

## **APLICAÇÃO DO MÉTODO FITRADEOFF NO APOIO À TOMADA DE DECISÃO: ADEQUAÇÃO A LEI DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA BRASILEIRA**

**Perseu Padre de Macedo**

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife – PE  
perseupadre@gmail.com

**Caroline Maria de Miranda Mota**

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife – PE  
carol3m@gmail.com

### **RESUMO**

Dado o aumento da demanda mundial de energia previsto para mais de um terço até 2035, a eficiência energética torna-se um dos principais pilares para o desenvolvimento da humanidade. O Brasil, se preparando para esse cenário, estabeleceu níveis mínimos de eficiência para os motores elétricos do país, para apoiar o crescimento econômico, promover a sustentabilidade ambiental e garantir a segurança energética. Este artigo apresenta um estudo de caso multicritério para apoiar a tomada de decisão na substituição de tecnologias em um sistema industrial de energia, em busca de adequar a indústria à lei de eficiência energética brasileira. O modelo proposto utiliza o método FITradeoff, para lidar com a informação parcial do problema e escolher a alternativa a ser priorizada para substituição imediata, conforme as preferências elicitadas pelo decisor, cognitivamente mais acessível, com menor desperdício de tempo e menos inconsistente, em comparação ao método tradicional de tradeoff.

**PALAVRAS CHAVE. Apoio à Decisão Multicritério, FITradeoff, Eficiência Energética**

**SE3 – FITradeoff; ADM – Apoio à Decisão Multicritério**

### **ABSTRACT**

Given the increased global energy demand predicted for more than a third until 2035, energy efficiency becomes one of the main pillars for the development of mankind. Brazil, preparing for this scenario, established minimum levels of efficiency for electric motors in the country, to support economic growth, promote environmental sustainability and ensure the energy security. This article presents a case study to support the multi-criteria decision-making in replacement of technologies in an industrial energy system, seeking to adapt the industry to the Brazilian energy efficiency law. The proposed model uses the FITradeoff method to deal with partial information of the problem and choose the alternative to be prioritized for immediate replacement as preferences elicited by the decision maker, cognitively more accessible, less waste of time and less inconsistent as compared to the traditional method of tradeoff.

**KEYWORDS. Multicriteria Decision Support. FITradeoff. Energy Efficiency**

**SE3 – FITradeoff; ADM – Multicriteria Decision Support**

## 1. Introdução

Segundo as Nações Unidas [UN 2010], dado o aumento da demanda mundial de energia previsto para mais de um terço até 2035, com mais da metade deste crescimento vindo da China e Índia, a eficiência energética torna-se um dos principais pilares para o desenvolvimento da humanidade. Esta é uma fonte invisível e subvalorizada, com potencial para apoiar o crescimento econômico, melhorar o desenvolvimento social, promover a sustentabilidade ambiental e garantir a segurança energética. Conforme o relatório da International Energy Agency [IEA 2009], os investimentos globais neste setor podem gerar ganhos acumulados de US\$ 18 trilhões até 2035, quase a soma das economias dos Estados Unidos e Canadá. As economias geradas pela eficiência energética têm sido maiores do que a energia fornecida a partir de qualquer outro combustível, com isso, passa a ser reconhecida como o “primeiro combustível” com grande potencial a ser explorado adequadamente.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética do Brasil [EPE 2015], a produção industrial, transporte de carga e mobilidade das pessoas, respondem por 65% do consumo energético do país. Em seu Plano Nacional de Energia para 2030, mostra que os atuais mecanismos de mercado brasileiro não são suficientes para promover os desejáveis e possíveis incrementos de eficiência no uso final da energia.

Uma das primeiras políticas no país para promover a eficiência energética foi proposta pelo decreto 4508/2002, que estabeleceu uma eficiência mínima para os motores de alta eficiência, como norma voluntária até 2009. Porém esses motores eram responsáveis por 10% de todos os motores que circulavam nas indústrias brasileiras, mesmo com incentivos a favor de sua substituição. Logo, o Governo Federal proibiu desde 2010 a fabricação de motores tipo *standard* maiores ou iguais a 1HP. Contudo, os motores operam por 15 anos ou mais, dessa forma, os motores comercializados até 2009 ainda estariam em uso e considerando a prática de rebobinamentos e reutilização de motores, as indústrias podem continuar a utilizar dessas tecnologias obsoletas por muito mais tempo, dado a falta de informação sobre a viabilidade de substituição dessas por tecnologias eficientes.

Porém a relutância das empresas em investir em rentáveis tecnologias energeticamente eficientes, vem sendo reconhecida desde o final da década de 1970, este *gap* de eficiência ficou conhecido como “paradoxo da energia”. Ou seja, as empresas rejeitam investimentos que proporcionam economia de energia mais do quanto esta custa [Jackson 2010].

O processo de substituição dessas tecnologias refere-se a um problema de decisão, diretamente ligado às barreiras para o uso eficiente da energia nas organizações. Os critérios e alternativas envolvidas nesse problema apresentam-se de forma escassa, dada a falta de experiência com o assunto, informações imprecisas sobre a poupança de energia, custos e benefícios das novas tecnologias, resultando em uma falha no planejamento e nos procedimentos geridos pelas organizações [Sola et al. 2011].

Logo, por meio do método FITradeoff, utilizando informação parcial das preferências do decisor para determinar a alternativa mais preferível dentro de um conjunto de alternativas conforme o modelo aditivo MAVT (Multi-Attribute Value Theory), este trabalho busca selecionar a tecnologia a ser priorizada para substituição imediata em uma indústria do setor químico, para atendimento da Lei de Eficiência Energética Brasileira, mediante a imprecisão das informações por parte do setor.

## 2. Eficiência Energética e a Indústria de Motores

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética [EPE 2015], em sua Nota Técnica DEA 13/15, a eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir dos choques no preço do petróleo na década de 1970, quando foi observado que o uso das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes, seja do ponto de vista econômico ou do ponto de vista ambiental. Logo, foi reconhecido que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia, em consequência, reduzindo os impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais.

A concepção do conceito de eficiência energética é relativa, um produto ou processo será energeticamente eficiente dependendo de alguma referência ou padrão [McKane et al 2007]; [Oikonomou et al 2009]. Em relação ao uso final da energia, a eficiência energética pode ser definida como a razão entre a quantidade de energia consumida e a quantidade de energia demandada [Sola e Mota 2012]. Com isso, a eficiência energética tem sido amplamente promovida como uma ferramenta de gerenciamento de risco, reduzindo os custos da energia e as chances de alteração nos preços desta [Russel 2005].

O sistema de energia industrial é um elemento fundamental para o processamento dos produtos finais, por apresentar uma maior complexidade quanto suas tecnologias, economia e estrutura organizacional. Esse sistema de energia são subclassificados como: sistemas de motores, geração de vapor, aquecedores a gás, refrigeradores e arrefecimentos, geradores de energia e de cogeração [DOE 2004].

Os sistemas de motores em especial, desempenham um papel fundamental nas indústrias por serem os responsáveis por gerar a eletricidade consumida e apresentar potencial economia de energia com o seu correto gerenciamento [Kaya et al. 2008]; [Saidur 2010].

Os sistemas de motores tratam do uso coletivo de alguns motores elétricos dentro do processo produtivo, como: bombas, ar comprimido, ventiladores, transportadores e misturadores. Quando são aperfeiçoados, eles oferecem meios a empresa para reduzir custos, aumentar a produtividade e garantir outros benefícios operacionais, para mantê-la competitiva no mercado. E para prover isso, existem avançadas tecnologias no mercado.

No entanto, algumas barreiras organizacionais impedem o desenvolvimento de projetos voltados a eficiência energética. Em sua maioria, estão ligadas à: processos de tomadas de decisão; incertezas nas informações; falhas nas ferramentas de gerenciamento; falta de tempo e recursos para coletar e processar informações; capital disponível limitado, destinado a outras prioridades a serem investidas; informação e acesso a outras tecnologias, principalmente nos casos de dependência de fornecedores e os riscos envolvidos com novas tecnologias; baixo percentual de pessoas especializadas, o foco está na produção; custo e risco de parar a produção; responsabilidades financeiras e econômicas; dados incompletos acerca da depreciação da tecnologia existente; outras formas de investimento consideradas mais importantes; elevado custo inicial e falta de segurança quanto aos recursos processados por essa nova tecnologia [Worrel et al. 2001].

Existem diversos mecanismos para melhorar a eficiência energética nos sistemas de motores, por exemplo: substituição da tecnologia atual; tornar a carga do motor adequada às normas; variadores de velocidade; banco de capacitores; dispositivos de otimização da energia; gestão da manutenção; gestão da informação e educação [Sola e Mota 2012].

Diante a Lei de Eficiência Energética Brasileira, que estabelece níveis mínimos de eficiência para os motores elétricos do país. Para se adequar a essa lei, as indústrias devem substituir seus motores antigos por motores eficientes, devem compreender que isso irá economizar perdas suficientes para pagar um novo motor, pois quando este encontrasse sobrecarregado apresenta perdas de eficiência e reduz a sua vida útil [Bortoni 2009]. Essa substituição deve ser feita com cautela, pois se deve conhecer o valor de carga e eficiência de cada motor, informações que muitas vezes são imprecisas.

### **3. Método FITradeoff**

O FITradeoff, método flexível e interativo de tradeoff, apoia a tomada de decisão para problemas que envolvem múltiplos critérios. [de Almeida et al 2016]. Ele determina a alternativa mais preferível dentro de um conjunto de alternativas, por meio da informação parcial do decisor para elicitare as preferências.

O procedimento tradicional de tradeoff possui uma forte fundamentação axiomática, porem 67% das vezes que é utilizado, as inconsistências comprometem o estudo. [Boercherding et al 1991]. Com isso, o FITradeoff busca reduzir o esforço cognitivo do decisor para minimizar as inconsistências. Isso é possível dado a sua estrutura flexível. Ele calibra a informação dada pelo

decisor, não sendo preciso realizar ajustes quanto a indiferença entre duas consequências, por não trabalhar com essa relação. O processo de decisão é baseado em declarações de preferência estrita, tornando a elicitación mais fácil sob o aspecto cognitivo, o que torna o procedimento menos longo e tedioso.

O procedimento de otimização permite que as alternativas sejam classificadas como potencialmente ótima, ótima e dominada. Construído em um ambiente DSS, ele também permite o decisor avaliar as potenciais alternativas ótimas sob diferentes formas, por meio do gráfico de barras, gráfico de bolhas e gráfico radar.

#### 4. Descrição do modelo

A complexidade do sistema industrial de energia demanda um gerenciamento de energia adequado. Assim, o modelo de decisão considerou o nível de conhecimento do problema, a informação disponível e o interesse organizacional. Baseando-se nos princípios do comprometimento, multidisciplinaridade, ampla participação dos setores envolvidos, intervenção pouco invasiva e acurácia, o modelo foi aplicado em uma indústria química, localizada no sul do país.

O modelo foi dividido em: formulação do problema de decisão; modelagem do problema; recomendação final. De acordo com o planejamento energético do Diretor Industrial, foi requisitado um modelo que melhorasse a eficiência energética da indústria, atendendo a lei brasileira.

Para modelar o problema, inicialmente os stakeholders dos setores envolvidos foram reunidos para compreender o problema de decisão, selecionar as alternativas disponíveis e definir os critérios a serem mensurados. Porém, dado a complexidade do problema e a imprecisão das informações, o procedimento de refinamento sucessivo [de Almeida et al. 2016] baseado no processo de decisão do modelo de Simon foi escolhido.

O FITradeoff, considera a dificuldade do decisor em prover informação completa, sendo capaz de lidar com informação parcial, além de abordar uma fase preliminar para a estruturação do problema, modelagem de preferência, escolha e implementação das fases do modelo de Simon, que inclui: a identificação dos objetivos; critérios e estabelecimento da problemática e do conjunto de alternativas; identificação do estado de natureza; modelagem de preferências com avaliação intra-critério e inter-critério; e avaliação das alternativas, incluindo análise de sensibilidade e recomendações.

De forma consensual os stakeholders optaram por critérios de maior relevância no contexto do nível operacional, considerando fatores como: características das máquinas, operação, manutenção, produção e financeiro.

Com isso, os dados foram coletados de forma a priorizar as tecnologias a serem substituídas: C1-Potência; C2-Importância para a produção; C3-Número de rebobinamentos; C4-Número de falhas; C5-Valor Presente Líquido (VPL); C6-Carregamento do motor; C7-Anos em uso. Considerando o modelo aditivo, com exceção do critério “Carregamento do motor”, os demais critérios deviam ser maximizados. Posteriormente, foram coletados os dados para vinte tecnologias (motores elétricos), conforme Tabela 1:

Tabela 1: Dados do problema

Critério	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Potência do motor (Max.)	Importância para a produção (Max.)	Nº de rebobinamentos (Max.)	VPL (Max.)	Nº de falhas (Max.)	Carregamento do motor (Min.)	Anos em uso (Max.)
M1	10	5	2	8.872	1	22	5
M2	15	5	1	52.440	0,5	79	5
M3	12,5	10	0	859	0	17	2
M4	12,5	10	0	5.039	0	20	2
M5	50	10	0	78.104	0	84	2
M6	7,5	10	5	18.017	1	35	40
M7	20	5	0	60.574	0	83	5
M8	7,5	8	0	7.328	0	98	4
M9	5	7	1	2.252	0,5	20	7
M10	7,5	9	1	10.342	0,5	24	10
M11	12,5	10	0	3.243	0	30	1
M12	10	10	0	1.120	0	17	1
M13	30	10	0	34.975	0	50	1
M14	40	10	2	122.638	1	104	4
M15	10	8	2	15.981	1	32	7
M16	7,5	5	2	12.777	1	72	1
M17	7,5	9	0	5.247	0	69	10
M18	7,5	8	0	5.685	0	76	7
M19	10	7	0	4.323	0	21	8
M20	5	7	1	11.312	1	42	7

Retornando ao Diretor Industrial, foi aplicado o procedimento flexível e interativo FITradeoff, elicitando as preferências do decisor segundo as informações por ele fornecidas.

### 5. Resultados e Discussão

Os dados foram inseridos em uma planilha fornecida pelo software do FITradeoff, construído em uma plataforma DSS. A seguir, houve uma ordenação dos critérios por meio do método SWING. O decisor pôde optar também pela comparação aos pares entre os critérios elicitados. Concordando com a ordenação, a segunda iniciou a etapa da elicitación flexível das preferências segundo heurística presente no software, cujo objetivo é minimizar o número de questões a serem feitas ao decisor, tornando o procedimento mais fácil e dinâmico. Em seguida, o procedimento de elicitación das preferências foi realizado, conforme apresentado na Figura 1 a seguir:

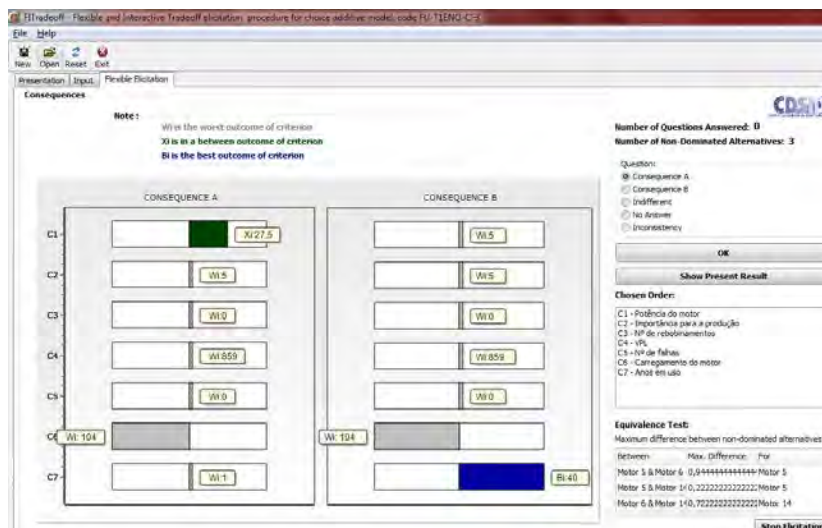


Figura 1: Elicitação flexível

Após treze ciclos, o resultado foi encontrado, recomendando como alternativa o Motor 14. A Tabela 2 mostra os ciclos e escolhas do decisor durante o processo. Para cada ciclo, a segunda coluna expõe a Consequência A e a terceira coluna expõe a Consequência B. A Consequência B consiste na melhor consequência do critério que apresenta menor peso nos pares de critérios que estão sendo comparados. A Consequência A consiste no valor indicado por  $x_i'$  ou  $x_i''$  para o critério com maior peso nos pares que estão sendo comparados. A última coluna indica os resultados intermediários que são encontrados a cada ciclo, que consiste no subconjunto de potenciais alternativas ótimas.

Tabela 2: Ciclos e escolhas consideradas no processo

Ciclo	Consequência A	Consequência B	Escolha do decisor	Potenciais alternativas ótimas
1	50% de C1	C7	A	Motor 5, Motor 6, Motor 14
2	50% de C1	C2	B	Igual ao ciclo anterior
3	50% de C2	C3	B	Igual ao ciclo anterior
4	50% de C3	C4	B	Igual ao ciclo anterior
5	50% de C4	C5	B	Igual ao ciclo anterior
6	50% de C5	C6	B	Igual ao ciclo anterior
7	50% de C6	C7	A	Igual ao ciclo anterior
8	75% de C1	C2	B	Motor 6, Motor 14
9	75% de C2	C3	A	Igual ao ciclo anterior
10	75% de C3	C4	B	Igual ao ciclo anterior
11	75% de C4	C5	B	Igual ao ciclo anterior
12	75% de C5	C6	B	Igual ao ciclo anterior
13	87,5% de C1	C2	A	Motor 14

Como pode ser observado, no final do primeiro ciclo, o subconjunto possui três alternativas (Motores 5, 6 e 14). Isso persiste até o oitavo ciclo, quando restam duas alternativas a serem comparadas. Durante esta etapa, para apoiar a tomada de decisão, o decisor pode avaliar melhor alternativa que atenda ao problema por meio do gráfico de barras, gráfico de bolhas e gráfico de radar das potenciais alternativas ótimas.

Conforme o procedimento tradicional de tradeoff requer uma avaliação de aproximadamente  $3(n-1)$  relações de indiferença para estabelecer pesos para os critérios, mas com a heurística presente neste procedimento flexível, há a redução de inconsistências, ao calibrar a informação dada pelo decisor, impondo consistência no procedimento de elicitación [de Almeida et al 2016]. Com isso, ao invés de 18 perguntas a serem feitas, com apenas 13, cognitivamente mais fáceis, o resultado foi obtido. A relação de preferência P requer menor esforço cognitivo que a relação de indiferença, isso evita um processo tedioso e longo, que possibilitou a redução de inconsistências durante o processo.

Por meio da flexibilidade presente no procedimento de elicitación do FITradeoff, foi possível obter o resultado com menos informação que o requerido no procedimento tradicional. A Figura 2 a seguir, mostra os intervalos de pesos para cada critério, para a solução encontrada. Os intervalos são: Potência do motor (0,360-0,193); Importância para a produção (0,297-0,181); Número de rebobinamentos (0,185-0,112); Valor Presente Líquido (0,167-0,092); Número de falhas (0,156-0,073); Carregamento do motor (0,150-0,056); Anos em uso (0,036-0,000).

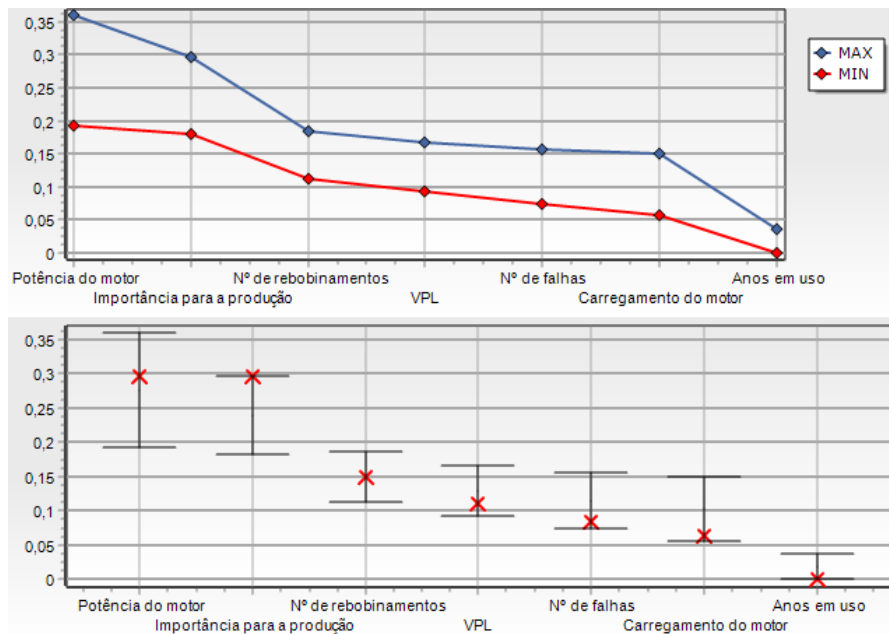


Figura 2: Intervalo dos pesos

Dessa forma, com os pesos variando dentro dessas faixas, para os dados presentes, a alternativa selecionada continuaria sendo a alternativa ótima para o problema proposto. Atingindo seu valor máximo 0,7823 para os pesos apresentados na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3: Valor máximo da alternativa ótima

Alternativa	K(C1)	K(C2)	K(C3)	K(C4)	K(C5)	K(C6)	K(C7)	Valor máximo
Motor 14	0,297	0,297	0,1485	0,1114	0,0835	0,0626	0	0,7823

Ao comparar o ganho em eficiência ao substituir esta tecnologia por outra mais eficiente, ganhasse 2,7% em eficiência do motor com conforme valores informados pelo software de cálculo de eficiência energética da empresa WEG. Conforme Tabela 4, a seguir, podemos observar os seguintes retornos com essa substituição:

Tabela 4 – Análise de desempenho energético

Alternativa	EEE (kWh/ano)	VEE (R\$/ano)	Investimento Total (R\$)	Retorno do Invest. (anos)	Redução de CO <sub>2</sub> (Kg/ano)	Plantio de árvores (un)
Motor 14	8.197,00	2.459,06	8.207,22	3,34	598,37	4

Logo, a substituição desse motor promove um ganho em eficiência, para um custo médio de energia de R\$0,30 em 8.760h/ano, economiza 8.197 kWh/ano, um total de R\$2.459,06/ano. Isso pode ser alcançado com um investimento total de R\$8.207,22. O retorno desse investimento viria em aproximadamente 3 anos, reduzindo a emissão de 598,37 Kg de CO<sub>2</sub> por ano, o equivalente ao plantio de 4 árvores. A alta quantidade em energia economizada ocorre dado o contraste entre a eficiência real do motor atual em operação (91,7%) e a eficiência do novo motor (94,4%).

## 5. Considerações Finais

Conforme o problema apresentado, um modelo que provesse a melhoria energética da indústria em atendimento a lei brasileira foi proposto, por meio da seleção de um motor a ser

priorizado para substituição. Com a utilização do FITradeoff, houve uma redução significativa da quantidade de informação necessária para obtenção do resultado, além da facilidade cognitiva de entendimento e redução de inconsistências, que permitiu o modelo evitar um processo longo e tedioso. Logo, o mesmo pode ser facilmente replicado para a seleção de outros motores.

Como alternativas potencialmente ótimas, o motor 5 e o motor 6, podem ser substituídos posteriormente, trazendo maiores retornos em eficiência energética para a indústria.

O modelo auxiliou na transposição de algumas barreiras organizacionais por contribuir com a conscientização da empresa quanto à importância da eficiência energética, não só em cumprimento da lei, mas o retorno financeiro e ambiental que essa eficiência pode promover, providenciando apoio à tomada de decisão mediante os objetivos e critérios conflitantes entre os setores e imprecisão das informações.

Como recomendação, um ciclo de palestras aos funcionários sobre o tema e a disseminação de uma cultura empresarial focada na eficiência energética, deve ser trabalhado. Futuramente sugere-se a implantação de um Sistema de Gestão de Energia e o modelo mostra-se eficaz para fazer parte deste.

### **Agradecimentos**

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo apoio financeiro.

### **Referências**

Borcherding K., Eppel T., von Winterfeldt, D. (1991). Comparison of weighting judgments in multiattribute utility measurement. *Management Science*, 37, pp. 1603–1619

Bortoni, E.C (2009). Are my motors oversized? *Energy Convers Manage*, 50:2282–7.

DOE – US Department of Energy (2004). *Energy loss reduction and recovery in industrial energy systems*. Washington.

de Almeida, A.T.; Almeida, J.A.; Costa, A.P.C.S; Almeida-Filho, A.T. (2016); A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of Operational Research*.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2015). *Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014*. Rio de Janeiro: EPE.

IEA – International Energy Agency (2009). *Energy technology transitions for industry*. Paris, France: OECE/IEA.

Jackson, J. (2010) Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools. *Energy Policy*, 38.

Kaya D., Yagmur E.A., Yigit K.S., Kilic F.C., Eren AS, Celik C. (2008). Energy efficiency in pumps. *Energy Convers Manage*;49:1662–73.

Mckane A., Price L., de la Rue du Can S. (2007). *Policies for promoting industrial energy efficiency in developing countries and transition economies*. Lawrence Berkeley National Laboratory.



Oikonomou, V.; Becchis, F.; Steg, L.; Russolillo, D. (2009). Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*;37:4787–96.

Russell, C. (2005). Strategic industrial energy efficiency: reduce expenses, build revenues, and control risk. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering* 102, 7– 273, 7–27.

Sola, A.V.H; Mota, C.M.M. A; Kovaleski, J.L. (2011). A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. *Energy Conversion and Management, Energy Policy*, 39.

Sola, A.V.H; Mota, C.M.M. (2012). A multi-attribute decision model for portfolio selection aiming to replace technologies in industrial motor systems. *Energy Conversion and Management*, 57.

Saidur R., Rahim N.A., Masjuki H.H., Mekhilef S., Ping H.W., Jamaluddin, M.F. (2008). End-use energy analysis in the Malaysian industrial sector 2010;34:153–8.

United Nations - Energy. (2010) *Delivering on Energy: An overview of activities by UN-Energy and its members*

Worrell E., Berkel R. V., Fengqi Z., Menke C., Schae R., Williams, R.O. (2001). Technology transfer of energy efficient technologies in industry: a review of trends and policy issues. *Energy Policy* 29:29–43.