais importante para a produção, uma vez que os motores maiores estão em processos estratégicos, sendo atribuído a esse critério (C1) o peso igual a 100. Comparativamente, os pesos foram atribuídos aos demais critérios, de acordo com o nível de preferência: C2=80; C3=60; C4=50; C5=50; C6=40; C7=20.

Tabela 1 – parâmetros

Critérios	Função prefer.	Pesos normal.	*Threshold* preferência (p)	*Threshold* indiferença (q)	Min ou Max
C1 – Potência	V-Shape	0,250	45	0	Max
C2 – Importância p/ prod.	Linear	0,200	5	1	Max
C3 – Nº rebobinamentos	V-Shape	0,150	5	0	Max
C4 – Nº falhas por ano	V-Shape	0,125	1	0	Max
C5 – Valor Presente Líquido	Usual	0,125	-	-	Max
C6 – Carregamento	Linear	0,100	75	5	Min
C7 – Idade	Linear	0,050	10	1	Max

Fonte: Elaboração própria

4.3 O levantamento dos dados

A avaliação da eficiência energética industrial depende da confiabilidade dos dados. Nesse sentido, a precisão das medições é fundamental para reduzir as incertezas aumentando a confiabilidade do projeto (MCCOY e DOUGLASS, 2000; SAIDEL *et al*, 2010). Para o estudo foram utilizados vinte motores com potência igual ou superior a 5 HP, que trabalham 8640 horas/ano. Os dados nominais de velocidade (*rpm*), corrente a vazio (*Io*), corrente nominal (I_N) e a eficiência (η_R) são fornecidos pelo fabricante dos motores. Em cada motor foi feita a medição da corrente elétrica real (I_R) e da potência real consumida (P_R) com instrumento de boa precisão. Foram obtidos também valores de investimento em motores com eficiência *Premium* (η_A). Os dados estão na Tabela 2. As eficiências dos motores não são nominais e variam com a curva em função do carregamento dos motores (ver curvas de motores em: www.weg.net).

Tabela 2 – Dados dos motores elétricos

	Valores nominais				Valores reais medidos		Motores *Premium*	
Motor	Veloc. (rpm)	I_o (A)	I_N (A)	η_R (%)	I_R (A)	P_R (W)	η_A (%)	Investim. (R$)
M1	3480	7,0	16,0	77,0	8,4	2131	80,0	1870
M2	3520	8,4	21,4	87,8	17,5	10068	91,5	2100
M3	1760	8,4	18,5	84,0	9,6	1887	84,9	1900
M4	1760	8,4	18,5	84,0	8,4	2220	86,0	1900
M5	3550	24,3	69,5	92,2	59,0	33983	94,0	7050
M6	1720	5,8	11,7	82,0	7,4	2320	87,5	1580
M7	1765	12,2	30,9	90,2	26,5	13729	93,4	2640
M8	1740	6,0	11,6	90,0	11,4	6092	91,0	1580
M9	3485	2,9	7,4	75,0	2,9	995	77,0	1220
M10	3500	4,4	10,7	76,0	5,0	1767	80,0	1530
M11	1760	8,4	18,5	85,0	8,5	3291	86,0	1900
M12	3530	7,0	14,7	75,0	7,9	1691	76,0	1870
M13	3530	17,4	41,7	90,2	27,0	12406	92,4	4100
M14	1770	20,8	57,6	91,7	60,0	33843	94,4	5540
M15	1765	8,1	15,0	83,0	9,9	2876	87,0	1790
M16	3500	4,4	11,1	86,0	8,6	4684	88,0	1530
M17	3500	4,6	11,6	87,0	8,7	4437	88,0	1530
M18	3500	4,6	10,9	88,5	8,9	4805	89,5	1530
M19	1730	6,4	15,0	82,0	7,6	1910	84,0	1790
M20	3485	3,0	7,5	80,0	4,4	1958	84,0	1220

Fonte: Elaboração própria

Os critérios definidos pelos setores estão dispostos na matriz de avaliação (Tabela 3). Em relação ao critério 'importância para a produção', os valores receberam da equipe uma nota de zero (motor menos importante) a 10 (motor mais importante). O 'número de rebobinamentos' indica quantas vezes os enrolamentos dos motores sofreram processo de queima, normalmente por sobreaquecimento. O 'número de falhas' mostra problemas de parada da máquina por problemas nas peças como rolamentos, por exemplo. A equipe entendeu que o critério 'idade' do motor tem importância, mas com grau menor, uma vez que um processo adequado de manutenção preventiva pode reduzir perdas e prolongar a vida útil do equipamento.

O carregamento é um indicativo de perda de energia, normalmente por motor superdimensionado trabalhando com a potência muito acima da necessária para realizar a tarefa. Neste trabalho a proposta de substituição é feita mantendo o mesmo carregamento, ou seja, motores novos com a mesma potência dos motores em funcionamento na planta industrial. Em um sistema motriz, o carregamento pode ser determinado utilizando um modelo matemático que

simula a curva característica da corrente em função do carregamento (GARCIA, 2003; SOLA e XAVIER, 2007). A partir dos dados da Tabela 2 o carregamento é obtido pela Equação 7, considerando a corrente real medida no motor (I_R), a corrente nominal (I_N) e a corrente a vazio (I_o) fornecidas pelo fabricante, bem como o parâmetro α da curva da corrente em função do carregamento do motor (Equação 8).

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha}\ln\left(\frac{I_R}{I_N}\right) \tag{7}$$

$$\alpha = -\ln\left(\frac{I_0}{I_N}\right) \tag{8}$$

O cálculo do Valor Presente Líquido (*VPL),* conforme a literatura (MARQUES *et al*, 2006; MCCOY e DOUGLASS, 2000), considera na Equação 9: o tempo de vida útil do motor (n) definido em 15 anos; a taxa de interesse da empresa (i) de 12% ao ano; o valor economizado de energia (*VEE*) conforme Equação 3 e o valor do investimento no motor de alta eficiência (*VIM*) conforme Tabela 2.

$$VPL = VEE \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}\right] - VIM \quad [R\$] \tag{9}$$

Para o cálculo da tarifa T na Equação 3 são consideradas as regras da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000), de acordo com os horários de utilização e o período do ano. A planta possui um sistema para geração própria no horário de ponta (3 horas por dia, das 18h às 21h ou 19h às 22h no horário de verão), com um custo de R$0,51/kWh, aproximadamente um terço do preço da tarifa da concessionária de energia. Fora do horário de ponta a empresa utiliza a energia da concessionária, um valor bem inferior à geração própria, com custo de R$0,20107/kWh nos 5 meses úmidos do ano e R$0,21883/kWh nos 7 meses secos.

Tabela 3 – Matriz de avaliação

Motores	C1 (HP)	C2 (nota 0-10)	C3 (quant.)	C4 (quant/ano)	C5 (R$)	C6 (%)	C7 (anos)
M1	10	5	2	1	8872	22	5
M2	15	5	1	0,5	52440	79	5
M3	12,5	10	0	0	859	17	2
M4	12,5	10	0	0	5039	20	2
M5	50	10	0	0	78104	84	2
M6	7,5	10	5	1	18017	34	40
M7	20	5	0	0	60574	83	5
M8	7,5	8	0	0	7328	98	4
M9	5	7	1	0,5	2252	20	7
M10	7,5	9	1	0,5	10342	24	10
M11	12,5	10	0	0	3243	30	1
M12	10	10	0	0	1120	17	1
M13	30	10	0	0	34975	50	1
M14	40	10	2	1	122638	104	4
M15	10	8	2	1	15981	32	7
M16	7,5	5	2	1	12777	72	1
M17	7,5	9	0	0	5247	69	10
M18	7,5	8	0	0	5685	76	7
M19	10	7	0	0	4323	21	8
M20	5	7	1	1	11312	42	7

Fonte: Elaboração própria

4.4 Ordenação e análise

O método PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*) pertence à classe de métodos de sobreclassificação e é baseado em uma relação binária entre as ações. O método PROMETHEE I estabelece uma pré-ordem parcial entre as ações, admitindo a incomparabilidade entre ações, enquanto o método PROMETHEE II faz uma ordenação completa.

A partir da matriz de avaliação (Tabela 3) é aplicado o método PROMETHEE II para a ordenação completa dos motores, a partir do fluxo líquido (Φ), que é a diferença entre o fluxo positivo (Φ^+) e o fluxo negativo (Φ^-). A ordenação completa dos motores de acordo com o potencial de substituição para recomendação ao Decisor encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Ordenação dos motores

Ordenação	Motor	Φ	Φ^+	Φ^-
1	M14	0,384	0,470	0,086
2	M6	0,371	0,450	0,079
3	M5	0,248	0,394	0,146
4	M15	0,172	0,278	0,106
5	M13	0,135	0,282	0,146
6	M10	0,084	0,220	0,136
7	M20	0,035	0,216	0,181
8	M1	-0,002	0,232	0,234
9	M2	-0,055	0,194	0,248
10	M4	-0,057	0,154	0,211
11	M16	-0,062	0,208	0,271
12	M11	-0,098	0,132	0,230
13	M7	-0,115	0,169	0,284
14	M3	-0,120	0,123	0,243
15	M9	-0,123	0,127	0,250
16	M12	-0,125	0,121	0,246
17	M17	-0,128	0,111	0,239
18	M19	-0,161	0,097	0,258
19	M18	-0,178	0,083	0,261
20	M8	-0,206	0,078	0,285

Fonte: Elaboração própria a partir da aplicação do método

A análise GAIA mostra a relação entre os critérios, considerando-os como vetores e analisando suas direções (BRANS e MARESCHAL, 2005). Critérios que expressam preferências similares são orientados aproximadamente na mesma direção. Os critérios com preferências conflitantes são orientados em direções opostas. Se as direções entre os critérios são ortogonais não há relação em termos de preferências. O Plano GAIA, com a quantidade de informação preservada δ=73,5%, é mostrado na Figura 2. O eixo de decisão (em vermelho) sendo curto indica fortes conflitos. Os critérios 'Potência' e "Valor Presente Líquido" conflitam com o critério 'Carregamento'. Os critérios 'Falhas por ano', 'Rebobinamentos' e 'Idade', que apresentam preferências próximas, conflitam com o critério 'importância para a produção', mas não possuem relação em termos de preferências com os critérios 'Carregamento' e 'Valor Presente Líquido'. O motor M6 é bom para os critérios 'Falhas por ano' e 'Rebobinamentos' enquanto o motor M14 é bom para o critério 'Valor Presente Líquido'.

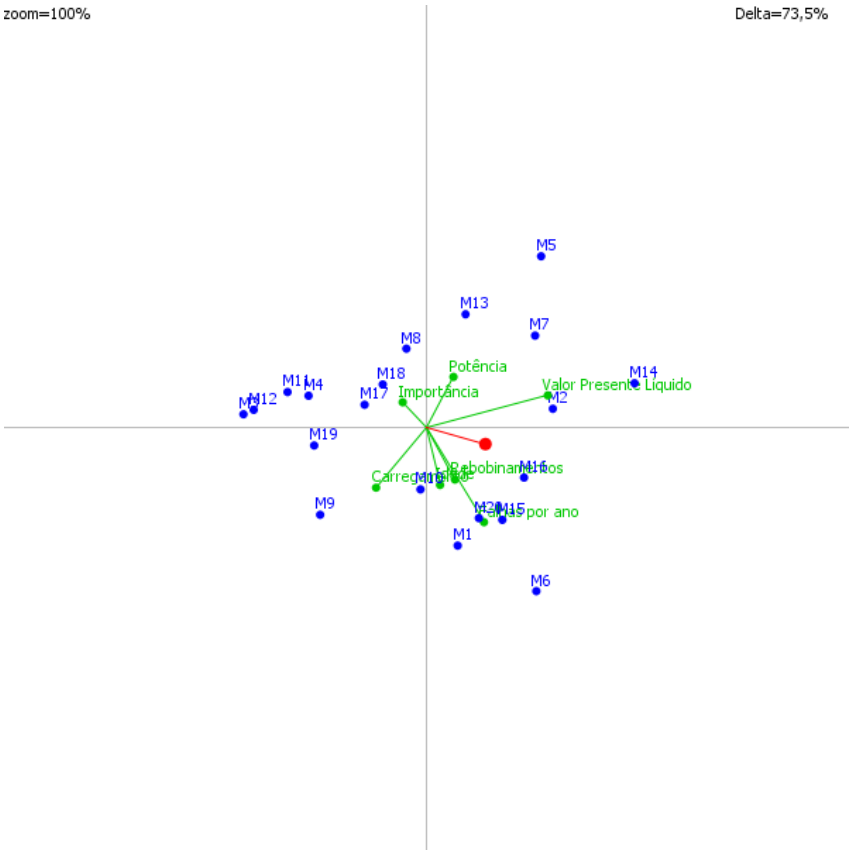


Figura 2 – Plano GAIA
Fonte: *Software* D-Sight

Foi feita a análise de sensibilidade, com variação dos pesos dos critérios. A análise mostrou que, para 5% de variação dos pesos dos critérios, não houve inversões no ranking e para 15% e 20% de variação houve apenas uma inversão até a 8ª posição, entre a primeira e a segunda posição do ranking. Como o decisor pode optar pela substituição de um motor ou de vários motores de cada vez, de acordo com o orçamento da empresa, a ordenação pode ser considerada estável.

Uma análise dos primeiros motores ordenados mostra que a economia de energia é diretamente proporcional à ordenação, conforme o gráfico de correlação (Figura 3). Apesar de os valores não estarem estritamente em ordem decrescente, o gráfico mostra uma tendência de economia de energia maior nos primeiros motores ordenados. Uma maior economia de energia nos primeiros motores priorizados permite que a empresa invista o retorno financeiro obtido na aquisição de novas tecnologias energeticamente eficientes.

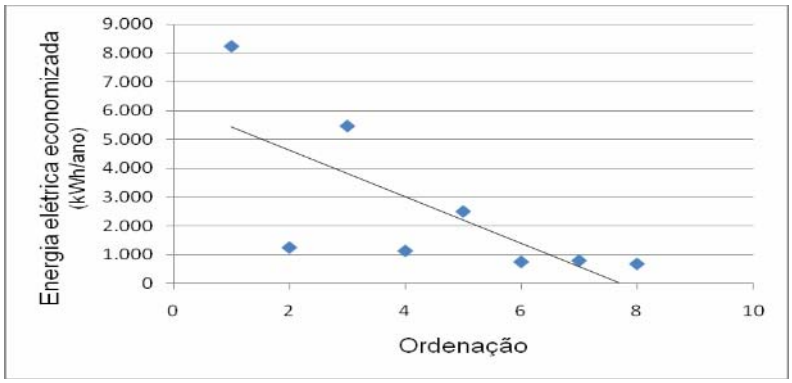


Figura 3 – Energia economizada em função da ordenação
Fonte: Autoria própria com base nos resultados

5. Considerações finais

Os métodos multicritérios utilizados em diversas aplicações têm um grande potencial de aplicação na indústria, principalmente em sistemas motrizes, no sentido de melhoria da eficiência energética. Neste artigo foi aplicado o método multicritério PROMETHEE II para seleção de motores industriais. O estudo mostrou que a aplicação de metodologia multicritério contribui para a melhoria da eficiência energética, na medida em que os motores são ordenados diretamente proporcionais à economia de energia elétrica obtida com a utilização de tecnologia energeticamente eficiente.

A principal contribuição deste trabalho é o modelo multicritério utilizando o método PROMETHEE para selecionar motores elétricos industriais com o objetivo de melhoria da eficiência energética. A aplicação do modelo de decisão pode auxiliar a área de tomada de decisão dentro do sistema de gestão organizacional, subsidiando ações na área de planejamento energético junto ao setor industrial. A ordenação completa dos motores de acordo com as preferências dos setores da empresa possibilita a substituição de acordo com o orçamento disponível.

Futuros projetos para melhoria da eficiência energética, com a utilização dessas ferramentas, podem ser desenvolvidos por Empresas de Serviços de Eficiência Energética (ESCOs) bem como por Universidades, no sentido de apoio à tomada de decisão no processo de gestão energética industrial.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Pernambuco e também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio ao estudo, dentro do projeto DINTER, viabilizado pela CAPES.

Referências

Almeida, A.T.; Ferreira, F.J.T. E.; Fong, J.A.C. (2009). Standards for efficiency of electric motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 17, 1, 12-19.

Anderson, S.T. e Newell, R. (2004). Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits. *Resource and Energy Economics*, 26, 27–50.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução nº 456* – Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília, DF, 29 de novembro, 2000.

Behzadian, M; Kazemzadeh, R.B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research,* 200, 198–215.

Brans, J.P., Mareschal, B. PROMETHEE methods. In: Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis:* State of the Art Surveys. Springer Science and Business Media, Inc., cap. 5, 163–196, 2005.

CNI – Confederação Nacional das Indústrias. *Eficiência energética na indústria*: o que foi feito no Brasil. Brasília: CNI/COMPI, 2009.

Diakoulaki, D. e Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 716–727.

Doukas, H.; Patlitzianas, K.D.; Psarras, J. (2006). Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM. *Resources Policy*, 31, 129–136.

Garcia, A.G.P. *O impacto da Lei de eficiência energética no potencial de economia de energia em motores elétricos industriais*. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

Haralambopoulos, D.A., Polatidis, H. (2003). Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, 28, 961–973.

Hyde, K., Maier, H., Colby, C. (2003). Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12, 245–259.

Kosow, I. L. *Máquinas elétricas e transformadores*. Rio de Janeiro: Globo, 1986.

Loken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1584–1595.

Lung, R.B.; McKane, A.; Olszewski, M. (2005). Industrial Motor System Optimization Projects in the US: An Impact Study. *Energy Engineering*, 102, 1, 61-79.

Marques, M. C. S.; Haddad, J.; Martins, A. R. S. *Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações.* 3ª ed. Itajubá/MG: Eletrobrás, Procel Educação, Unifei, Fupai, 2006.

McCoy, G. A.; Douglass, J.G. *Energy Management for Motor Driven System*. Washington, USA: U.S. Department Of Energy (DOE), March, 2000.

McKane, A; Price, L; De La Rue Du Can, S. *Policies for Promoting Industrial Energy Efficiency in Developing Countries and Transition Economies*. In: UNIDO – United Nations Industrial Development Organization Side Event on Sustainable Industrial Development on 8 May 2007 at the Commission for Sustainable Development (CSD-15). Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007. Disponível: https://www.unido.org/doc/65592 .

Mecrow, B.C. e Jack, A.G. (2008). Efficiency trends in electric machines and drives. *Energy Policy*, 36, 4336–4341.

MME – Ministério das Minas e Energia. *Balanço de Energia Útil.* Brasília: MME/FDTE, 2005.

NEMA – National Electrical Manufacturers Association. Information Guide for general purpose industrial AC induction motor standards. Rosslyn/VA, EUA: NEMA, 2002

Oikonomou, V., Becchis, F., Steg, L., Russolillo, D. (2009). Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 37, 4787–4796.

Pohekar, S.D. e Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making tosustainable energy planning — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 365–381.

Roy, B. *Multicriteria for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, London, 1996.

Saidel, M.A.; Ramos, M.C.E.S.; Alves, S.S. *Assessment and optimization of induction electricmotors aiming energy efficiency in industrial applications*. In: XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010, IEEE, Rome.

Sola, A. V. H. e Xavier, A. A. P. (2007). Organizational human factors as barriers to energy efficiency in electrical motors systems in industry. *Energy Policy,* 35, 5784–5794.

Tsoukiàs, A. (2007). On the concept of decision aiding process: an operational perspective. *Annals of Operations Research*, 154, 3–27.

Tzeng, G.H., Shiau, T.A., Lin, C.Y. (1992). Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy*, 17 (10), 983–992.

Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., Zhao, J.H., (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2263–2278.

WEG – Electric Equipmments S.A. Electric Motors. Web site: www.weg.net ., Abril, 2011.

Yanti, P.A.A.; Mahlia, T.M.I. (2009). Considerations for the selection of an applicable energy efficiency test procedure for electric motors in Malaysia: Lessons for other developing countries. *Energy Policy*, 37, 3467–3474.